

KIT SCIENTIFIC REPORTS 7607

Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherungurgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen

Abschlussbericht Sonderforschungsbereich 499

Oliver Kraft (Hrsg.)

Kraft, Oliver (Hrsg.)

**Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung ungeformter
Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen**

Abschlussbericht Sonderforschungsbereich 499

Karlsruhe Institute of Technology
KIT SCIENTIFIC REPORTS 7607

Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherungurgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen

Abschlussbericht Sonderforschungsbereich 499

Oliver Kraft (Hrsg.)

Report-Nr. KIT-SR 7607

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.ksp.kit.edu

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz
publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

KIT Scientific Publishing 2012
Print on Demand

ISSN 1869-9669
ISBN 978-3-86644-812-4

	Seite
1 Übersicht	1
1.1 Teilprojektleiterinnen und Teilprojektleiter	1
1.2 Teilprojekte	2
1.3 Beteiligte Einrichtungen	3
1.4 Finanzielle Ausstattung	6
2 Zentrale Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs	7
2.1 Wissenschaftliche Entwicklung	7
2.2 Interne Kooperation und Organisation	12
2.3 Außenwirkung	13
3 Strukturwirkung des Sonderforschungsbereichs am Standort	18
3.1 Personelle Auswirkungen	18
3.2 Infrastruktur	19
4 Hinweise an die Deutsche Forschungsgemeinschaft	21
5 Berichte über die einzelnen Teilprojekte der letzten Förderperiode	22
<u>Projektbereich A</u>	
A1 Albers, Entwicklungsmethodik - Methoden zur Unterstützung des Entwicklungs- prozesses von Mikrobauteilen	22
A2 Albers, Modellierung vonurgeformten Mikrobauteilen und mikromechanischen Systemen aus metallischen und keramischen Werkstoffen	37
A3 Bauer, Knitter, Prototypenfertigung – Entwicklung von Methoden zur festigkeitsop- timierten Herstellung mikrostruk-turierter Prototypen und Kleinserien aus Keramik	52
A4 Korvink, Greiner, Simulation Mikro-PIM und Mikroguss – Simulation von Mikro- Urformverfahren für die Mikro-Fabrik: Automatisierung und Erweiterung des Parti- kelsimulators	67
<u>Projektbereich B</u>	
B1 Hanemann, Haußelt, Formmassen – Formmassen für 1K- und 2K-Mikro- Pulverspritzgießen	82
B4 Schulze, Mikrofunkenerosion – Wirtschaftliche und prozesssichere Strukturierung mittels Funkenerosion	97

Inhaltsverzeichnis

B5	Schulze, Löhe, Optimierte Formeinsätze – Optimierung der Eigenschaften von Mikroformeinsätzen durch mechanische und chemische Behandlungen	112
B6	Schulze, Mikrolaserstrukturierung – Kombination von Laserablation und Funkenerosion zur Herstellung dreidimensionaler mikrostrukturierter Formeinsätze	127
<u>Projektbereich C</u>		
C1	Piotter, Hanemann, MicroPIM – Herstellung von metallischen und keramischen Mikrobauteilen durch Pulverspritzgießen	141
C2	Haußelt, Ritzhaupt-Kleissl, Verfahrensentwicklung zum Gießen von Mikrokomponenten aus Metalllegierungen	156
C3	Fleischer, Automatisierung – Sinterfügen	173
C4	Lanza, Mikroprozesskettengerechte Qualitätssicherung	190
C5	Piotter, Ritzhaupt-Kleissl, 2C-MicroPIM – 2-Komponenten-Pulverspritzgießen in Mikrodimensionen	205
<u>Projektbereich D</u>		
D1	Wanner, Löhe, Mikrobauteilzustand – Analyse von Gefüge, Eigenspannungszustand, Verfestigungszustand und Topographieurgeformter Mikrobauteile	220
D2	Lang, Kraft, Mikromechanische Kennwerte – Verhalten von Mikroproben und -bauteilen unter quasistatischen und zyklischen, ein- und mehrachsigen Beanspruchungen	235
D3	Schneider, Zum Gahr, Tribologie – Tribologische Aspekte der Funktionssicherheit von Mikrokomponenten	252
<u>Dienstleistungsprojekte</u>		
Z2	Albers, Konstruktion und Demonstrator – Ausführen von Konstruktionsdienstleistungen, Koordination des Zentrums für integrierte Mikrofertigung (ZIM)	272
Z3	Schulze, Formeinsätze und Probekörper – Zentrale Bereitstellung von Formeinsätzen und Probekörpern	279
6	Bericht über das integrierte Graduiertenkolleg	285
Z4	Integriertes Graduiertenkolleg – „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung ungeformter Mikrobauteile“	285
7	Berichte über abgeschlossene Transferprojekte	290
T1	Schulze, Strukturkatalog für miniaturisierte Trennprozesse	290
T2	Lanza, Fertigungsnahe Mikro-Qualitätssicherung	315
T3	Kraft, Huber, Verschleißsimulation tribologisch beanspruchter Systeme	330

1 Übersicht

1.1 Beteiligte Einrichtungen

In den zwölf Förderjahren des Sonderforschungsbereiches haben einige der beteiligten Institute verschiedene Veränderungsprozesse durchlaufen. In der ersten Förderphase waren vier Institute der Universität Karlsruhe und ein Institut des Forschungszentrums Karlsruhe beteiligt. Im Verlauf des SFB wurde ein neu gegründetes Institut aufgenommen sowie ein Institut der Universität Freiburg. Es kam darüber hinaus zu Umbenennungen, Zusammenschlüssen und Schließungen von Instituten und zu Zusammenlegungen von Forschungseinrichtungen.

Das KIT entstand aus der Universität Karlsruhe und dem Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) am 01.10.2009, so dass das außeruniversitäre Institut für Materialforschung III Teil des KIT wurde. Zum 1. Januar 2011 haben sich dann die drei Teilinstitute für Materialforschung (IMF I-III), das Institut für Keramik im Maschinenbau (IKM), das Institut für Zuverlässigkeit von Bauteilen und Systemen (izbs) und das Institut für Werkstoffkunde I (IWK I) zum Institut für Angewandte Materialien (IAM) am KIT zusammengeschlossen. Das IAM verfügt über eine Struktur mit jetzt sieben Teilinstituten, so dass eine Zuordnung der Teilprojekte des SFB zu den Teilinstituten des SFB möglich und sinnvoll ist. Das Institut für Werkstoffkunde II wurde zum 31.12.10 mit der Gründung des IAM geschlossen, Herrn Prof. Zum Gahr wurden am IAM-AWP (Teilinstitut für Angewandte Werkstoffphysik) die nötigen Arbeitsbedingungen gegeben, um das Projekt D4 erfolgreich abschließen zu können.

In Tabelle 1.1 ist eine detaillierte Übersicht der Veränderungen der jeweiligen Einzelinstitute aufgeführt. In den Spalten befinden sich die Veränderungen der Forschungseinrichtungen und in den Zeilen der Institute. Es sind nur die Jahreszahlen bei Veränderungen aufgeführt. Im weiteren Berichtsverlauf werden die Abkürzungen in der rechten Spalte benutzt.

Tabelle 1.1: Veränderungen der beteiligten Institute während der Förderperiode

	Institutsname	Forschungseinrichtung		Ort	Abkürzung
		bis 30.09.2009	ab 01.10.2009		
	Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau	Universität Karlsruhe		Karlsruhe	IPEK
ab 2004	Institut für Produktentwicklung	Universität Karlsruhe	KIT		
	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik	Universität Karlsruhe		Karlsruhe	wbk
ab 2003	Institut für Produktionstechnik	Universität Karlsruhe	KIT		
	Institut für Materialforschung III	For- schungs- zentrum Karlsruhe		Karlsruhe	IAM-WPT
ab 2011	Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik		KIT		
	Institut für Zuverlässigkeit von Bauteilen und Systemen	Universität Karlsruhe		Karlsruhe	IAM -ZBS
ab 2011	Institut für Angewandte Materialien - Zuverlässigkeit von Bauteilen und Systemen		KIT		
	Institut für Werkstoffkunde I	Universität Karlsruhe		Karlsruhe	IAM - WK
ab 2011	Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde		KIT		
	Institut für Materialforschung II	For- schungs- zentrum Karlsruhe		Karlsruhe	IAM - WBM

ab 2011	Institut für Angewandte Materialien – Werkstoff- und Biomechanik		KIT		
bis 2010	Institut für Werkstoffkunde II	Universität Karlsruhe	KIT	Karlsruhe	IWK II
ab 2003	Institut für Mikrosystemtechnik	Albert-Ludwigs-Universität Freiburg		Freiburg	IMTEK

1.2 Teilprojektleiterinnen und Teilprojektleiter

Tabelle 1.2: Liste der Teilprojektleiterinnen und –leiter (die Institutsbezeichnung bezieht sich auf die aktuelle Zugehörigkeit)

Name, Vorname, akad. Titel	Ge-schlecht	Institut	Teilprojekt (Kennziffer)	Gefördert im SFB von (Monat/Jahr) bis (Monat/Jahr)
Albers, Albert, Prof. Dr.-Ing.	m	IPEK	A1, A2	01/2000-12/2011
			Z2	01/2003-12/2011
Bauer, Werner, Dr.-Ing.	m	IAM-WPT	A3	01/2000-12/2011
Beck, Tilmann, Dr.-Ing.	m	IAM-WK	D2	01/2003-12/2005
Eberl, Christoph, Dr. rer. nat.	m	IAM-WBM	N01	05/2007-12/2012
Fleischer, Jürgen, Prof. Dr.-Ing.	m	wbk	B4	01/2006-12/2008
			B6	01/2006-12/2008
			C3	01/2006-12/2011
			C4	01/2006-12/2008
Greiner, Andreas, Dr. rer. nat.	m	IMTEK	A4	01/2009-12/2011
Hanemann, Thomas, Prof. Dr.-Ing.	m	IAM-WPT	B1	01/2006-12/2011
			C1	01/2009-12/2011
Haußelt, Jürgen, Prof. Dr.-Ing.	m	IAM-WPT	A3	01/2000-12/2002
			A4	01/2003-12/2008
			B1	01/2003-12/2011
			C1	01/2000-12/2002
			C2	01/2000-12/2011
Kerscher, Eberhard, Dr.-Ing.	m	IAM-WK	D2	01/2003-02/2009
Knitter, Regina, Dr. rer. nat.	w	IAM-WPT	A3	01/2009-12/2011
Huber, Norbert, Prof. Dr.-Ing.	m	IAM-WBM	D4	10/2003-12/2008
Korvink, Jan Gerrit, Prof. Dr. sc. techn.	m	IMTEK	A4	01/2003-12/2011
Kraft, Oliver, Prof. Dr. rer. nat.	m	IAM-WBM	D2	01/2009-12/2011
			D4	10/2003-12/2008
			Z1	01/2009-12/2011
			Z4	01/2009-12/2011
Lang, Karl-Heinz	m	IAM-WK	D2	01/2000-12/2003 03/2009-12/2011
Lanza, Gisela, Prof. Dr.-Ing.	w	wbk	C4	01/2006-12/2011
Löhe, Detlef, Prof. Dr.-Ing.	m	IAM-WK	B5	01/2003-12/2011
			D1	01/2000-12/2011
Munzinger, Christian, Dr.-Ing.	m	wbk	C3	01/2009-12/2011
Piötter, Volker, Dr.-Ing.	m	IAM-WPT	C1	01/2003-12/2011
			C5	01/2006-12/2011
Ritzhaupt-Kleissl, Hans-Joachim, Dr.-Ing.	m	IAM-WPT	A3	01/2003-12/2008
			B1	01/2000-12/2002
			C2	01/2000-12/2011
			C5	01/2009-12/2011
Ruprecht, Robert, Dr.-Ing.	m	IAM-WPT	B1	01/2000-12/2005
			C1	01/2000-12/2008
			C2	01/2000-12/2008
			C5	01/2006-12/2008

Schmidt, Jürgen, Prof. Dr.-Ing.	m	wbk	B2	01/2000-12/2005
			B3	01/2000-12/2002
			B4	01/2006-12/2008
			C3	01/2003-12/2005
			Z1	01/2000-12/2008
			Z3	01/2006-12/2008
Schneider, Johannes, Dr.-Ing.	m	IWK II	D3	01/2000-03/2009
		IAM-ZBS		04/2009-12/2011
Schulze, Volker, Prof. Dr.-Ing.	m	IAM-WK und wbk	B4	01/2009-12/2011
			B5	01/2003-12/2011
			B6	01/2009-12/2011
			D1	01/2000-12/2008
			D2	01/2000-12/2005
			Z3	01/2009-12/2011
Spath, Dieter, Prof. Dr.-Ing.	m	wbk	B4	01/2003-12/2005
			C4	01/2000-12/2005
Wanner, Alexander, Prof. Dr. rer. nat.	m	IAM-WK	D1	01/2009-12/2011
Weule, Hartmut, Prof. Dr.-Ing.	m	wbk	C3	01/2000-12/2005
Zum Gahr, Karl-Heinz, Prof. Dr.-Ing.	m	IWK II	D3	01/2000-12/2010
		IAM-AWP		01/2011-12/2011

1.3 Teilprojekte

Tabelle 1.3: Liste aller im SFB geförderten Teilprojekte. Die Transferprojekte und die Nachwuchsgruppe sind hier nicht aufgeführt.

Teilprojekt (Kennziffer)	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Leiter/in, Institut Abkürzung siehe Kapitel 1.1	Gefördert im SFB von (Monat/Jahr) bis (Monat/Jahr)
A	Projektbereich Entwicklung			
A1	Methoden zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses von Mikrobauteilen	Maschinenbau, Entwicklung, Antriebstechnik	Prof. Dr.-Ing. A. Albers, IPEK	01/2000- 12/2011
A2	Modellierung von ungeformten Mikrobauteilen und mikro-mechanischen Systemen aus metallischen und keramischen Werkstoffen	Maschinenbau, Entwicklung, Antriebstechnik	Prof. Dr.-Ing. A. Albers, IPEK	01/2000- 12/2011
A3	Entwicklung von Methoden zur festigkeitsoptimierten Herstellung von mikrostrukturierten Prototypen und Kleinserien aus Keramik	Maschinenbau, Abformtechnik, Formmassen- entwicklung, Prototypenferti- gung	Dr.-Ing. W. Bauer, Prof. Dr.-Ing. J. Haußelt, IAM-WPT	01/2000- 12/2002
			Dr.-Ing. W. Bauer, Dr.-Ing. H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, IAM-WPT	01/2003- 12/2008
			Dr.-Ing. W. Bauer, Dr. rer. nat. R. Knitter, IAM-WPT	01/2009- 12/2011
A4	Simulation von Mikro-Urform-verfahren für das Zentrum für Integrierte Mikrofertigung: Automatisierung und Erweiterung des Partikelsimulators	Maschinenbau, Simulation	Prof. Dr.-Ing. J. Haußelt, WPT Prof. Dr. sc. techn. J. G. Korvink, IMTEK	01/2003- 12/2008
			Prof. Dr. sc. techn. J. G. Korvink, Dr. rer. nat. A. Greiner, IMTEK	01/2009- 12/2011

Projektbereich Prozessvorbereitung				
B1	Formmassen für das 1K- und 2K-Mikro-Pulverspritzgießen	Maschinenbau, Werkstoffprozesstechnik, Formmassenentwicklung	Dr.-Ing. H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, Dr. R. Ruprecht, IAM-WPT	01/2000-12/2002
			Dr. R. Ruprecht, Prof. Dr.-Ing. J. Haußelt, IAM-WPT	01/2003-12/2005
			Prof. Dr.-Ing. T. Hanemann, Prof. Dr.-Ing. J. Haußelt, IAM-WPT	01/2006-12/2011
B2	Mikrozerspanung	Maschinenbau, Fertigungs-technik	Prof. Dr.-Ing. J. Schmidt, wbk	01/2000-12/2005
B3	Prozesssicherung der Mikroformherstellung	Maschinenbau, Fertigungs-technik	Prof. Dr.-Ing. J. Schmidt, wbk	01/2000-12/2002
B4	Wirtschaftlich und prozesssichere Strukturierung mittels Mikrofunkenerosion	Maschinenbau, Fertigungs-technik, Mikrofunkenerosion	Prof. Dr.-Ing. D. Spath, wbk	01/2003-12/2005
			Prof. Dr.-Ing. J. Schmidt, wbk Prof. Dr.-Ing. J. Fleischer, wbk	01/2006-12/2008
			Prof. Dr.-Ing. V. Schulze, wbk	01/2009-12/2011
B5	Optimierung der Eigenschaften von Mikroformeinsätzen durch mechanische, lasergestützte und chemische Behandlungen	Maschinenbau, Werkstoffkunde, Rand-schichtoptimierung	Prof. Dr.-Ing. V. Schulze, wbk Prof. Dr.-Ing. D. Löhe, IAM-WK	01/2003-12/2011
B6	Kombination von Laserablation und Funkenerosion zur Herstellung dreidimensional mikrostrukturierter Formeinsätze	Maschinenbau, Fertigungs-technik, Mikro-laserstrukturierung	Prof. Dr.-Ing. J. Fleischer, wbk	01/2006-12/2008
			Prof. Dr.-Ing. V. Schulze, wbk	01/2009-12/2011
Projektbereich Produktion				
C1	Herstellung von keramischen und metallischen Mikroteilen durch Pulverspritzgießen	Maschinenbau, Urformtechnik, Mikropulverspritzgießen	Dr. R. Ruprecht, Prof. Dr.-Ing. J. Haußelt, IAM-WPT	01/2000-12/2002
			Dr. R. Ruprecht, Dr.-Ing. V. Piotter, IAM-WPT	01/2003-12/2008
			Dr.-Ing. V. Piotter, Prof. Dr.-Ing. T. Hanemann, IAM-WPT	01/2000-12/2011
C2	Mikroguss	Maschinenbau, Umformtechnik, Mikroguss	Prof. Dr.-Ing. J. Haußelt, Dr. R. Ruprecht, IAM-WPT	01/2000-12/2008
			Prof. Dr.-Ing. J. Haußelt, Dr.-Ing. H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, IAM-WPT	01/2000-12/2011
C3	Automatisierung – Sinterfügen	Maschinenbau, Fertigungs-technik, Automatisierung, Sinterfügen	Prof. Dr.-Ing. H. Weule, wbk	01/2000-12/2002
			Prof. Dr.-Ing. H. Weule, Prof. Dr.-Ing. J. Schmidt, wbk	01/2003-12/2005
			Prof. Dr.-Ing. J. Fleischer, wbk	01/2006-12/2008
			Prof. Dr.-Ing. J. Fleischer, Dr.-Ing. Chr. Munzinger, wbk	01/2009-12/2011
C4	Mikroprozesskettengerechte Qualitätssicherung	Maschinenbau, Produktions-informatik, Qualitätssicherung	Prof. Dr.-Ing. D. Spath, wbk	01/2000-12/2005
			Prof. Dr.-Ing. J. Fleischer, Prof. Dr.-Ing. G. Lanza, wbk	01/2006-12/2008
			Prof. Dr.-Ing. G. Lanza, wbk	01/2009-12/2011

C5	2-Komponenten-Pulverspritzgießen in Mikrodimensionen	Maschinenbau, Urformtechnik, Mikropulverspritzgießen	Dr.-Ing. V. Piotter, Dr. R. Ruprecht, IAM-WPT	01/2006-12/2008
			Dr.-Ing. V. Piotter, Dr.-Ing. H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, IAM-WPT	01/2009-12/2011
D	Projektbereich Werkstoff- und Bauteilverhalten			
D1	Analyse von Gefüge, Eigenspannungszustand, Verfestigungszustand und Topographieurgeformter Mikrobauteile	Maschinenbau, Werkstoffkunde	Prof. Dr.-Ing. D. Löhe Dr.-Ing. V. Schulze, IAM-WK	01/2000-12/2008
			Prof. Dr.-Ing. D. Löhe, Dr.rer. nat. A.Wanner, IAM-WK	01/2009-12/2011
D2	Verhalten von Mikroproben und -bauteilen unter quasistatischen und zyklischen, ein- und mehr-achsigen Beanspruchungen	Maschinenbau, Werkstoffkunde	Dr.-Ing. V. Schulze Dr.-Ing. K.-H. Lang, IAM-WK	01/2002-12/2000
			Dr.-Ing. T. Beck Dr.-Ing. V. Schulze, IAM-WP	01/2003-12/2005
			Prof. Dr. rer. nat. O. Kraft, IAM-WBM	01/2009-12/2011
			Dr.-Ing. K.-H. Lang, IAM-WK	04/2009-12/2011
			Dr.-Ing. E. Kerscher, IAM-WK	01/2003-03/2009
D3	Tribologische Aspekte der Funktionssicherheit von Mikrokomponenten	Maschinenbau, Werkstoffkunde, Tribologie	Dr.-Ing. J. Schneider, Prof. Dr.-Ing. K.-H. Zum Gahr IWK II	01/2000-04/2009
			Dr.-Ing. J. Schneider, IAM-ZBS; Prof. Dr.-Ing. K.-H. Zum Gahr, IWK II	05/2009-12/2010
			Dr.-Ing. J. Schneider, IAM-ZBS; Prof. Dr.-Ing. K.-H. Zum Gahr IAM-AWP	01/2011-12/2011
D4	Verschleißsimulation und Lebensdauervorhersage von mechanischen Mikrosystemen ausurgeformten Bauteilen	Maschinenbau, Simulation, Werkstoffkunde	Prof. Dr. rer. nat. O. Kraft, IAM-WBM; Prof. Dr. N. Huber, Institut für Werkstoffforschung, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht	10/2004-12/2008
Z	Projektbereich Zentrale Aufgaben			
Z1	Verwaltung		Prof. Dr.-Ing. J. Schmidt, wbk	01/2000-12/2008
			Ass. B. Emmerich, IAM-WK, Prof. Dr. rer. nat. O. Kraft, IAM-WBM, KIT	01/2009-12/2011
Z2	Konstruktion und Demonstrator – Ausführen von Konstruktionsdienstleistungen, Koordination des Demonstrators „Zentrum für Integrierte Mikrofertigung“	Maschinenbau, Entwicklung, Betriebsorganisation	Prof. Dr.-Ing. A. Albers, IPEK	
Z3	Zentrale Bereitstellung aller SFB-Formeinsätze	Maschinenbau, Fertigungstechnik	Prof. Dr.-Ing. J. Schmidt, wbk	01/2006-12/2008
			Prof. Dr.-Ing. V. Schulze, wbk	01/2009-12/2011
Z4	Graduiertenkolleg - Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherungurgeformter Mikrobauteile		Prof. Dr. rer. nat. O. Kraft, IAM-WBM	01/2009-12/2011

1.4 Finanzielle Ausstattung

Die in der nachfolgenden Tabelle 1.4 aufgeführten Beträge beinhalten die finanziellen Ausstattungen der Teil- und Dienstleistungsprojekte sowie der Transferbereiche T1-T3. Die noch in der Projektlaufzeit befindlichen Transferbereiche T4-T6 und die laufende Nachwuchsforscherguppe N1 wurde nicht berücksichtigt.

Tabelle 1.4: Finanzielle Ausstattung des Sonderforschungsbereichs

Haushaltsjahr	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	Summe
2000	1.816,8 kDM	200,4 kDM	234,0 kDM	2.251,2 kDM
2001	1.852,2 kDM	205,8 kDM	300,0 kDM	2.358,0 kDM
2002	1.911,5 kDM	185,3 kDM	0 kDM	2.096,8 kDM
Zwischensumme erste Förderperiode:				6.706,0 kDM
2003	1.283,6 k€	195,5 k€	443,6 k€	1.922,7 k€
2004	1.393,0 k€	199,3 k€	100,6 k€	1.692,9 k€
2005	1.508,8 k€	195,0 k€	0 k€	1.703,8 k€
Zwischensumme zweiten Förderperiode:				5.319,4 k€
2006	1.541,6 k€	348,5 k€	339,3 k€	2.229,4 k€
2007	1.541,6 k€	361,8 k€	193,0 k€	2.096,4 k€
2008	1.662,8 k€	221,2 k€	21,0 k€	1.905,0 k€
Zwischensumme dritten Förderperiode:				6.230,8 k€
2009	1.816,7 k€	379,0 k€	192,0 k€	2.387,7 k€
2010	1.794,7 k€	353,1 k€	0 k€	2.147,8 k€
2011	1.637,6 k€	305,0 k€	0 k€	1.942,6 k€
Zwischensumme vierten Förderperiode:				6.478,1 k€
Gesamtsumme:				21.457,0 k€

(Für die Darstellung der Gesamtsumme wurden DM in Euro umgerechnet)

2 Zentrale Ergebnisse des Sonderforschungsbereiches

2.1 Wissenschaftliche Entwicklung

Das wesentliche Ziel des Sonderforschungsbereichs 499 „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung mikrourgeformter Bauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“ war die Entwicklung einer durchgehenden Prozesskette zum Urformen von Mikrobauteilen auf der Basis von metallischen und keramischen Werkstoffen. Diesem Gedanken folgend war der Sonderforschungsbereich in die vier Projektbereiche „Entwicklung“, „Produktionsvorbereitung“, „Produktion“ und „Werkstoff- und Bauteilverhalten“ gegliedert (Bild 2.1).

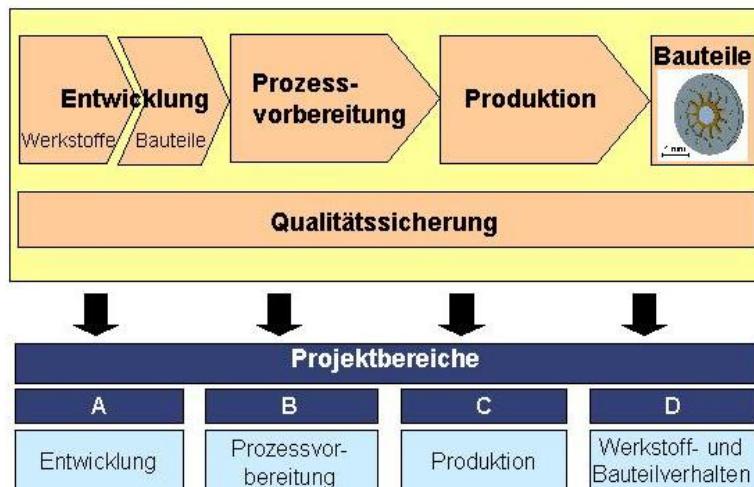


Bild 2.1: Struktur des SFB 499

Die Umsetzung des Forschungsprogramms gliederte sich in die vier Förderphasen des SFB, die aufeinander aufbauend Komponenten, System, Komplexität und schließlich Integration in den Fokus stellten. Bild 2.2 zeigt dies anhand der im SFB 499 betrachteten Demonstratoren der ersten drei Phasen: einer Mikroturbine, einem einstufigen Mikro-Planetengetriebe, einer Kombination dieser beiden und eines Mikro-Dispensers mit Förderschnecke. Dabei wurden neben der Komplexitätssteigerung die kontinuierliche Verkleinerung der Bauteile und Systeme angestrebt, wozu insbesondere auch eine Verbesserung der Detailtreue und der Oberflächengüte erforderlich war.

In der **Komponentenphase** (2000-2002) war das primäre Ziel, die einzelnen zur Durchführung des Produktentstehungsprozesses benötigten Methoden von der Bauteilauslegung über die Prozessvorbereitung und Fertigung bis hin zum fertigen Bauteil und dessen Charakterisierung zu beherrschen. Dafür wurden in den verschiedenen Teilbereichen entsprechende Verfahren und Apparaturen zur Fertigung und Analyse im Mikromaßstab aufgebaut. Geometrisch einfache Mikrobauteile aus ZrO_2 -Keramik und aus einer Au-Basis-Legierung Stabilor G® wurden mittels des Mikropulverspritzgießens bzw. des Mikrogießens hergestellt. Neben der Prozessentwicklung mit einer fertigungsgerechten Werkzeugherstellung und der eigentlichen Bauteilherstellung, bildete die Charakterisierung des mikrostrukturellen Werkstoffgefüges und der mechanischen Eigenschaften einen wesentlichen Schwerpunkt. Daraus konnten erste Zusammenhänge zwischen Eigenschaften von Bauteilen mit den Ausgangswerkstoffen und Prozessparametern abgeleitet werden.

In der **Systemphase** (2003-2005) wurden dann erste mikromechanische Systeme, aus wenigen Bauteilen bestehend, entwickelt und gefertigt. Dazu war es nötig, die Urformprozesse und deren Prozessvorbereitung hinsichtlich Maßhaltigkeit und Formtreue so zu ertüchtigen, dass die Integration mehrerer Bauteile in ein System erreicht werden konnte. Ein weiteres wesentliches Ergebnis dieser zweiten Phase war, dass das Werkstoffspektrum und somit auch die Möglichkeit, hoch belastbare mikromechanische Systeme auszulegen, erweitert wurden. Beleg für den Erfolg ist die teilprojektübergreifende Realisierung eines Mikro-Planetengetriebes aus sechs Mikrokomponenten. In dieser Phase wurde auch die Verkettung der Prozessschritte durch aufeinander abgestimmte Prozessregelungen und durch die Automatisierung einzelner Fertigungsschritte begonnen.

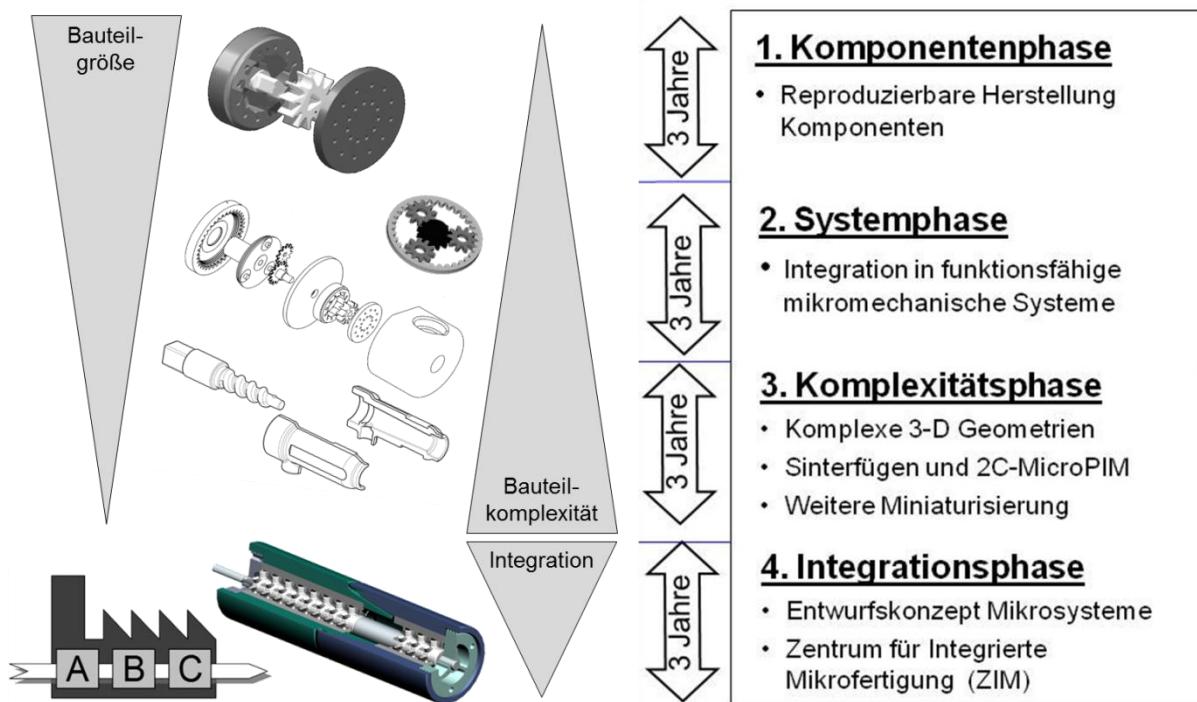


Bild 2.2: Projektphasen des SFB 499

Im Mittelpunkt der **Komplexitätsphase** (2006-2008) stand die Fertigungstechnik für weiter reduzierte Bauteilgrößen und insbesondere für dreidimensionale Bauteilgeometrien mit Freiformflächen und Hinterschnitten. Zu einer Demonstration und der Validierung der Ergebnisse wurde zusätzlich zu den bereits in den ersten beiden Phasen entwickelten einstufigen Mikroplanetenradgetrieben und der Mikroturbine eine Dispensereinheit mit einer Schneckenwelle realisiert. Gemeinsam mit der stetig erweiterten Materialpalette stellt die Fertigung dreidimensionaler Bauteilgeometrien ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal der urformenden Mikrofertigungsverfahren dar, da andere Fertigungsverfahren der Mikrotechnik in der Regel auf siliziumbasierte Systeme und zweidimensionale Geometrien beschränkt sind. Des Weiteren wurden die im Sonderforschungsbereich entwickelten Urformverfahren um das Zwei-Komponenten-Mikropulverspritzgießen und das Sinterfügen erweitert. Diese Verfahren ermöglichen die Herstellung von Bauteilen aus verschiedenen Materialien und/oder komplexer Geometrien, die ansonsten nur durch zusätzliche Montageprozesse erzielt werden könnten. Die Prozesskette wird durch Automatisierungstechniken und eine In-Prozess-Prüfung bzw. statistische Methoden zur Qualitätssicherung verbessert.

In der abschließenden Phase, der **Integrationsphase** (2009-2011), wurde die Durchgängigkeit der Prozesskette anhand eines neuen Demonstrators „Mikro-Gasturbine“ nachgewiesen sowie die besonderen Stärken der Mirkrourformprozesse aufgezeigt. Die in den ersten drei Phasen gewonnenen Erkenntnisse entlang des gesamten Produktentstehungsprozesses wurden genutzt und miteinander verknüpft. Alle entwickelten Werkzeuge und Methoden wurden in einem ganzheitlichen und optimierten Referenzprozess für das Urformen komplexer mikromechanischer Gesamtsysteme integriert. Im Mittelpunkt steht dabei die Bewertung der Miniaturisierung komplexer dreidimensionaler Bauteile, ihrer Toleranzen und Oberflächenqualität sowie der Robustheit des Designs in Bezug auf mögliche Anwendungen, was im Folgenden anhand der wesentlichen Ergebnisse aus den vier Projektbereichen erläutert wird.

Im **Projektbereich A „Entwicklung“** waren die wesentlichen Themen die Entwicklungsmethodik, die Modellierung des Verhaltens von Bauteilen und Systemen, die Simulation des Mikro-Urformens am Beispiel des Mikropulverspritzgießens und des Mikrogießens sowie die Entwicklung hochbelastbarer Werkstoffe für die Mikrotechnik. Ein wesentliches Ziel war dabei, ein Konzept für ein möglichst robustes Design mikromechanischer Komponenten zu entwickeln, das den notwendigerweise erhöhten Maß- und Formtoleranzen Rechnung trägt. In der letzten Förderphase des SFB wurde als neuer Demonstrator eine „Mikro-Gasturbine“ (Bild 2.3) entwickelt, anhand derer möglichst umfassend die entwickelten Verfahren und Methoden des SFB dargestellt werden sollten. So lassen sich vor allem in der Mikro-Gasturbine die im SFB bereitgestellte Werkstoffvielfalt und die entwickelten Verbindungstechniken sinnvoll nutzen. Die in einem realen System auftretenden hohen Betriebstemperaturen in der Brennkammer und im Turbinenteil sowie die mechanischen Belastungen der rotierenden Bauteile motivieren die Nutzung metallischer Guss- bzw. keramischer Spritzgusswerkstoffe. Eine zügige Entwicklung des Demonstrators war insbesondere durch die Nutzung der SFB-

spezifischen Datenbanken: „Strukturenkatalog“ (Z3), „Microfeaturekatalog“ (C4) und „Micro Book of Knowledge“ (MyBoK, A1) möglich. Wiederholte Parameterstudien der Bauteilgeometrien (insbesondere am Lauf- und Leitrad) führten in einem kontinuierlichen Abstimmungsprozess zur letztendlich konzipierten Mikro-Gasturbine. Diese besteht aus zwei rotationssymmetrischen Gehäuseteilen, die über einen Konus unter Nutzung des Sinterfügens (C3) miteinander verbunden werden. Die Lauf- und Leiträder aus ZrO_2 werden unter Nutzung des Mikro-Hochdruckspritzguss (C1), die Lagerschilde aus ZrO_2 durch den Niederdruckspritzguss (A3), die Polygonwellen aus Aluminiumbronze durch Mikroguss (C2) und die Gehäuseteile aus 17-4PH durch Mikro-Hochdruckspritzguss (Teilprojekt C3) hergestellt, wobei die freie Gestaltung in der Form in drei Dimensionen hervorzuheben ist.

Im Hinblick auf die speziellen Anforderungen zur Auslegung von Mikrobauteilen und -systemen galt es, die experimentellen Arbeiten zur Charakterisierung von Materialeigenschaften (überwiegend aus dem D-Bereich) und des Systemverhaltens durch numerische Analysen zu ergänzen. Generell wurde hierbei eine durchgängige, virtuelle Simulationskette angestrebt, wobei vor allem auch auf die Möglichkeit statistische Analysen durchzuführen wertgelegt wurde. Die Betrachtung erfolgte dabei auf zwei verschiedenen Ebenen: der Bauteil- und der Systemebene. Auf Bauteilebene wurde der Einfluss der Mikrostruktur der Werkstoffe untersucht, die wegen der geringen Abmessungen der Bauteile zu wesentlich größeren Streuungen als bei makroskopischen Bauteilen führen kann. Auf Systemebene wurden beispielsweise Kontaktkräfte ermittelt und der Einfluss von Geometrieabweichungen, wegen der zwangsläufig relativ großen Toleranzen, auf das Systemverhalten untersucht.

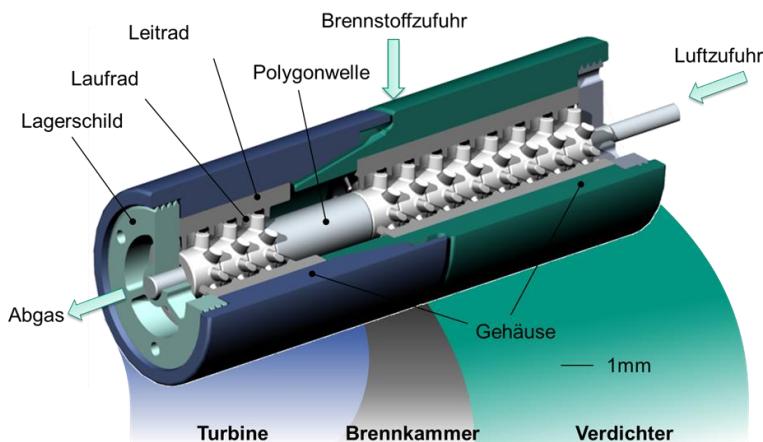


Bild 2.3: Demonstrator Mikro-Gasturbine der abschließenden Förderphase des SFB 499

Ein weiterer einschränkender Effekt für das Urformen im Mikrobereich betrifft die zentrale Fragestellung, welche Kavitäten sowohl beim Mikropulverspritzgießen mit pulverbefüllten Feedstocks als auch beim Mikroguss von Legierungen erfolgreich befüllt werden können. Mögliche Einschränkungen in der Formbarkeit haben natürlich wesentliche Rückwirkungen auf realisierbare Design-Vorschläge. Um diese Problematik möglichst umfassend zu adressieren, wurde neben den experimentellen Arbeiten auch die Simulation der Befüllung von Kavitäten mit Mikrodimensionen im Rahmen des SFB bearbeitet. Für das Mikropulverspritzgießen wurde ein Simulationstool erstellt, dessen Kapazität und Einsatzmöglichkeiten sukzessive erweitert wurden und zuletzt durch eine Benutzerschnittstelle einem breiten Kreis von fachkundigen Anwendern bereitgestellt werden konnte. Beim Mikroguss wurden weitere Simulationen zum zeitlichen Ablauf der Erstarzung der Legierung durchgeführt. Es ist besonders die Keimbildung und das Kornwachstum während des Gießprozesses von großem Interesse, da hiervon die Gefüge-Eigenschaftsbeziehung der Mikroteile abhängt.

In Bezug auf neue Werkstoffe für die Verwendung in der Mikrotechnik war die Entwicklung festigkeitsoptimierter keramischer Werkstoffe ein wesentlicher Schwerpunkt innerhalb des SFB, wobei vor allem höchstfeste ZrO_2 -Bauteile hergestellt werden konnten. Das konnte nur bedingt auf andere Werkstoffe übertragen werden. So wurden zwischen ZrO_2 und Si_3N_4 an Mikroproben signifikante Festigkeitsunterschiede beobachtet, die sich nach den vorliegenden Erkenntnissen zu einem wesentlichen Teil auf den Oberflächenzustand zurückführen lassen. Für *makroskopische* Bauteile, die standardmäßig eine abschließende Oberflächenbearbeitung erfahren, sind diese Aspekte weniger relevant; für *mikroskopische* Bauteile aber häufig von entscheidender Bedeutung. Dementsprechend kann die generelle Schlussfolgerung getroffen werden, dass Keramiken, die sich bei moderaten Temperaturen zu hohen Bauteildichten sintern lassen und dabei ein feinkörniges Gefüge ausbilden, also z.B. ZrO_2 , Al_2O_3 , besser für den Mikrobereich geeignet sind. Bei diesen

konnte ferner gezeigt werden, dass es möglich ist, vom Größeneffekt zu profitieren und Mikrobauteile mit hoher Festigkeit zu realisieren.

Der **Projektbereich B „Prozessvorbereitung“** stellt eine Vielzahl von Technologien zur Verfügung, die als Vorstufe für das Mikrourformen und damit für die Fertigung hochwertiger miniaturisierter Bauteile unabdingbar sind. Insbesondere ist die Primärstrukturierung von Formeinsätzen und Probekörpern durch Methoden der Feinstbearbeitung ein Forschungsschwerpunkt gewesen sowie die Entwicklung eigener Formmassen für das Mikropulverspritzgießen, insbesondere auf der Basis von wasserlöslichen Bindern.

Zur Herstellung der Formeinsätze wurden im SFB 499 Mikrofräsen, Mikroerodieren sowie Laserablation angewandt. Diese Methoden wurden erfolgreich miteinander kombiniert und hinsichtlich ihrer Robustheit, Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit systematisch gesteigert.

Da es sich bei der Bahnerosion um die flexibelste Prozessvariante der untersuchten Verfahren zur Mikrofunkenerosion handelt, wurde der Fokus der Untersuchungen für die letzte Förderphase hierauf gelegt. So wurde zum Ziel gesetzt, die Bearbeitungszeiten zu senken und die Prozesssicherheit bei der Herstellung von Kavitäten durch eine integrierte Messtechnik zu verbessern. Nachdem ein grundlegendes Prozessverständnis des Mikrobahnerodierens erlangt wurde, was den Einfluss der Prozessparameter auf den Elektrodenverschleiß, die Bearbeitungszeit und die Oberflächenrauheit bei der Bearbeitung von Stählen und anderen Materialien für Formeinsätze angeht, erfolgte eine Optimierung hinsichtlich der Bearbeitungszeit durch die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Anpassung der z-Zustellung.

Die Mikrolaserstrukturierung bietet auf Grund der feinen Strahlfokussierung auf Durchmesser von bis zu 5 µm ein hohes Potenzial zur Miniaturisierung und ermöglicht eine kontaktlose Mikrostrukturierung von einer Vielzahl von sehr harten und verschleißbeständigen Werkstoffen (Stähle, Hartmetalle und Keramiken), die sich als Formeinsatzmaterialien eignen. Da die Mikrobearbeitung mit Lasern im Vergleich zur Funkenerosion recht langsam ist, wurde die Kombination der Verfahren Erodieren und Laserstrukturieren vorangetrieben, da beide Technologien im Zusammenspiel unabhängig von den mechanischen Werkstückeigenschaften hohe Abtragraten erlauben und trotzdem geringste Abmessungen erzielbar sind. Erreicht wurden dabei eine Senkung der gesamten Bearbeitungszeiten sowie eine erhöhte Prozesszuverlässigkeit durch eine automatisierte objektive Laserfokuspositionierung auf der Oberfläche des Werkstücks. Des Weiteren wurde sichergestellt, dass die Laserablation immer in den engen Toleranzen des Prozessfensters liegt, um Schmelzaufwürfe und Defekte in den Strukturen zu vermeiden.

Die erzeugten Oberflächen der Formeinsätze sind neben dem verwendeten Material durch den Einfluss des Herstellverfahrens geprägt. Da die Oberflächengüte der Formeinsätze direkt die der Bauteile bestimmt, war die Oberflächennachbehandlung der Formeinsätze ein technologisch wichtiges Thema. So entstehen beim Mikrofräsen Grate an den Kanten der Strukturen sowie Frästiefen. Beim Mikroerodieren und der Laserablation bilden sich Reaktionsschichten und Schmelzablagerungen auf der Oberfläche. In Hinblick auf die Verwendung als Formeinsatz wirken sich diese Oberflächenbeschaffenheiten negativ auf die Formtreue sowie das Entformungs- oder Verschleißverhalten der Formeinsätze aus, was die Entwicklung nachträglicher Feinstbearbeitung zur Optimierung der Oberflächen erforderlich gemacht hat. Es konnte dabei gezeigt werden, dass die Verfahren Mikrostrahlen und Ultraschallnassstrahlen die Entgratung mikrogefräster Strukturen erlauben. Beim Mikrostrahlen treten allerdings gleichzeitig eine Erhöhung der Rauheit im Grund der Strukturen sowie eine Kantenverrundung auf. Vorteilhaft ist bei diesem Verfahren, dass die Reaktionsschichten am Grund der mikroerodierten Kavitäten entfernt werden können. Zudem werden durch das Mikrostrahlen unabhängig vom Ausgangszustand Druckeigenspannungszustände erzielt, die zu einer Verbesserung der Dauereigenschaften führen. Im Vergleich ist das Ultraschallnassstrahlen weniger aggressiv, so dass die Kantenverrundung geringer ist, aber auch keine Entfernung der Randschichten erreicht wird. Ein wesentlicher Nachteil bei diesem Verfahren ist ein Anstieg der Rauheit mit zunehmender Bearbeitungszeit für duktile Werkstoffe infolge direkter Kavitation. Des Weiteren wurde ein Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung der Formeinsätze entwickelt, das eine Entfernung von Graten mit minimaler Kantenverrundung erlaubt und eine Erhöhung der Oberflächenrauheit vermeidet. Zusammenfassend muss aber festgestellt werden, dass die mit den Feinstbearbeitungsverfahren erzielbare Oberflächenqualität der Formeinsätze stark von den Strukturierungsverfahren sowie der Wahl des Werkstoffes abhängig ist, so dass zwar die grundsätzlichen Beobachtungen wertvolle Hinweise für zukünftige Arbeiten geben, eine direkte Übertragung in der Regel aber schwierig ist.

Die Entwicklung eigener Formmassen für das Pulverspritzgießen hatte als zentrale Ziele, eine Verbesserung der Detailtreue im Mikrobereich und eine Reduzierung der Oberflächenrauigkeit zu erreichen, da letzteres insbesondere für die Festigkeit maßgeblich ist. Es konnte gezeigt werden, dass Formmassen mit Anteilen an nanoskaligen Pulvern, also einer bimodalen Partikelgrößeverteilung, hervorragende Fließeigenschaften aufweisen und im Spritzgießprozess zu gewünschten Geometrien verarbeitet werden können. Zudem zeigten diese bimodalen Systeme neben einem guten Sinterverhalten und einer vollständigen Verdichtung der Bau-

teile eine signifikante Reduzierung der Oberflächenrauheit um 50%. Zusätzlich wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, lokale Pulver-Binder-Separationen im Mikrobauteil mittels Computertomographie unter Zuhilfenahme von Synchrotron-Röntgenstrahlung zu analysieren. Die gewonnenen Erkenntnisse weisen darauf hin, dass sich entlang des Fließweges keine wesentlichen Entmischungsscheinungen ergaben, allerdings große Inhomogenitäten in der Partikeldichte auftreten können, was natürlich starke Auswirkungen auf das Sinterverhalten der Mikrobauteile hat. Um im Vergleich zu kommerziellen Formmassen eine umweltbewusste chemische Entfernung des Binders zu gewährleisten, wurden außerdem partiell wasserlösliche Bindersysteme betrachtet. Es wurde gezeigt, dass die Kombination aus PMMA/MMA (Polymethylmethacrylat/Methylmethacrylat)-Gemisch und wasserlöslichem PEG (Polyethylenglykol) eine vielversprechende Alternative zu dem etablierten Bindersystem auf Polyethylen-Wachs-Basis darstellt.

Im **Projektbereich C „Produktion“** stehen die Urformverfahren Mikropulverspritzgießen und Mikrogießen selbst im Mittelpunkt. Eine der wesentlichen Fragestellungen bei der Herstellung pulverspritzgegossener Mikrobauteile war dabei die stetige Verbesserung der Maß- und Geometrietreue, welche grundsätzlich die Miniaturisierung der Bauteile limitiert. Hierzu wurden für das Mikropulverspritzgießen grundlegende Untersuchungen mit einem neu entwickelten Werkzeugkonzept, welches eine gezielte Beeinflussung der Formfüll-, Verdichtungs- und Abkühlprozesse auch in der Kavität ermöglicht, durchgeführt und ggf. engere Toleranzen erreicht. Es hat sich aber auch gezeigt, dass die Erkenntnisse nicht ohne Weiteres verallgemeinert werden können, sondern je nach Form des Bauteils neu angepasst werden müssen. Außerdem wurden Entwicklungen und Erkenntnisse aus dem A- und B-Bereich aufgegriffen, um sie auch für eine Serienfertigung, wie sie im C-Bereich betrieben werden kann, zugänglich zu machen. Dazu gehört die Verwendung von wasserlöslichen Bindersystemen oder die Verbesserung mechanischer Kennwerte durch gezielte Gefügeeinstellung und Verbesserung der Oberflächenqualität durch Ausheilung.

Im Rahmen des SFB wurde auch der Mikroguss als Verfahren zur Herstellung komplexer Mikrobauteile aus metallischen Werkstoffen etabliert. In Zusammenarbeit mit den charakterisierenden Projekten des D-Bereichs wurden vor allem der Einfluss der Prozessparameter auf das entstehende Gefüge und die mechanischen Eigenschaften untersucht. Als wesentliches Ziel konnte eine deutliche Homogenisierung des Gefüges sowohl innerhalb eines Bauteils aber auch von Bauteil zu Bauteil innerhalb eines Abgusses erreicht werden. Darüber hinaus wurde in der letzten Projektphase die Leistungsfähigkeit des Mikrogusses durch zwei völlig neue Ansätze erweitert: Zum einen wurde das Verbundgießen als Methode zur Herstellung komplexer Mikrobauteile etabliert, bei der im Gießprozess ein Mikrobauteil durch Angießen direkt mit einem anderen vorgefertigten Mikrobauteil verbunden wird. Die hergestellten Kombinationen können komplexe Anforderungen an mechanische oder Funktionseigenschaften durch die gezielte Anwendung von Werkstoffverbunden erfüllen, wobei aufwändige Montageprozesse vermieden werden. Zum anderen war die Entwicklung und Herstellung von Dauerformen bzw. Gießkokillen für den Mikroguss ein wesentliches Ziel, um letztlich im Vergleich zum Mikrogießen mit verlorenen Formen kostengünstige Alternativen für die Großserie zu entwickeln.

Im Lauf der Jahre wurden diese Methoden um das Zwei-Komponenten-Mikropulverspritzgießen und das Sinterfügen erweitert, um komplexere Mikrokomponenten fertigen zu können. Für das Zweikomponenten-Pulverspritzgießen in Mikrodimensionen ergab sich dabei das Ziel, durch einen Urformprozess sowohl feste als auch bewegliche Verbindungen zweier unterschiedlicher Werkstoffe in einem einzigen Mikrobauteil reproduzierbar zu realisieren. Grundsätzliche Probleme, die dabei zu lösen waren, betreffen Entmischungen bei festen Verbindungen, Durchbruch beim Einspritzen der zweiten Formmasse, Hohlräumbildung beim Sintern und ungewolltes Zusammensintern bei losen Verbindungen. Zusammenfassend konnten die Arbeiten zum Zwei-Komponenten-Mikropulverspritzgießen eine Reihe material- und prozesstechnischer Fragen klären. Damit wurde die Basis geschaffen, um dieses als zuverlässiges Fertigungsverfahren insbesondere für die Herstellung beweglicher Verbindungen zur Verfügung zu stellen. Die einzelnen Fragestellungen erstreckten sich auf die Themenbereiche Werkzeugtechnik, Prozessentwicklung, Materialauswahl und –anpassung einschließlich der dazugehörenden Formmassenentwicklung.

Für das Sinterfügen wurden Fragen zur Handhabung, Spannung der Bauteile, Kalibrierung (z. B. durch Zerspanen, Pressen, Biegen, etc.) und Montage der Grünlinge nach dem Spritzgießprozess adressiert und insbesondere in Hinblick auf eine Automatisierung bearbeitet. Es hat sich herausgestellt, dass der Schlüssel zur Herstellung fertiger Baugruppen vor allem eine geeignete Prozessführung während des Entbinderns bzw. Sinterns ist. So konnte am Beispiel eines Ventilgehäuses gezeigt werden, dass mit dem Sinterfügen dichte Verbindungen mit Hilfe von Profilierungen erreicht werden. Insgesamt konnte zum Abschluss des SFB eine geschlossene, in weiten Teilen automatisierte Prozesskette für komplexe sintergefügte Baugruppen nachgewiesen werden.

Daneben wurden prozessverknüpfende Automatisierungs- und Prüftechniken sowie präventive und operative Qualitätssicherungsprozesse erarbeitet, um die Produktion von Mikrobauteilen in gleichbleibend hoher

Qualität zu gewährleisten. Die Qualitätssicherung betrachtet gleichermaßen das präventive Qualitätsmanagement und die operative Qualitätssicherung.

Im **Projektbereich D „Werkstoff- und Bauteilverhalten“** wurden Mikrobauteilzustände charakterisiert und mechanische Kennwerte sowie tribologische Eigenschaften von mikrourgeformten Werkstoffzuständen und Bauteilen sowie mikrostrukturierten Formeinsätzen ermittelt. Die dabei erzielten Ergebnisse wurden in Zusammenarbeit mit den abformenden Teilprojekten im Projektbereich C sowie dem mit der Qualitätssicherung befassten Teilprojekt in Prozess-Gefüge-Beziehungen zusammengefasst. Diese Eigenschaften wurden dem Verhalten bei mechanischer und tribologischer Beanspruchung gegenübergestellt. Dabei wurden exemplarisch mehrachsige Beanspruchungen, bruchmechanische Ansätze und Verschleißsimulationen mit der entsprechenden Lebensdauervorhersage in Mikrodimensionen betrachtet und die Erkenntnisse in Zusammenarbeit mit dem Projektbereich A in ein Dimensionierungskonzept für miniaturisierte Bauteile umgesetzt.

Die durchgeführten Arbeiten haben darauf abgezielt, die vielfältigen Ansätze und Methoden zu den Teilprozessen entlang der Prozesskette des Mikrourformens erstmalig in einer integrierten Art und Weise anzuwenden. Um die Nachhaltigkeit der Arbeiten des SFB zu gewährleisten wurde das **Zentrum für Integrierte Mikrofertigung (ZIM)** aufgebaut, das Kompetenzen und Best-Practice-Lösungen zusammenführt. Damit steht eine Einrichtung zur Verfügung, mit deren Hilfe die Ausführung von Entwicklungs- oder Fertigungsaufträgen fürurgeformte Mikrobauteile oder -systeme aus keramischen und metallischen Werkstoffen möglich ist. Hiermit steht nach Auslaufen der Förderung ein funktions- und leistungsfähiges Angebot für die Industrie, aber auch für die universitäre und außeruniversitäre Forschung langfristig zur Verfügung.

2.2 Interne Kooperation und Organisation

Zur Organisation der projektübergreifenden Zusammenarbeit im SFB wurden der Koordinatoren- und der Steuerkreis sowie fachbezogene Arbeitskreise eingerichtet. Der Austausch von Meinungen und Entscheidungsfindungen fanden auf der höchsten Ebene im Koordinatorenkreis statt. Diesem gehörten alle Teilprojektleiter sowie ausgewählte Wissenschaftler an und er wurde vom Sprecher des SFB geleitet. Im Koordinatorenkreis wurden insbesondere Entscheidungen zu Prioritätensetzung z.B. in Hinblick auf den Demonstrator, Fortsetzung oder Einstellung von Arbeiten oder Korrekturen am Arbeitsprogramm getroffen. Darüber hinaus wurden dort auch alle Entscheidungen zur Mittelvergabe getroffen. Das betraf insbesondere die Mittel für wissenschaftliche Hilfskräfte, Programmpauschale, Mittel für Gastwissenschaftler und andere zentrale Mittel. Insgesamt kann festgestellt werden, dass keine Mittel zwischen den Teilprojekten verschoben und die Ausgaben entsprechend der Anträge gestaltet wurden.

Der Steuerkreis, dem die Arbeitskreisleiter sowie ausgewählte Teilprojektleiter und Mitarbeiter angehörten und der durch den Geschäftsführer des SFB geleitet wurde, befasste sich hingegen mit der konkreten Organisation der Zusammenarbeit auf Arbeitsebene. Dazu gehörten Fragen wie Zeitplanung in Bezug auf die Fertigung von Formeinsätzen oder Mikrobauteilen.

Die wissenschaftliche Zusammenarbeit über Teilprojektgrenzen hinweg erfolgte neben bilateralen Kooperationen überwiegend in den Arbeitskreisen zu verschiedenen Themen. Die Arbeitskreisstruktur der letzten Förderphase ist in Bild 2.4 dargestellt. Es gab fünf Arbeitskreise, an denen Mitarbeiter von Teilprojekten der verschiedenen Projektbereiche beteiligt waren. Die konzentrierte Zusammenarbeit der beteiligten Teilprojektmitarbeiter in den Arbeitskreisen war sehr effektiv und erfolgreich. Die teilprojektübergreifende Zusammenarbeit hat auch das Zusammenwachsen des Sonderforschungsbereiches und somit auch den Wissenstransfer begünstigt. Dieser ist für den erfolgreichen Aufbau des Zentrums für Integrierte Mikroproduktion essentiell gewesen, dem ein Referenzmodell basierend auf der Demonstratorherstellung der dritten Förderphase zugrunde liegt. In Ergänzung zu den Arbeitskreisen fand ein wissenschaftlicher Austausch aller Mitglieder auf den Klausurtagungen statt. Die Doktoranden waren darüber hinaus im Integrierten Graduiertenkolleg vernetzt und konnten sich dort insbesondere auch zu überfachlichen Fragen austauschen (siehe Kapitel 6).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die Organisationsstruktur des SFB sehr bewährt hat, insbesondere die Trennung der Aufgaben des Koordinatoren- und Steuerkreises hat sich als erfolgreich herausgestellt, da auf der einen Seite effiziente Sitzungen gestaltet werden konnten, auf der anderen Seite aber auch in ausreichender Frequenz ein angemessener Austausch der Teilprojektleiter zu allen wichtigen Fragen des SFB ermöglicht wurde. Insbesondere die Zusammenarbeit hinsichtlich der Entwicklung und Fertigung des Demonstrators oder die Koordination der Untersuchungen an vielen Tausenden von Proben und Bauteilen wurde durch die erfolgreiche Arbeit des Steuerkreises ermöglicht.

Die durchgängig gute Zusammenarbeit zwischen allen beteiligten Wissenschaftlern hat sich natürlich auch auf die Mitglieder des SFB außerhalb der Universität Karlsruhe (TH) erstreckt. Dazu gehörte zu Beginn der Förderung das Institut für Materialforschung III des Forschungszentrums Karlsruhe. Im Lauf der Förderung

erfolgte dann der Zusammenschluss von Universität und Forschungszentrum zum KIT. Auch die Zusammenarbeit mit den Kollegen vom IMTEK der Universität Freiburg verlief absolut reibungslos, die Teilprojektleiter waren zu jeder Zeit in die genannten Strukturen des SFB eingebunden.

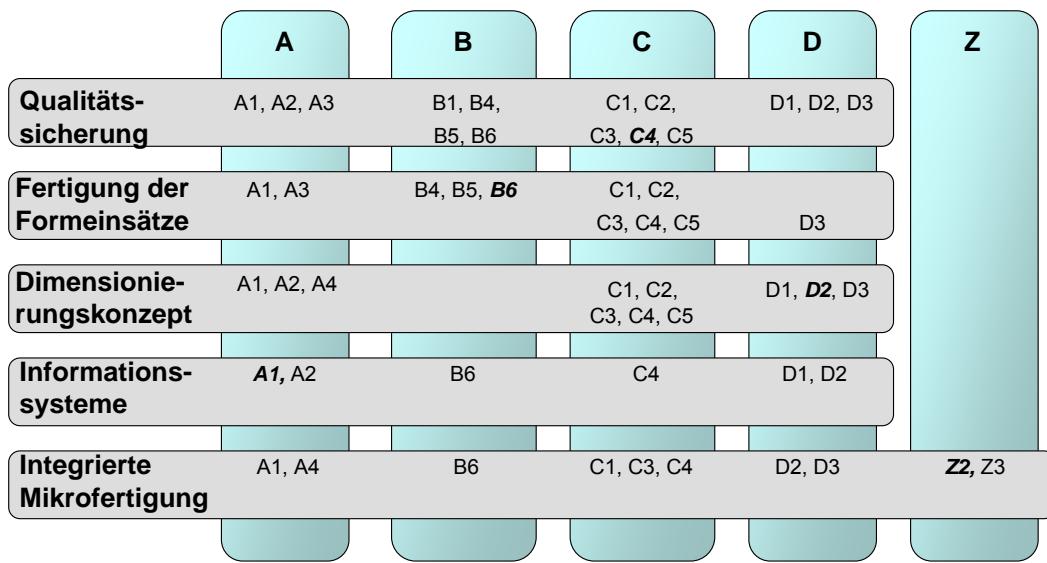


Bild 2.4: Arbeitskreisstruktur in der letzten Förderphase, die jeweils federführenden Teilprojekte sind fett gekennzeichnet.

2.3 Außenwirkung

Die Arbeiten des SFB wurden auf wissenschaftlichen nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt, dessen vollständige Aufzählung hier zu weit führen würde, exemplarisch sei hier nur der eingeladene Vortrag „Production and Characterization of Molded Micro-Parts made of Metals and Ceramics“ beim Fall Meeting der Materials Research Society (Boston, 2010) genannt, der gegen Ende der Laufzeit der internationalen Community einen Überblick zu den Ergebnissen des SFB gegeben hat.

Hervorzuheben ist die Vorstellung der Arbeiten auf den von uns organisierten Veranstaltungen für Interessierte aus Forschung und Industrie. Dazu zählen die SFB-Seminare, die von den Doktoranden an den Teilnehmerinstituten organisiert wurden. In der letzten Förderphase wurden folgende Seminare durchgeführt:

- Simulation in der Entwicklung von Mikrosystemen IPEK 23. November 2009
- Wissenstransfer und Kooperation zwischen Forschung und Industrie im Bereich der Prozesstechnik und Qualitätssicherung wbk 26.04.2010
- Charakterisierung der tribologischen und mechanischen Eigenschaften von Mikrobauteilen IAM-ZBS 25.10.2010
- Hochpräzise Fertigung von Mikrobauteilen, IAM-WPT, 11.04.2011

Einem breiteren Publikum wurden die Ergebnisse regelmäßig im Rahmen des Kolloquiums für Mikroproduktion vorgestellt. Auf dem Kolloquium stellten nicht nur der SFB 499 sondern auch die Sonderforschungsberichte 747, 516 und 440 und die Forschergruppe 702 ihre aktuellen Ergebnisse vor. Jeweils einer der Forschungsverbünde war für die Organisation verantwortlich. Das vierte Kolloquium Mikroproduktion vom 28.-29. Oktober 2009 fand in Bremen und das fünfte vom 11.-12. Oktober 2011 in Karlsruhe statt. Die Veranstaltung in Karlsruhe wurde vom SFB 499 organisiert und war auch gleichzeitig dessen Abschlusskolloquium. Die Kolloquien haben so guten Anklang bei den Teilnehmern gefunden, dass sie als neue Tagungsreihe fortgesetzt werden soll, obwohl mittlerweile die SFB 499, 516 und 440 ausgelaufen sind. Zurzeit beginnt die Planung für das nächste Kolloquium, das im Herbst 2013 in Braunschweig stattfinden wird.

Während der Förderdauer hat der Industriebegleitkreis die Entwicklung des SFB unterstützt. Er diente vor allem als Gesprächsplattform mit Kollegen aus der Industrie, um immer wieder wichtige Anregungen aus dem industriellen Umfeld aufnehmen zu können. Der intensive Austausch auch über die Probleme und Interessen der Industrie hat uns bei der Antragstellung inspiriert und häufig weitergeholfen. Insbesondere die Ideen für Projekte des Transferbereichs sind durch die intensiven Diskussionen im Begleitkreis entstanden.

Auch ist besonders hervorzuheben, dass zwei beteiligte Firmen, die im Begleitkreis aktiv waren, inzwischen enger untereinander kooperieren.

Informationen über den SFB und die Veranstaltungen konnten immer über die eingerichtete Webseite abgerufen werden. Der SFB ist Mitglied bei der IVAM e.V. Fachverband für Mikrotechnik. Dessen Mitgliederzeitschrift wurde zur Informationsverbreitung des Sonderforschungsbereiches und dessen Veranstaltungen genutzt. Teilnehmerinstitute des SFB wurden in der KIT-Zeitschrift R2B (Research-to-Business) vorgestellt. Diese Zeitschrift geht einem exklusiven Kreis von Kooperationspartner des KIT zu und dient zur Information und auch zur Anbahnung bilateraler Kooperationen.

Im Folgenden sind die wesentlichen Publikationen und Patente, die aus der Arbeit des Sonderforschungsbereichs hervorgegangen aufgelistet.

a) Ausgewählte begutachtete Veröffentlichungen

- [1] Albers, P. Börsting, T. Turki: Micro Gas Turbine Development: Design Improvements using Design Patterns. *Micro and Nanosystems*, 3 (3), 250-253 (2011)
- [2] Albers, H-G. Enkler, P. Leslabay: On the Simulation of Molded Micro Components and Systems, *Microsystem Technologies*, 14 (9-11), 1269-1277, 2008, DOI: 10.1007/s00542-007-0522-y
- [3] Albers, H-G. Enkler, P. Leslabay: Methods for Simulating and Optimizing Molded Micro Components and Systems. *Microsystem Technologies*, 16 (8-9), 1517-1527, 2010, DOI: 10.1007/s00542-010-1073-1
- [4] Albers, T. Deigendesch, T. Turki, T. Müller: Patterns for design in microtechnology. *Microsystem Technologies*, 16 (8-9), 1537-1545 (2010), DOI: 10.1007/s00542-010-1042-8
- [5] Albers, P. Börsting, T. Turki: Elicitation of a Reference Process Model for Tool-Based Micro Technologies for Planning & Controlling Purposes and User Support. *Microsystem Technologies* 17 (2), 319-324 (2011), DOI: 10.1007/s00542-011-1254-6
- [6] W. Bauer, R. Knitter: Development of a Rapid Prototyping Process Chain for the Production of Ceramic Microcomponents. *J. Mat. Sci.*, 37, 3127-3140 (2002).
- [7] W. Bauer, M. Müller, R. Knitter, P. Börsting, A. Albers, M. Deuchert, V. Schulze: Design and prototyping of a ceramic micro turbine: a case study. *Microsystem Technologies*, 16 (4), 607-615 (2010), DOI: 10.1007/s00542-009-0974-3
- [8] G.Baumeister, B.Okolo, J.Rögner: Microcasting of Al bronze: influence of casting parameters on the microstructure and the mechanical properties. *Microsystem Technologies*, 14 (9-11), 1647-1655 (2008), DOI: 10.1007/s00542-008-0605-4
- [9] G. Baumeister, D. Buqezi-Ahmeti, J. Glaser, H.-J. Ritzhaupt-Kleissl: New approaches in microcasting: permanent mold casting and composite casting. *Microsystem Technologies*, 17 (2), 289-300 (2011), DOI: 10.1007/s00542-011-1237-7
- [10] C. Eberl, H. Riesch-Oppermann, R. Spolenak, F. Kubat, W. Ruile, D. Courty, O. Kraft: In situ observations and quantitative analysis of short circuit probability due to ultra high frequency fatigue. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* 10 (3), 366 (2010), DOI: 10.1109/TDMR.2010.2047945
- [11] J. Fleischer, K. Klimscha, Development of an Innovative Tension Test Process for the Investigation of Sinter Joined Connections. *Euro PM2011*, 09.-12.10.2011, Barcelona, Spanien, Verlag European Powder Metallurgy Association, Herausgeber/Veranstalter European Powder Metallurgy Association, Band Volume 2, *Euro PM2011 Proceedings*, Shrewsbury, ISBN 978-1-899072-23-1, S. 177 – 182
- [12] DS. Gianola, C. Eberl: Micro- and nanoscale tensile testing of materials. *JOM*, 61 (3), 24 (2011), DOI: 10.1007/s11837-009-0037-3
- [13] Greiner, D. Kauzlaric, JG. Korvink, R. Heldele, M. Schulz, V. Piotter, T. Hanemann, O. Weber, J. Haußelt: Simulation of micro powder injection moulding: powder segregation and yield stress effects during form filling. *J. Eur. Ceram. Soc.* 31(14), 2525-2534 (2011), DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.02.008
- [14] T. Hanemann, R. Heldele, T. Mueller, J. Haußelt: Influence of stearic acid concentration on the processing of ZrO₂-containing feedstocks suitable for micro powder injection molding. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 8(4), 865-872 (2011), DOI: 10.1111/j.1744-7402.2010.02519.x

- [15] T. Hanemann, K. Honnef, T. Mueller, O. Weber: New methacrylate-based feedstock systems for micro powder injection moulding. *Microsystem Technologies*, 17 (3), 451-457 (2011), DOI: 10.1007/s00542-011-1243-9
- [16] Kasanická, B. Okolo, G. Baumeister, M. Auhorn, T. Beck, A. Wanner, J. Hausselt, D. Löhe, V. Schulze: On the relationship between microcasting process, material states and mechanical properties in the gold alloy Stabilor® G. *Materials Science and Engineering A*, 501 (1-2), 70-80 (2009), DOI: 10.1016/j.msea.2008.09.070
- [17] Kauzlaric, A. Greiner, JG. Korvink: A non-local extension of the Phillips model for shear induced particle migration, *Microsyst Technol*, 2011; 17 (2): 265-272, DOI: 10.1007/s00542-011-1280-4
- [18] Kauzlaric, L. Pastewka, H. Meyer, R. Heldele, M. Schulz, O. Weber, V. Piotter, J. Hausselt, A. Greiner, J-G. Korvink: Smoothed particle hydrodynamics simulation of shear-induced powder migration in injection moulding. *Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.*, 369 (1944), 2320-2328 (2011), DOI:10.1098/rsta.2011.0043
- [19] Kienzler, B. Okolo, V. Schulze, A. Wanner, D. Löhe: A reliable tool for the improvement of micro powder injection moulds made of steel; *Advanced Engineering Materials* (2008), 10 (7), 661 – 665 (2008), DOI: 10.1002/adem.200800059
- [20] Kienzler, J. Schneider, V. Schulze, K.-H. Zum Gahr, D. Loehe: Oberflächennachbearbeitung von Formeinsätzen für das Mikropulverspritzgießen. *HTM J. Heat Treatm. Mat.*, 63, 207-212 (2008).
- [21] S. Kurzenhäuser, V. Hegadekatte, J. Schneider, N. Huber, O. Kraft, K.-H. Zum Gahr: Tribological characterization and numerical wear simulation of microcomponents under sliding and rolling conditions. *Microsystem Technologies*, 14 (12), 1839-1846 (2008), DOI: 10.1007/s00542-008-0696-y.
- [22] G. Lanza, K. Kippenbrock, G. Kuhn: Process Capability Indices for the Evaluation of Micro-Manufacturing Processes. 7th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 23 - 25 June 2010, Capri, Italy, Band , Conference Proceedings, ISBN 978-88-95028-65-1, S.1-4
- [23] G. Lanza, A. Albers, K. Kippenbrock, P. Börsting: Support for Micro-Tolerancing through the Feedback of Existing Quality-Related Data to Product Developers. 11th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, 23rd May to 27th May 2011, Como, Italy, Verlag Sieca Repro, Herausgeber/Veranstalter European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, Band , Conference Proceedings Volume 2, Delft, Netherlands, ISBN 978-0-9553082-9-1, S. 542-545
- [24] M. Müller, J. Rögner, B. Okolo, W. Bauer, R. Knitter: Processing of microcomponents made of sintered reaction-bonded silicon nitride SRBSN. Part 2: Sintering behaviour and micro-mechanical properties. *Ceramics International*, 36 (2), 707-717 (2010), DOI: 10.1016/j.ceramint.2009.11.008
- [25] C. Munzinger, A.-M. Dieckmann, M. Deuchert, K. Klimscha, U. Leberle: Researchon the machining of green feedstock material for sinter joining. *Euspen International Conference - Delft - June 2010*, 31.05.-04.06.2010, Delft, Niederlande, Verlag Sieca Repro, Herausgeber/Veranstalter oEuspen, Band 2, conference proceedings, Delft, ISBN 978-0-9553082-8-4, S. 99-102 (2010)
- [26] J. Rögner, K.-H. Lang, G. Baumeister, V. Schulze.: Microstructure and mechanical properties of micro tensile specimens made of CuAl10Ni5Fe4 produced by micro casting, *Microsyst Technol*, 17 (2), (2011) S. 301–311, DOI 10.1007/s00542-011-1234-x
- [27] A. Ruh, V. Piotter, K. Plewa, HJ. Ritzhaupt-Kleissl, J. Hausselt: Development of Two-Component Micropowder Injection Molding (2C-MicroPIM)-Process, *International Journal Of Applied Ceramic Technology*, 8 (3), 610-616 (2011), DOI: 10.1111/j.1744-7402.2009.02468.x
- [28] A. Ruh, V. Piotter, K. Plewa, HJ. Ritzhaupt-Kleissl, J. Hausselt: Effects of material improvement and injection moulding tool design on the movability of sintered two-component micro parts, *Microsystem Technologies-Micro-And Nanosystems-Information Storage And Processing Systems*, 16(11), 1989-1994 (2010), DOI: 10.1007/s00542-010-1128-3
- [29] A. Ruh, V. Piotter, K. Plewa, HJ. Ritzhaupt-Kleissl, J. Hausselt: Influence and limits of sintering temperatures on the movability of shaft-to-collar connections formed by two-component micro powder injection moulding, *Microsystem Technologies*, 17 (9), 1541-1546 (2011), DOI: 10.1007/s00542-011-1324-9

- [30] Ruh, K. Klimscha, V. Piotter, K. Plewa, H-J. Ritzhaupt-Kleissl, J. Fleischer: The development of two-component micro powder injection moulding and sinter joining. *Microsystem Technologies*, 17 (10), 1547-1556 (2011), DOI: 10.1007/s00542-011-1326-7
 - [31] M. Schlipf, S. Bathurst, K. Kippenbrock, S-G. Kim, G. Lanza: A structured approach to integrate MEMS and Precision Engineering methods.in: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 3 (3), 236-247 (2011), DOI: 10.1016/j.cirpj.2010.12.002
 - [32] J. Schneider, T. Polzer, K.-H. Zum Gahr: Influence of load and surface condition on the tribological performance of zirconia for applications in high-performance microsystems. *Proc. 4M 2010 Conference*, B. Fillon, C. Khan-Malek, S. Dimov (eds.), Research Publishing, Singapore, (2010), 239-242
 - [33] J. Schneider, A. Kienzler, V. Schulze: Influence of surface condition on wear behavior of IPIM mould inserts made of tool steel and cemented carbide. *Microsystem Technologie*, 17 (2), 273-280 (2011), DOI: 10.1007/s00542-011-1238-6
 - [34] V. Schulze, P. Weber, M. Deuchert, S. Haupt, C. Ruhs, A. Kienzler: Limits and challenges of manufacturing micro moulds. *International Journal of Nanomanufacturing*, 6 (1/2/3/4), 176 – 189 (2010), DOI: 10.1504/IJNM.2010.034782
 - [35] V. Schulze, P. Weber, C. Ruhs.: Optical and acoustical process control in hybrid micromachining using a picosecond pulsed UV-laser and micro EDM-milling. *4M 2011*, 8-10 November 2011, Stuttgart, Germany, Verlag Research Publishing, Herausgeber/Veranstalter 4M Association, Band , Proceedings of the 8th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture, ISBN 978-981-07-0319-6, S. 83 – 86
 - [36] V. Schulze, P. Weber: Acoustical focal positioning for micromachining using a picosecond pulsed UV-Laser, *ICALEO 2011*, 23-27 October, 2011, Orlando, USA, Band , *ICALEO 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro Optics Congress Proceedings*, ISBN 978-0-912035-94-9, S. 966 – 971
 - [37] V. Schulze, C. Ruhs: On-machine measurement for the micro-EDM-milling process using a confocal white-light sensor, *10th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology*, 31st May to 4th June 2010, Delft, Netherlands, Band , Conference Proceedings, volume 2, S. 37-40, 2010
 - [38] V. Schulze, P. Weber, C. Ruhs: Increase of process reliability in the micro-machining processes EDM-milling and laser ablation using on-machine sensors. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.09.014, in press
 - [39] V. Schulze, P. Weber: Precise ablation milling with ultra short pulsed Nd:YAG lasers by optical and acoustical process control. *SPIE Photonics West 2010 - LASE*, 23.01. - 28.01.2010, San Francisco, USA, Proceedings of SPIE Vol. 758575850J-1, document 7585-18
 - [40] R. Weingaertner, A. Kienzler, J. Hoffmeister, V. Schulze: Effects of fluid condition and material on surface damage in ultrasonic wet peening, *Shot Peening 2011 Conference Proceedings*, 12. - 15.09.2011, South Bend
- b) andere Veröffentlichungen
- keine
- c) Patente, gegliedert nach angemeldet und erteilt.
- [1] Hanemann, T., Zeep, B.: Verfahren zur Beschichtung von Pulvern, Deutsche Patentanmeldung 102006011309.8, Anmeldetag: 11.03.2006.
 - [2] Europäische Patentanmeldung 06 791 647.8-2122: „Verfahren zur Herstellung eines Gegenstandes aus mindestens einem selbständigen beweglichen Teil und einem Fixierteil“; Erfinder: Guido Finnah, Jürgen Haußelt, Klaus Plewa, Volker Piotter, Steffen Rath, Robert Ruprecht.

In der nachfolgenden Tabelle 2.1 ist dargestellt, wie groß der Anteil der zur Verfügung stehenden Pauschalen Mittel für Publikationen, Gäste, Reisen und Öffentlichkeitsarbeit an den insgesamt zentral verwalteten Mit-teln war.

Tabelle 2.1: Pauschale Mittel für Publikationen, Gäste, Reisen und Öffentlichkeitsarbeit

Haushalts-jahr	Publika-tionen	Gäste	Reisen	Öffent-lich-keitsarbeit (Kolloquien, etc.)	Summe	Zentrale Mittel (exklusive Personal)
2000	0 kDM	30,0 kDM	39,0 kDM	0 kDM	69,0 kDM	87,0 kDM
2001	0 kDM	50,0 kDM	39,0 kDM	7,0 kDM	96,0 kDM	102 kDM
2002	0 kDM	50,0 kDM	39,0 kDM	7,0 kDM	96,0 kDM	108,9 kDM
Zwischensumme erste Förderperiode:					261,0 kDM	297,9 kDM
2003	0 k€	35,0 k€	25,5 k€	2,0 k€	62,5 k€	67,5 k€
2004	0 k€	35,0 k€	27,5 k€	4,0 k€	66,5 k€	71,5 k€
2005	0 k€	35,0 k€	28,5 k€	4,0 k€	67,5 k€	76,5 k€
Zwischensumme zweiten Förderperiode:					195,5 k€	215,5 k€
2006	0 k€	25,0 k€	36,0 k€	3,5 k€	64,5 k€	67,5 k€
2007	0 k€	25,0 k€	36,0 k€	9,0 k€	70,0 k€	73,0 k€
2008	0 k€	25,0 k€	36,0 k€	3,5 k€	64,5 k€	67,5 k€
Zwischensumme dritten Förderperiode: 53,5					204,5 k€	208 k€
2009	12,0 k€	25,0 k€	53,5 k€	12,0 k€	90,5 k€	135,5 k€
2010	12,0 k€	25,0 k€	53,5 k€	12,0 k€	90,5 k€	135,5 k€
2011	12,0 k€	25,0 k€	53,5 k€	12,0 k€	90,5 k€	135,5 k€
Zwischensumme vierten Förderperiode:					271,5 k€	406,5 k€
Gesamtsumme:					802,3 k€	979,3 k€

(Für die Darstellung der Gesamtsumme wurden DM in Euro umgerechnet)

3 Strukturwirkung des Sonderforschungsbereiches am Standort

3.1 Personelle Auswirkung

In der Laufzeit des SFB haben eine Vielzahl von Veränderungen und Berufungen an der Universität Karlsruhe (TH), dem Forschungszentrum Karlsruhe bzw. dann dem des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) stattgefunden, deren wichtigste, geordnet nach den beteiligten Instituten, im Folgenden zusammengefasst sind:

- Am Institut für Produktionstechnik (früher Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik) (wbk) sind die Professoren Weule, Spath und Schmidt ausgeschieden bzw. in den Ruhestand gegangen. Alle Stellen wurden nachbesetzt oder in neuer Konstellation als Professuren eingerichtet worden. Insbesondere wurde Prof. Fleischer als direkter Nachfolger von Prof. Weule berufen. Prof. Schulze wurde auf eine Professur für Fertigungstechnologie berufen, die zwischen dem wbk und dem Institut für Werkstoffkunde (jetzt IAM-WK) angesiedelt ist. Frau Prof. Lanza war Inhaberin der ersten Shared Professorship am KIT zum Thema "Global Production Engineering and Quality" in Kooperation mit der Daimler AG und wurde in 2011 auf eine W3-Professur für Produktionssysteme und Qualitätsmanagement am wbk berufen.
- Vom Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde (früher Institut für Werkstoffkunde I) wechselte Prof. Löhe als hauptamtliches Mitglied in das Präsidium des KIT. Dr. Beck wurde an die RWTH Aachen und das Forschungszentrum Jülich berufen und Dr. Kerscher an die Universität Kaiserslautern. Die grundfinanzierten Stellen der wissenschaftlichen Mitarbeiter wurden erhalten und neu besetzt, wobei die neu angestellten Mitarbeiter keine Verantwortung im SFB übernommen haben. Vielmehr konnte Prof. Wanner, der in 2004 berufen wurde, als Teilprojektleiter für den SFB gewonnen werden. Es wurde auch ein Nachfolger für Prof. Löhe berufen, der sich aber zeitlich bedingt nicht mehr am SFB beteiligen konnte.
- Im Jahr 2002 wurde Prof. Kraft an das Institut für Zuverlässigkeit von Bauteilen und Systemen berufen (jetzt IAM-ZBS) und hat erfolgreich gemeinsam mit Dr. Huber (vom damaligen Institut für Materialforschung II des FZK) einen Nachantrag für das Teilprojekt D4 gestellt. Nachdem Herr Dr. Huber an die TU Hamburg-Harburg und das Helmholtz-Zentrum Geesthacht berufen wurde, wurde das Projekt mit Auslaufen der 3. Förderperiode nicht fortgesetzt.
- Mit dem altersbedingten Ausscheiden von Prof. Zum Gahr wurde das Institut für Werkstoffkunde II geschlossen, die Stelle im Bereich der Werkstoffkunde allerdings nachbesetzt. Auch hier hat sich der Nachfolger zeitlich bedingt nicht mehr am SFB beteiligt.
- Am IAM-ZBS wurde eine eigenständige Nachwuchsgruppe mit Dr. C. Eberl als Leiter etabliert. Es war vorgesehen, Dr. Eberl nach Ablauf der Förderung zeitlich unbefristet zu übernehmen und seine Arbeiten nachhaltig in die Helmholtz-Programmforschung zu integrieren. Dr. Eberl hat das entsprechende Angebot nicht angenommen und stellt sich neuen Herausforderungen am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik in Freiburg.

Über die Gesamtlaufzeit des SFB hat sich die Anzahl der Teilprojekte erhöht, dazu wurden fünf Transferprojekte sowie eine Nachwuchsgruppe eingerichtet. Auch die Anzahl der partizipierenden Lehrstühle und Institute hat sich über die Laufzeit erhöht. Der Projektbereich A wurde durch das Teilprojekt A4 in der zweiten Förderperiode erweitert, das am IMTEK der Universität Freiburg bearbeitet wurde. Dementsprechend kann also festgestellt werden, dass sich in diesem Maße auch die eingesetzte Grundausstattung erhöht hat. Das gilt insbesondere für die Ausstattung des außeruniversitären Instituts, bei dem mit Mitteln der Helmholtz-Gemeinschaft der SFB nachhaltig unterstützt wurde. In der Förderdauer des SFB wurde die Mikrotechnik in breitem Umfang an der Fakultät für Maschinenbau ausgebaut und an Instituten wie dem wbk, IPEK oder IAM-WK als neues Arbeitsthema etabliert.

Die Gleichstellung wurde durch verschiedenste Angebote gefördert. Es muss allerdings festgestellt werden, dass aufgrund der allgemeinen Situation im Ingenieursbereich nur ein relativ gering Anteil an Frauen, sei es als Teilprojektleiterinnen oder Mitarbeiterinnen, im SFB tätig war. Dementsprechend wurden die Angebote nur von wenigen Frauen in Anspruch genommen, insbesondere solche zur Vereinbarkeit von Familie und Beruf waren gering nachgefragt. Es wurden jedoch die Seminarreihe der KIT Personalentwicklung „Frauen in Führungspositionen“ sowie die Seminare „Erfolgreiche Verhandlungsführung“, „Selbstmarketing für Wissenschaftlerinnen“, „Sitzungen und Besprechungen leiten, moderieren und gestalten“ besucht. Auch wurden ein Englischkurs und ein Coaching finanziert.

Die folgende Tabelle 3.1 gibt einen Überblick zur akademischen Weiterqualifikation der Mitglieder des SFB. Hervorzuheben ist die relativ große Zahl an Berufungen in der zweiten Hälfte der Förderung, was auch einen

Hinweis auf die Leistungsstärke des SFB gibt. Die Promovierenden waren als Bearbeiter der Teilprojekte natürlich in die wissenschaftliche Arbeit des SFB voll eingebunden. Darüber hinaus haben sie je nach Erfahrungsgrad aber auch organisatorische Aufgaben, z.B. bei der Organisation der Arbeitskreise und der Seminare des SFB übernommen sowie Veranstaltungen im Graduiertenkolleg organisiert (siehe Kapitel 2 und 6).

Tabelle 3.1: Überblick zur akademischen Weiterqualifikation

	Anzahl 1.FP		Anzahl 2.FP		Anzahl 3.FP		Anzahl 4.FP		Anzahl noch nicht abgeschlossen	
	w	m	w	m	w	m	w	m	W	m
Promotionen	0	0	2	5	1	11	2	12	6	9
Habilitationen										
Berufungen von Nachwuchswissenschaftlern auf Professuren nach C3, C4, W2 oder W3				1	2	3				

3.2 Infrastruktur

Die Veränderungen der Forschungseinrichtungen und der Institute wurden in Kapitel 1.1 ausführlich beschrieben. Insbesondere fiel der Zusammenschluss von Universität und Forschungszentrum zum KIT in die Laufzeit des SFB. Es kann dabei ohne Zweifel festgestellt werden, dass der SFB 499 und die Mikrotechnik eine Vorreiterrolle gespielt hat. Das spiegelt sich auch in der Tatsache wieder, dass das KIT-Zentrum NanoMikro als eines der ersten im KIT gegründet wurde. KIT-Zentren zeichnen sich durch ein Alleinstellungsmerkmal im wissenschaftlichen Ansatz, in der strategischen Zielsetzung sowie Aufgabenstellung und eine langfristige Perspektive aus. Sie stellen die größten organisatorischen Einheiten im KIT dar. Das KIT-Zentrum NanoMikro, das insbesondere das DFG-Exzellenzcluster Funktionale Nanostrukturen, aber eben auch den SFB 499 beinhaltet, erarbeitet durch Grundlagenforschung eine umfassende Wissensbasis in der Nanotechnologie und Mikrosystemtechnik. Darauf aufbauend schlägt es eine Brücke zur technologischen Umsetzung bis hin zu marktfähigen Produkten, auch durch den Aufbau einer technologischen Infrastruktur, die die Arbeiten interner und externer Nutzer unterstützt. Auch der Zusammenschluss von sechs werkstofforientierten Instituten zum Institut für Angewandte Materialien (IAM) wurde durch die gute Zusammenarbeit im SFB 499 (und auch im SFB 483) befördert.

Um die Nachhaltigkeit der Arbeiten des SFB zu gewährleisten wurde das **Zentrum für Integrierte Mikrofertigung (ZIM)** aufgebaut. Dazu wurde das ZIM einerseits durch eine entsprechende Aufbauorganisation (Bild 3.1) im KIT verankert, andererseits wurde als zentrales Werkzeug und Hilfsmittel zur Durchführung von Projekten das Referenzprozessmodell „Mikrourformen“ erstellt. Für die Aufbauorganisation wurde der Ansatz des Core-Team-Managements gewählt, da es dadurch möglich ist, die zur Durchführung eines Produktentstehungsprozesses benötigten Kompetenzen projektspezifisch einzubinden. Die im ZIM definierten Kompetenzen entsprechen den ehemaligen Teilprojekten des SFB 499. Sobald Projekte durch Anfragen von außen im Bereich der urformenden Mikro-Produktion angebahnt werden, tritt das „Zentrale Kompetenzteam“ zusammen, um über die Projektanfrage zu beraten und gegebenenfalls ein Angebot an den Kunden abzugeben. Des Weiteren wurde eine Homepage eingerichtet (www.zim.kit.edu), die sich aus einem öffentlichen sowie einem internen Bereich zusammensetzt. Der öffentliche Bereich bietet allgemeine Informationen zum ZIM, einen Überblick über das Technologieportfolio sowie Hinweise zu Kontaktaufnahme und Projektanfrage. Dieser Bereich richtet sich insbesondere an potentielle Projektpartner aus Industrie und Forschung. Durch das ZIM stehen natürlich auch die im Rahmen des SFB aufgebauten Forschungseinrichtungen und Apparaturen nachhaltig zur Verfügung, auch wenn diese nur zum kleineren Teil durch den SFB finanziert wurden. Dazu gehören ein Mikrozahnradprüfstand, um die technologischen, geometrischen und belastungsbegrenzenden Eigenschaften von Mikrogetrieben real validieren zu können. Da schon kleinste Schmutzpartikel und Temperaturschwankungen die Prüfung von Mikrosystemen messbar beeinflussen, wurde am IPEK - Institut für Produktentwicklung eigens für diese Prüfungen ein Reinraumlabor eingerichtet. Des Weiteren wurden am wbk bzw. am IAM-WPT Erodiermaschinen, Laserzentrum, Mikrofräsmaschine, Spritzgießmaschinen und Koordinatenmessmaschine sowie Thermoprozessanlagen (Sinterofen) aufgebaut und in Betrieb genommen.

Das Innovationscluster μ -now! verbindet die Säulen Innovation und Forschung des KIT und dient ebenso der internen Verknüpfung und dem Erfahrungsaustausch sowie der Außendarstellung der Mikroaktivitäten am KIT und der Akquise.

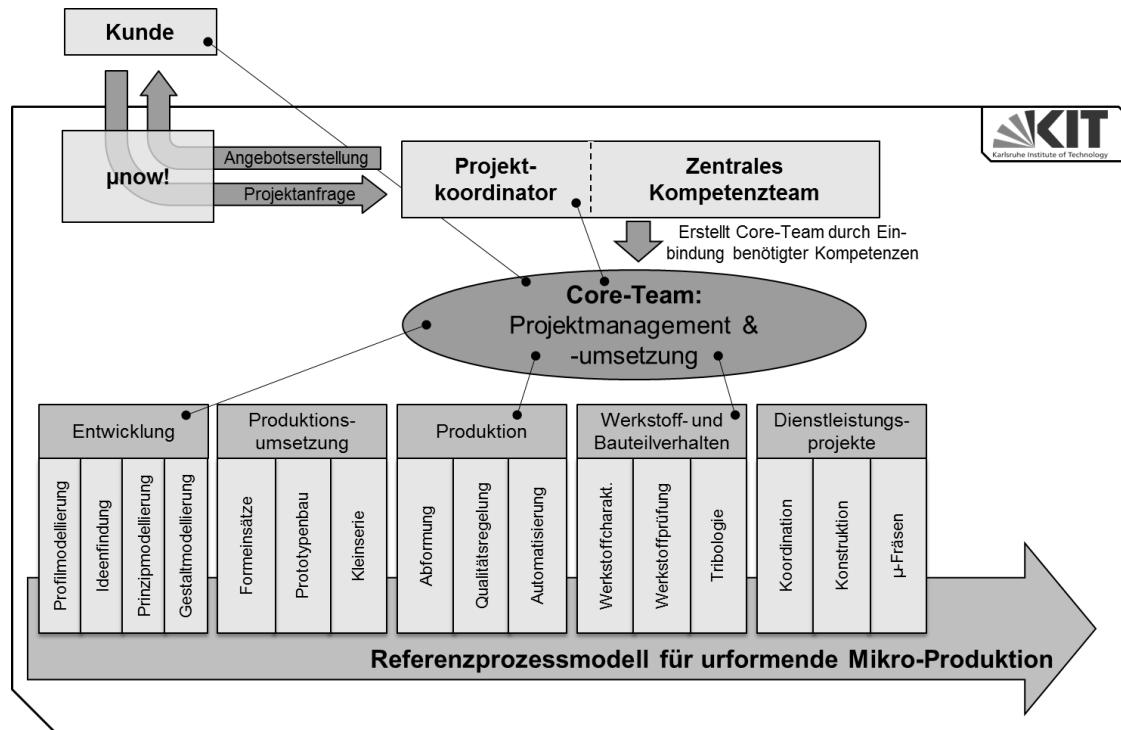


Bild 3.1: Struktur des Zentrums für integrierte Mikrofertigung

4 Hinweise an die Deutsche Forschungsgemeinschaft

Ein für uns erwähnenswerter Punkt sind die Gleichstellungsmaßnahmen, die durch die an sich großzügig durch die DFG zur Verfügung gestellten Mittel gefördert werden können. Der SFB hatte verglichen zum Frauenanteil unter den Studierenden im Maschinenbau einen recht hohen Frauenanteil vor allem im Bereich der Teilprojektmitarbeiter, aber insgesamt sind es immer noch sehr wenig Frauen und somit auch wenige potentielle Förderpersonen. Ein Teil der Frauen hat über das integrierte Graduiertenkolleg Weiterbildungen besucht oder auch andere Angebote des KIT genutzt. Somit schränkt sich der potentielle Nutzerkreis weiter ein und es ist nicht einfach möglich die Förderung einem breiten Kreis von Personen zukommen zu lassen. Es sollte deshalb überlegt werden, ob die Verwendung der Mittel nicht weiter flexibilisiert werden kann, in dem nicht nur ausschließlich weibliche Mitglieder des SFB gefördert werden sondern auch gemischte Gruppen. Damit sind sowohl nach Geschlecht gemischte Gruppen mit Mitgliedern des SFB gemeint als auch gemischt mit anderen Mitarbeiterinnen der Forschungseinrichtung. Beides würde das wichtige Thema der Gleichstellung in einen breiteren Kontext stellen.

Des Weiteren wäre zur Vereinbarkeit von Beruf und Familie eine Flexibilisierung des Einsatzes der Fördermittel wünschenswert, z.B. in Hinblick auf die Mitfinanzierung von Kindertagesstätten. Hier war eine zentrale Vergabe der Gelder über das KIT nicht möglich. Grundsätzlich besteht aber das Problem, dass zur Gewinnung von Frauen für eine akademische Karriere bzw. zur konkreten Anwerbung von Frauen für eine Stelle in einem SFB entsprechende Angebote vorher sichtbar bestehen müssen. Währenddessen werden Mittel aus dem SFB eher rückwärtsgewandt zur Unterstützung von Mitgliedern des SFB eingesetzt. Dementsprechend wäre es wünschenswert, dass DFG-Mittel frei an die Träger von Kindertagesstätten an den Forschungseinrichtungen vergeben werden können, mit der Vereinbarung dass im Falle eines entsprechenden Bedarfs die Kinder von SFB-Mitarbeiterinnen diese Kindertagesstätte nutzen können.

Ein weiterer Hinweis bezieht sich auf die strukturierte Weiterbildung von Doktoranden in integrierten Graduiertenkollegs. Im Ingenieursbereich werden diese nicht durchgängig positiv gesehen. Gerade innerhalb eines SFB bestehen schon vielfältige Möglichkeiten aber auch Verpflichtungen zur Zusammenarbeit und zur Weiterbildung. Dementsprechend wird die Einführung eines verbindlich Qualifizierungskonzepts, wie es in einem Graduiertenkolleg üblich ist, als ein zu starres Korsett angesehen, das die Weiterbildung zwar fördert aber auch promotionsverlängernd wirken kann. Dementsprechend sollte es möglich sein, Regelungen möglichst flexibel handhaben zu können, in dem es z.B. neben den Pflichtveranstaltungen des SFB nur ein Individual-Curriculum in Absprache mit den zuständigen Teilprojektleitern vereinbart und dokumentiert wird. Das würde erlauben, die stark nachgefragten Angebote zu den Schlüsselqualifikationen zu nutzen, während eine fachliche Weiterbildung nur nach Bedarf bzw. innerhalb der Veranstaltungen des SFB erfolgt.

5 Berichte über die einzelnen Teilprojekte der letzten Förderperiode

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt A1

5.1.1 Titel

Entwicklungsmethodik - Methoden zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses von Mikrobauteilen

Design Support Methods for Micromechanical Systems

5.1.2 Projektleitung

Albers, Albert, o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c., 20.04.1957, deutsch
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
IPEK - Institut für Produktentwicklung
Kaiserstr. 12
76128 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-2371
Telefax: 0721 / 608-6051
E-Mail: sekretariat@ipek.kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

5.2.1.1 Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Demonstrator

Die Demonstratoren der ersten beiden Förderphasen, der Komponenten- und Systemphase, waren weitgehend durch zweieinhalbdimensionale Geometrien bzw. durch die Aneinanderreihung solcher Geometrien gekennzeichnet [BAU2010]. In der dritten Förderphase, der Komplexitätsphase, wurden erstmals Demonstratoren entwickelt, die diese Limitierung überwunden und die Herstellbarkeit dreidimensionaler Geometrien darstellten. Das Ziel der methodischen Entwicklung eines neuen Demonstrators für die vierte sog. Integrationsphase war es, neben Komponenten, die durch Mikropulverspritzguss hergestellt wurden, möglichst viele weitere Produktionsverfahren in die Demonstratorherstellung einzubinden und so möglichst die gesamte Prozesskette des SFB in einem Demonstrator abzubilden. Außerdem sollten durch erhöhte Bauteilkomplexität die Anforderungen an die Werkzeuge und Formeinsätze der genutzten Spritzgussverfahren möglichst stark erhöht werden, um die Grenzen der Machbarkeit dieser Verfahren zu ermitteln.

Wissensbasierte Gestaltung und Entwurfsmuster

Ausgehend von den bisherigen Forschungsaktivitäten im Bereich der wissensbasierten Konstruktion mikromechanischer Systeme stellte sich die Frage, inwiefern sich das häufig wenig formalisierbare Wissen, welches sich somit nicht in Konstruktionsregeln fassen lässt, explizit machen und bereitstellen lässt. Gerade bei der wissensintensiven multidisziplinären Technologie des Mikrouformens ist eine solche an die speziellen Bedürfnisse angepasste methodische Unterstützung notwendig. Eine bislang im Maschinenbau und der Mikrotechnik nicht näher untersuchte Methode zur formalisierten Wissensrepräsentation sind Entwurfsmuster. Der Ansatz der Entwurfsmuster fand erstmals in der Architektur Verwendung. Ein Architekturmuster nach Alexander [ALE1977] hat ein definiertes Format bestehend aus dem Namen, einer Einschätzung der Gültigkeit des Musters, einem Bild als Anwendungsbeispiel, der Beschreibung des Kontexts, in dem das Muster gültig ist, einer Problembeschreibung, einer Lösungsdarstellung sowie der Verknüpfung zu ähnlichen oder verwandten Mustern. Von der sog. „gang of four“ [GAM2010] wurde der Ansatz der Entwurfsmuster mit Erfolg in die Bereiche der Softwaretechnik übertragen. Tidwell entwickelte eine Mustersprache für das Human-Computer-Interface Design [TID1998]. Im Bereich des Maschinenbaus stellt Salustri [SAL2005] einen Entwurfsmusteransatz vor und beschreibt ein festes dreigliedriges Format

bestehend aus der Problembeschreibung, den Lösungsanteilen, die bei vielen funktionierenden Lösungen identisch sind, sowie einer Beschreibung der Konsequenzen. Auch Feldhusen und Bungert [FEL2007] stellen fest, dass Entwurfsmuster im Bereich der Entwicklung und des Product Life Cycle Managements bislang nicht angewandt wurden und schlagen diese Methode für den Einsatz in PLM-Systemen vor. In der vierten und letzten Fördererphase des SFB499 wurde die Aneignung des Musteransatzes zur Speicherung mikrospezifischen nicht-formalisierbaren Wissens erforscht.

Eigenschaftsabsicherung von Funktionselementen

Eine Kernfunktion dynamisch betriebener mechanischer Systeme ist allgemein die kontrollierte Erzeugung und Unterdrückung von Relativbewegungen. In allen bisher entwickelten Demonstratoren des SFB wurden Gleitlager verwendet, um relative Drehbewegungen zu ermöglichen. Welle-Nabe-Verbindungen (WNV) verhindern im Gegensatz dazu Relativbewegungen zwischen den durch sie verbundenen Teilen und übertragen Drehmoment und Drehzahl. Die dafür benötigten Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen müssen im Mikrobereich an die vorhandenen Werkstoffe und Fertigungsverfahren angepasst werden. So können die für kraftschlüssige Verbindungen nötigen Anforderungen an die Maßhaltigkeit der Bauteile bisher nicht ausreichend gut erfüllt werden.

Die sich mit Gleitlagern befassende Fachliteratur bezieht sich üblicherweise auf Wellendurchmesser $D > 1\text{mm}$ und stellt Methoden und Werkzeuge zu Gestaltung (bspw. [DIN3548]: $D > 50\text{mm}$), Auslegung und Qualitätssicherung (bspw. [DIN1496]: $D > 1\text{mm}$) bereit. Damit ist es heutzutage nicht möglich, das Betriebsverhalten von Gleitlagern mit Durchmessern kleiner 1mm vorauszuberechnen.

Auch bei Welle-Nabe-Verbindungen existieren diverse DIN-Normen für die Gestaltung, Auslegung und Qualitätssicherung, beispielsweise [DIN5464] und [DIN5471] für Keilwellen oder [DIN32711] und [DIN32712] für Polygonwellen. Auch für stoffschlüssige Verbindungen existieren Gestaltungshilfen [HAB2009]. Ihnen gemein ist, dass sie erst ab Wellendurchmessern von mehreren Millimetern gelten und bisher nicht für Durchmesser im Mikrometerbereich validiert wurden. In bisher entwickelten Demonstratoren wurden Drei- und Vierkantwellen für die Drehmomentübertragung verwendet. Im T-Drive beispielsweise wird der Rotor mittels Dreikant auf der Sonnenwelle befestigt. Diese Mehrkantwellen erfüllen ihre Funktion in den jeweiligen Demonstratoren, erzeugen jedoch mangels allgemeingültiger Gestaltungshilfen jedes Mal einen hohen konstruktiven Aufwand. Hierzu sollen vorhandene Normen in den Mikrobereich geeignet extrapoliert werden. Neben Polygonwellen wurden in den Demonstratoren des SFB bereits erfolgreich geklebte WNV eingesetzt. Aufgrund der höheren Festigkeit wurden zuletzt Zweikomponentenklebstoffe eingesetzt. Dabei muss gewährleistet sein, dass das Verhältnis der beiden Komponenten im applizierten Klebetrocken konstant ist. Dieses ist aufgrund der sehr geringen Klebstoffmenge im Klebespalt nur schwer sicherzustellen. Hierzu sollten Lösungsansätze entwickelt und auf ihre Eignung zur Mikromontage untersucht werden.

5.2.1.2 Ergebnisse, angewandte und neu entwickelte Methoden

Demonstrator

Die im Fortsetzungsantrag 2008 präsentierte Idee eines Mikrospindeltriebs wurde zugunsten des letztendlich realisierten Demonstrators „Mikro-Gasturbine“ nicht weiter verfolgt. Das Potential der Mikro-Gasturbine, die Fähigkeiten des SFB möglichst umfassend darzustellen, wurde im Vergleich zur ursprünglichen Idee des Mikrospindeltriebs als größer eingeschätzt. So lassen sich in der Mikro-Gasturbine die durch den SFB bereitgestellte Werkstoffvielfalt und die entwickelten Verbindungstechniken sinnvoll nutzen. Die auftretenden hohen Betriebstemperaturen in der Brennkammer und im Turbinenteil der Mikro-Gasturbine sowie die durch Zentrifugalkräfte hervorgerufenen mechanischen Belastungen der rotierenden Bauteile motivieren die Nutzung metallischer Guss- bzw. keramischer Spritzgusswerkstoffe. Weiterhin werden die Vorteile der genutzten Sinterfügeverbindung demonstriert, da diese Verbindung ebenfalls hochtemperaturfest ist. Der letztlich realisierte Demonstrator musste soweit vereinfacht werden, dass durch Aneinanderreihung mehrerer Lauf- und Leiträder zwar ein relativ komplexes Gesamtsystem aufgebaut werden konnte, gleichzeitig aber der maximal mögliche Kostenrahmen nicht verlassen wurde. So wurden die benötigten Lauf- und Leiträder mit je einem Formeinsatz im Mikrospritzgussverfahren realisiert. Dadurch ergab sich ein Demonstrator-Design, das aufgrund fehlender Einengung bzw. Aufweitung des Strömungsquerschnitts im Verdichter- bzw. Turbinenteil nur eine geringe Verdichtung bzw. Entspannung des Fluids entstehen lässt. Die zuvor beschriebene Zielsetzung, die mit dem Demonstrator verfolgt wurde, blieb davon jedoch unbeeinflusst. Hier von ausgehend wurden bei den prozessvorbereitenden und produzierenden Teilprojekten Anforderungen hinsichtlich einer fertigungsgerechten, handhabungsgerechten und prüfmittelgerechten Konstruktion ermittelt. Hierzu wurden Expertengespräche sowie die SFB-spezifischen Datenbanken „Strukturenkatalog“ des Teilprojekts Z3, der „Microfeaturekatalog“ des Teilprojekts C4 sowie das im Teilprojekt A1 entwickelte „Micro Book of Knowledge“ (MyBoK) genutzt [MYB2011]. Erste Ideen wurden wiederum in bilateralen Gesprächen sowie in den Arbeitskreisen des SFBs vorgestellt und diskutiert, so dass spezifische neue Randbedingungen und Anforderungen aufgenommen werden konnten. Die Entwicklung des Demonstrators ist in Abbildung 1 dargestellt.

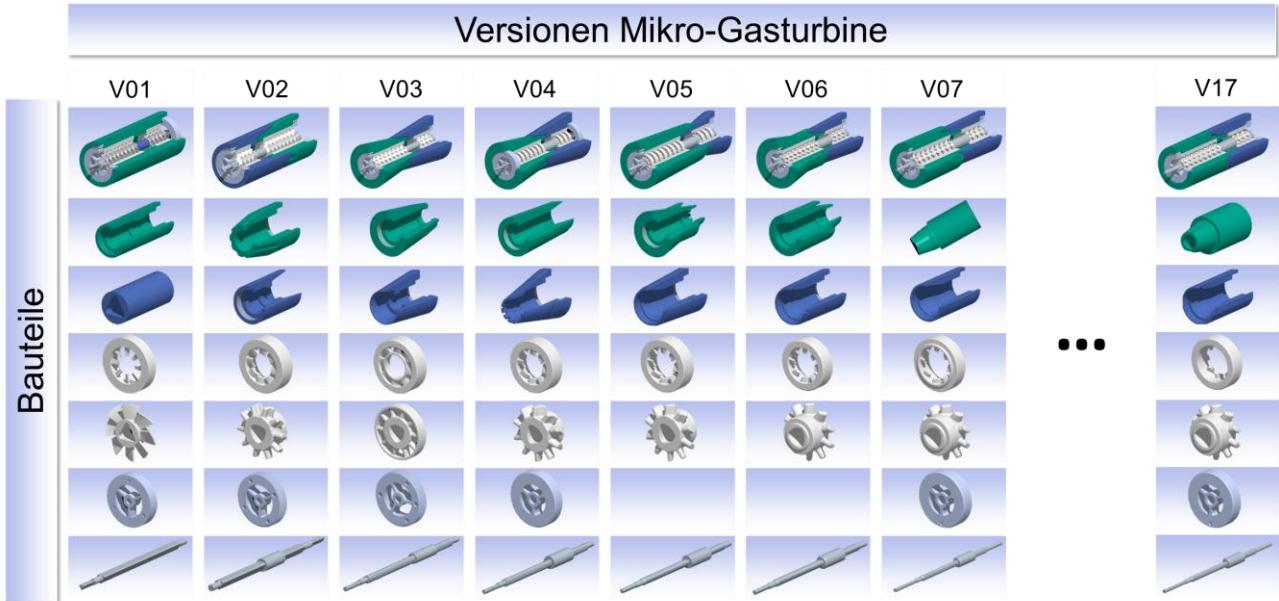


Abbildung 1: Entwicklung des Demonstrators Mikro-Gasturbine

Wiederholte Parameterstudien der Bauteilgeometrien (insbesondere am Lauf- und Leitrad) führten in einem kontinuierlichen Abstimmungsprozess zur letztendlich konzipierten Mikro-Gasturbine (V17), wie in Abbildung 2 gezeigt. Diese besteht aus zwei rotationssymmetrischen Gehäuseteilen, die über einen Konus unter Nutzung des Sinterfügens (Teilprojekt C3) miteinander verbunden werden. Die Lauf- und Leiträder aus ZrO_2 werden unter Nutzung des Mikro-Hochdruckspritzguss (Teilprojekt C1), die Lagerschilde aus ZrO_2 durch den Niederdruckspritzguss (Teilprojekt A3), die Polygonwellen aus Aluminiumbronze durch Mikroguss (Teilprojekt C2) und die Gehäuseteile aus 17-4PH durch Mikro-Hochdruckspritzguss (Teilprojekt C3) hergestellt.

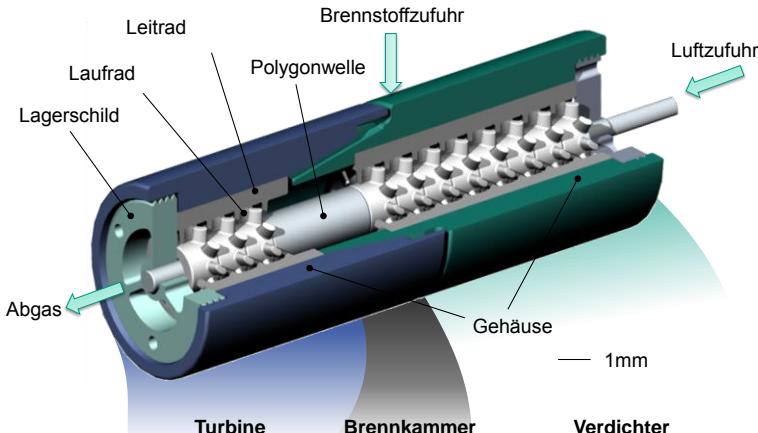


Abbildung 2: Mikro-Gasturbine nach Design Freeze

Zur Herstellung des Gehäuses wurden unterschiedliche Werkzeugkonzepte (v.a. Trennebenen der Formeinsätze) diskutiert. Das Gehäuse wurde aus zwei Gehäusehälften aufgebaut, die so gestaltet wurden, dass Montageabweichungen am sintergefügten Konus auf die generelle Montage und Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems keine Auswirkung hatten. Zusätzlich wurden „Brennstoffzuführungen“ in das Gehäuse eingebracht, die trotz des Sinterfügens am Konus den Zugang von außen zur Brennkammer eröffneten. Da von den Lauf- und Leiträdern durch ihre Stapelung besonders viele Teile pro Demonstratorsystem benötigt wurden, sollten diese durch den Mikro-Hochdruckspritzguss hergestellt werden. Das Design wurde an die Möglichkeiten dieses Fertigungsverfahrens und an den gewählten Werkstoff angepasst. So mussten konsequent scharfe Kanten und Hinterschneidungen vermieden, geringe Aushebeschrägen eingefügt, Anspritz-/Trennflächen und Positionierflächen vorgesehen werden. Insbesondere die Gestaltung der Trennebenen der Formeinsätze stellte die größten Herausforderungen an die Entwicklung, die aber durch ein neuartiges Werkzeugkonzept, das gemeinsam mit dem Teilprojekt C1 entwickelt wurde, gelöst werden konnten (vgl. Abschnitt 5.2.1.3). Die Lagerschilde wurden für die Herstellung per Niederdruckspritzguss optimiert. Die Hinterschneidungen des Gewindes am Außendurchmesser wurden aufgrund der genutzten

Silikonformen als herstell- und entformbar eingeschätzt. Über das Gewinde wird das Lagerschild mit dem Gehäuse verschraubt und dient damit als Radial- und Axiallager für die Polygonwelle. Die Polygonwelle nutzt ein P3G-Polygon (sog. Gleichdick), um einerseits eine einfache Montage der Laufräder, andererseits aber auch eine möglichst gute Selbstzentrierung der Laufräder im Betrieb zu gewährleisten. Damit können die Auswirkungen der im Vergleich zu den Nennmaßen der Bauteile relativ großen geometrischen Abweichungen auf die Funktionalität reduziert werden. Die Polygonwelle besitzt ein Aspektverhältnis von ca. 30, ihr Durchmesser nimmt zu beiden Enden beträchtlich ab. Damit stellte sie hohe Herausforderungen an das Teilprojekt C2 und erforderte ein entsprechendes Angusskonzept. Mikrospezifische Aspekte bei der Entwicklung ungeformter mikrotechnischer Systeme sind in [ALB2010b, BAU2010, ALB2011a] beschrieben.

Wissensbasierte Gestaltung und Entwurfsmuster

Ziel der wissensbasierten Gestaltung ist es, Randbedingungen, Anforderungen und Restriktionen aus späteren Phasen des Produktentstehungsprozesses (Prozessvorbereitung, Fertigung und Qualitätssicherung) für den Entwickler bereits in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses bereitzustellen. Für diesen Zweck konnten in den vergangenen Förderperioden die Ableitung und die Anwendung von Konstruktionsregeln erfolgreich erforscht werden. Konstruktionsregeln lassen sich in mathematische Formeln speichern und sind somit leicht für den Rechner interpretierbar. Erfahrungswissen als Beispiel für wenig formalisierbares Wissen ist meistens personen-, kontext- und situationsbezogen. Es lässt sich nicht in mathematische Formeln umschreiben. Dieses Wissen muss in Textform gespeichert werden. Zur standardisierten Wissensrepräsentation auch wenig formalisierbaren Wissens wurden in dieser Förderperiode Entwurfsmuster erforscht. Ein Muster ist die Beschreibung der invarianten Merkmale einer Vielzahl von Lösungen zu ähnlichen Problemstellungen in einer definierten Situation. Trotz nicht-formalisierbaren Inhalts besitzen Muster einen charakteristischen, immer gleichen Aufbau [ALB2009a, ALB2009e].

Zur Systematisierung wird ein Muster folgendermaßen strukturiert [ALB2010d]:

- **Name (Alias):** Die Namensgebung erfordert eine eindeutige und treffende Kurzbeschreibung des Musters. Aliasse für dasselbe Muster ergänzen den Namen.
- **Situation:** Die Situation beschreibt den Kontext, in dem das Muster gültig ist. Sie umfasst alle relevanten Informationen aus der Situationsanalyse (SA). Die Situation beinhaltet Verknüpfungen zu übergeordneten Mustern und grenzt den Gültigkeits- und Anwendungsbereich auf eine Domäne ein.
- **Problem:** Die Problembeschreibung umfasst die invarianten Merkmale einer Vielzahl ähnlicher Problemstellungen innerhalb einer definierten Domäne. Sie ist textuell und ergänzend grafisch umgesetzt und grenzt das Problem ein (PE).
- **Lösung:** Die Lösungsbeschreibung ist abstrakt und unabhängig von konkreten Anwendungsfällen (AL). Sie enthält die invarianten Merkmale einer Vielzahl von Lösungen des beschriebenen Problems sowie Hinweise, wie der Anwender zu einer Lösung gelangt. Dies geschieht u.a. durch die Verknüpfung mit untergeordneten Mustern. Zudem enthält der Lösungsteil Informationen, warum die Anwendung der beschriebenen abstrakten Lösung bei dem gegebenen Problem sinnvoll erscheint (LA). Die Lösung wird textuell und ergänzend grafisch beschrieben.
- **Tragweite:** Die Tragweiteanalyse (TA) zeigt potentielle Chancen und Risiken auf, die sich aus der Musteranwendung ergeben können.
- **Konsequenz:** Die Konsequenz beschreibt das Ergebnis der Musterumsetzung (EU).
- **Beispiele:** Diese erklären an konkreten Fällen, wie das Muster umgesetzt wurde. Es können auch welche ergänzt werden, bei denen die Umsetzung nicht zum gewünschten Ergebnis geführt hat. Neue Beispiele der Musteranwendung werden im Schritt Nachbereiten und Lernen (NL) im Muster abgelegt.
- **Verwandte Muster:** Das Muster kann ein verwandtes Muster haben, das ein ähnliches Problem auf andere Weise erfolgreich löst, und das an dieser Stelle mit dem interessierenden Muster verbunden wird.
- **Quellen:** Auflistung von Quellenverweisen
- **Metadaten:** Unter Metadaten fallen mögliche Zugriffselemente, bspw. Schlagworte, Kategorien o.ä. sowie ergänzende Information, wie Signifikanz, Ersteller, Bearbeiter, Änderungsdatum.

Ein Muster ist verknüpft zu übergeordneten Mustern in der Situationsbeschreibung (Super-Muster) und zu untergeordneten Mustern im Lösungsteil (Sub-Muster) und kann dadurch im Kontext verstanden werden. Analog zur menschlichen Sprache ergibt sich aus der konkreten Anwendung eines Musters mit Super- und Sub-Mustern ein Satz innerhalb einer *Mustersprache*. Diese besteht aus untereinander in Bezug stehenden Mustern, die in einer definierten Situation gültig sind. Diese Situation entspricht der Situationsbeschreibung des höchststehenden Musters und wird an die untergeordneten Muster weitervererbt. Analog zur menschlichen Sprache entsprechen Muster den Wörtern, die Musterverknüpfung den grammatischen Regeln und die konkrete Anwendung von Mustern den gesprochenen Sätzen.

Grundsätzlich werden in der technischen Produktentwicklung drei Musterarten unterschieden. *Zielmuster* beschreiben die invarianten Lösungsmerkmale einer Vielzahl erfolgreicher erstellter Zielsysteme.

Objektmuster beschreiben die invarianten Merkmale einer Vielzahl von Problemlösungen, die sich anhand von Objekten manifestieren. Diese Objekte können physisch vorhandene Produkte, Software, Code o.ä. sein. *Aktivitätenmuster* beschreiben die invarianten Lösungsmerkmale bei der erfolgreichen Durchführung von Aktivitäten. Aktivitätenmuster enthalten im Lösungsteil Methoden oder Referenzprozesse. Die Betonung liegt auf dem Lösungsteil. Das Aktivitätsmuster beschreibt eben nicht nur die erfolgversprechende Vorgehensweise, sondern ergänzt diese um die Beschreibung, in welcher Situation die Methodenanwendung sinnvoll ist und welches Problem durch sie gelöst werden kann.

Zur *Identifikation* von Mustern wurden die bisher entwickelten mikromechanischen Systeme Mikroturbine, Mikroplanetengetriebe und Mikrodispenser auf gemeinsame Elemente hin analysiert. Zur Analyse wurde hier eine Methode angewendet, durch die sich der Zusammenhang von Funktion und Gestalt zur Gruppierung typischer Gestaltungsprobleme (Funktionen) und Lösungen (Gestalt) herstellen lässt. Zur Musteridentifikation wurden bei der Analyse der Mikrosysteme für eine ähnliche Situation bekannte Lösungen analysiert. Die ähnlichen Funktionen der Systeme werden als Problemstellung herangezogen. Die entsprechenden gemeinsamen Merkmale der gestalterischen Umsetzungen stellen Lösungen dar. Beide ergeben zusammen mit der Situation ein Urmuster, das in der Musterableitung vervollständigt und dann zur Anwendung bereitgestellt wird [ALB2010c].

Zur Auswahl des geeigneten *Repräsentationssystems* für die Bereitstellung von Mustern wurden folgende neun Eigenschaften definiert, die das System besitzen muss. (1) *Interoperabilität*, wodurch sich die Repräsentation möglichst effizient in bestehende Prozesse und Werkzeuge einbinden lässt, um dem Anwender möglichst ohne zusätzlichen Aufwand zur Verfügung zu stehen; (2) *Mehrbenutzerfähigkeit*, durch die mehr als eine Quelle und mehr als ein Abnehmer von Informationen die Repräsentation nutzen. Eine notwendige Eigenschaft ist daher eine Mehrbenutzerfähigkeit. Idealerweise blockiert die Bearbeitung eines Themas nicht die Nutzung oder Bearbeitung eines anderen Aspekts; (3) *Verfügbarkeit*, die die Art und Weise der Zugriffsmöglichkeiten auf die Repräsentation beschreibt; (4) *Erweiterbarkeit* durch die Möglichkeit, notwendige Anpassungen der Inhalte im Sinne einer kontinuierlichen Verbesserung zu erlauben; (5) *Sicherheit*, die entsprechende Zugriffsbeschränkungen bzw. einen Schutz vor Datenverlust durch geeignete systemspezifische Datensicherungsstrategien erlaubt; (6) *Suchfunktion*, die den Anwender durch eine oder mehrere geeignete Suchfunktionen unterstützt; (7) *Klare Strukturierung* der Musterdarstellung, die eine Repräsentationsform als Vorlagen vorgibt, die dem Mustererzeuger die Strukturierung des Musters vorwegnehmen; (8) *Übersicht*, die ein Katalog der Muster und eine kurze Darstellung ihrer Zielsetzungen zeigt; (9) *Verknüpfungen*, die Beziehungen zu Super- und Submustern sowie ggf. ergänzend zu verwandten Mustern realisiert. Die Repräsentation ermöglicht eine einfache Navigation durch die Sprache. Aus diesen Vorüberlegungen wurde das SFB-interne Informationssystem Micro Book of Knowledge (MyBoK) [MYB2011] basierend auf einer DokuWiki-Distribution aufgebaut. Um Anwendern die abgeleiteten Muster in einer geeigneten Repräsentation zur Verfügung zu stellen, wurden sie in MyBoK gespeichert. Weil viele Informationen wie z.B. Informationen zu Fertigungstechnologien, Konstruktionsregeln, usw. in MyBoK enthalten sind, gestaltet sich die einfache Textsuche, die das DokuWiki-System von MyBoK anbietet, schwierig. Zur Lösung dieses Problems wurde eine systematische Verlinkung aller Muster miteinander realisiert, die das Wiederauffinden von Mustern vereinfacht. Dazu wurden systematisch Muster mit benachbarten Mustern in Beziehungen gesetzt. Durch die Systematisierung und die ontologische Abbildung konnten die Muster nutzerfreundlich bereitgestellt werden. Im neuen Ontologie-basierten SharePoint-Wiki wurden nicht nur Muster unter sich systematisch verlinkt, sondern zusätzlich mit anderen Wissensinhalten aus dem MyBoK verlinkt (z.B. Konstruktionsregeln, Effekte, Fertigungsverfahren usw.). Durch die neue Suchfunktion kann der Nutzen die Suche nach mehreren Kriterien, die bei der Implementierung der Ontologie festgelegt wurden (z.B. Ziel-, Objekt- oder Aktivitätsmuster), so einschränken, dass er schnell zum richtigen Suchergebnis kommt. Bei der Implementierung der Ontologie fand durch eine institutsinterne Kooperation ein Erfahrungsaustausch zwischen dem Teilprojekt A1 des SFB499 und dem Teilprojekt A8 des SFB 483 statt.

Um eine für die Entwicklung mikromechanischer Systeme verallgemeinerte Methodik zur Identifikation und Ableitung von Mustern zu erhalten, wurde ein Gesamtkonzept für den Musteransatz erforscht und entwickelt (vgl. Abbildung 3).

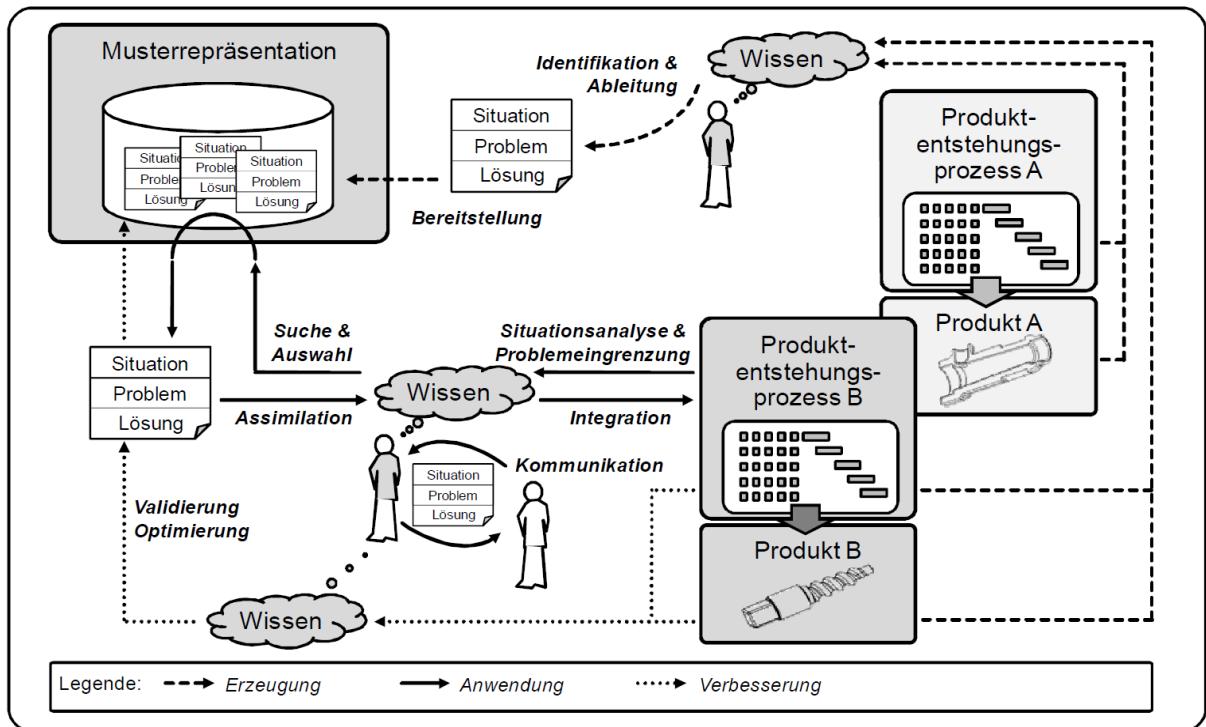


Abbildung 3: Aktivitätenmodell des Musteransatzes

Der Einsatz von Mustern geschieht durch aktives Handeln von Anwendern. Diese verschiedenen Aktivitäten im Musteransatz lassen sich gezielt durch Methoden unterstützen. Ein Muster durchläuft dabei prinzipiell die drei Zustände Erzeugung, Anwendung und Verbesserung.

Um Muster anwenden zu können, müssen diese zuerst erzeugt werden. Ein Experte oder ein Expertenkreis muss aus seinem bzw. ihrem Erfahrungsschatz heraus potentielle Muster identifizieren, ableiten und speichern, um sie Anwendern in einer geeigneten Repräsentation zur Verfügung zu stellen. Neben der oben genannten Methode „Analyse bekannter (technischer) Systeme mittels C&C²-A“ wurden für die Identifikation weitere Methoden verwendet. Ein Workshop mit einer Gruppe von Experten des SFB aus verschiedenen Bereichen (Entwicklung, Produktionsvorbereitung, Produktion) fand statt, um wiederkehrende Entwicklungsaufgaben zu identifizieren. Offene Interviews wurden mit einzelnen Experten aus der Produktionsvorbereitung und der Produktion durchgeführt. Hier wurden Ergebnisse aus dem Workshop mit der Expertengruppe vertieft. Fragen gestellt wie z.B.: Gibt es Fehler, die die Konstrukteure immer wieder machen und welche sind das? Wie sähe eine bessere Lösung aus? Weiterhin wurden mehrere Design Reviews mit Konstrukteuren während der Entwicklung der Mikro-Gasturbine statt. Typische Fragen versuchten eine Antwort zu finden, weshalb eine bestimmte Lösung bevorzugt wurde [ALB2011c].

Die Anwendung von Mustern setzt das Wissen um das Bestehen eines Problems in einer Situation voraus. Für die Situationsanalyse können Methoden wie Checklisten oder recherchierende Methoden verwendet werden. Für die Problemeingrenzung sind Methoden wie Soll-Ist-Vergleich oder Warum-Analyse hilfreich. Hat der Anwender die Situation erfasst und das Problem identifiziert, greift er auf das Musterrepräsentationssystem zu und kann wie oben erwähnt nach hilfreichen Mustern suchen. Trifft der Anwender bei der Suche nicht auf Anhieb das passende Muster, bietet ihm die Verknüpfung zu Super- und Submustern die Möglichkeit, sich zielgerichtet zu relevanten Mustern vorzuarbeiten. Bei der Anwendung werden die Kommunikation und Dokumentation durch die in Musterform explizit gemachten Situationsanalysen, Problemeingrenzungen und ausgewählten Lösungen unterstützt [ALB2011e].

Nach der Anwendung fügt der Entwickler seine neu gewonnenen Erfahrungen dem Muster hinzu. Das Muster beinhaltet die invarianten Merkmale einer Vielzahl vorangegangener erfolgreicher Lösungen. Die Integration der Lösungselemente führt zu einer erfolgversprechenden Lösung. Tritt der Erfolg nicht ein, ist es wichtig u.a. auch den Mustereinsatz zu hinterfragen und bei Bedarf das Muster abzuändern oder um ein Negativbeispiel zu erweitern. Eine Häufung von Negativbeispielen führt zur Revision und Rückzug des Musters.

Für einen nachhaltigen Einsatz der Muster ist eine kontinuierliche Erweiterung, Validierung bzw. Optimierung notwendig. Zur Veranschaulichung der Rechercheergebnisse aller Teilprojekte des SFB 499 wurde pro Förderperiode mindestens ein Demonstrator entwickelt. In dieser Förderperiode stand bei der Entwicklung der Mikro-Gasturbine zum ersten Mal eine Sammlung an Erfahrungswissen in Form von Mustern zur Verfügung. Der Entwurfsmusteransatz wurde entwicklungsbegleitend angewendet [ALB2010b]. So konnten sowohl Inhalte von Mustern als auch der Gesamtansatz mit erfahrenen Konstrukteuren diskutiert werden.

Bei manchen Mustern wurde der Inhalt komplett überarbeitet. Bei anderen Mustern wurden nur die Formulierungen angepasst. Bei dieser Validierung wurde z.B. zum ersten Mal die einfache Freitextsuche des DokuWiki-Systems MyBoK kritisiert, was dazu geführt hat, ein ontologiebasiertes System zu verwenden. Mit der Anwendung des Musteransatzes stand dem Entwickler eine breitere Wissensbasis zur Verfügung, so konnten die Anzahl der Iterationsschleifen verringert werden. Genauso konnte die Kommunikation zwischen den Beteiligten am Entwicklungsprozess verbessert werden. Der Ansatz ermöglicht z.B. weniger erfahrenen Konstrukteuren wie neuen wissenschaftlichen Mitarbeitern oder Studierenden einen schnelleren Einstieg in die Thematik der urformenden Mikrosystemtechnik. Die Mustersammlung steht zukünftig im Rahmen des Zentrums für integrierte Mikrofertigung (ZIM) Partnern aus Wissenschaft und Industrie zur Verfügung. So können Muster auch über den Förderzeitraum hinaus nachhaltig validiert und bereitgestellt werden [ALB2011f].

Eigenschaftsabsicherung von Funktionselementen

Scharfe Kanten sind bei dreidimensionalen Mikrobauteilen immer ein Problem, da sie aufgrund der Werkzeugdurchmesser oft nicht herstellbar sind und bei keramischen Werkstoffen typischerweise zu Spannungsüberhöhungen führen. Eine große Herausforderung sind auch hohe Aspektverhältnisse, da diese zu Schwierigkeiten beim Entformen der Bauteile führen [MYB2011]. Polygonverbindungen weisen keine scharfen Kanten auf, sind somit einfach zu fertigen und vermeiden Spannungsüberhöhungen. Das herstellbare Aspektverhältnis für diese Mikro-Welle-Nabe-Verbindung wurde in Absprache mit Teilprojekt A3 ermittelt.

Die Entwicklung von der bisher verwendeten Dreikantwelle zu der Polygonwelle in der Ausführung P3G [DIN32711] zeigt Abbildung 4. Hierbei ist e_1 der Exzenter und d_1 der Durchmesser der Polygonwelle.

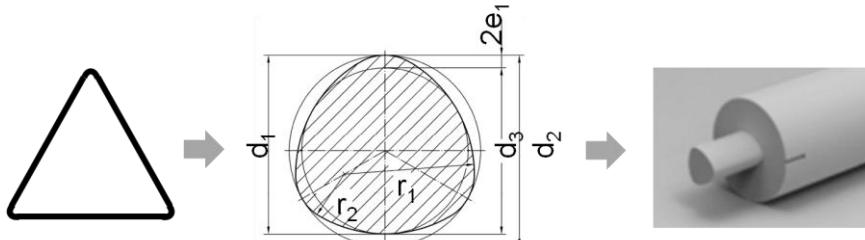


Abbildung 4: Entwicklung vom bisher im SFB eingesetzten Dreikantprofil mit abgerundeten Ecken zu dem in der aktuellen Förderphase untersuchten Polygonprofil P3G [DIN32711]

Neben Polygonverbindungen wurden zylindrische Klebeverbindungen entwickelt. Die Übertragung des Drehmoments findet bei der Klebeverbindung nur durch radiale Wirkflächenpaare und nicht durch axiale (z.B. Wellenschultern, wie im SFB bisher üblich) statt.

Bei der Prüfung von Mikrogleitlagern und Welle-Nabe-Verbindungen musste anfangs ebenfalls geklärt werden, welche Prinzipien im Mikrobereich realisiert werden können. Bei der Entwicklung der Probekörper wurden sowohl fertigungstechnische Aspekte als auch die konstruktive Umsetzbarkeit berücksichtigt. Im nächsten Schritt wurden die die Funktionsfähigkeit beeinflussenden Merkmale ermittelt. Dazu wurde zuerst sowohl für jede der beiden Mikro-WNV als auch für die Gleitlager eine Liste mit möglichen Einflussfaktoren aufgestellt. Für jede Verbindung wurden danach die möglichen Einflussfaktoren bewertet und abschließend die wichtigsten Merkmale in unterschiedliche Gestaltvarianten umgesetzt. Als Grundlage für die Bewertung dienen die bisher im SFB gemachten Erfahrungen.

Für die Polygonverbindung sind die wichtigsten Faktoren die tragende Länge, Toleranzen (da diese einen starken Einfluss auf Form und Funktion des drehmomentübertragenden Exzentrers haben), sowie der Wellen-Nenndurchmesser. Als Durchmesser d_1 für den polygonförmigen Teil wurden 216 µm und 504 µm bei 1 mm tragender Länge gewählt.

Bei der Klebeverbindung wurden tragende Länge, Größe des Klebespalts, sowie verwendeter Klebstoff (inkl. Aushärtetemperatur und -zeit) als wichtigste Einflussfaktoren ermittelt. Es wurden Durchmesser von 300 µm und 350 µm für den drehmomentübertragenden Zylinder gewählt, die Nabe weist eine Bohrung mit 360 µm Durchmesser auf. Somit lassen sich Klebespalte von 5 µm und 30 µm realisieren. Der Zylinder zur Übertragung des Drehmoments ist jeweils 1mm lang.

Bei den Gleitlagern fiel die Werkstoffauswahl für die Prüfbohrung aus fertigungs- und versagenstechnischen Gründen auf ZrO₂ und bei den Prüfwellen (Nenndurchmesser = 500 µm) auf ungehärteten (9SMnPb28K) und gehärteten Stahl (Zylinderstifte nach DIN EN ISO 8734 – A – St) sowie auf Aluminiumbronze (CuAl10Ni5Fe4). Die Breite des Gleitlagers wurde mit 300, 500 und 700 µm dimensioniert. Der geplante Luftspalt im Gleitlager sollte zwischen 8 µm und 25 µm liegen.

Die Varianten wurden im CAD modelliert und in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten Z3, B4 und A3 entwickelt. Ein Exemplar der Gleitlagerprüfbohrung wurde als Positivteil mittels Mikrofräsen im Teilprojekt Z3 für die spätere Vervielfältigung durch das Teilprojekt A3 hergestellt. Aus den CAD-Modellen wurden mittels Mikrofunkenerosion (in Teilprojekt B4) mehrere Klebeverbindungen, mehrere Gleitlagerprüfwellen aus

gehärtetem Stahl, sowie jeweils ein Exemplar der kleinen und der großen Polygonverbindung hergestellt. Beide Größen der Polygonverbindung und die Gleitlagerprüfbohrungen wurden anschließend mittels Niederdruckspritzguss vervielfältigt. Als Werkstoff wurde ZrO_2 verwendet. Aufgrund des hohen Aspektverhältnisses brachen die Polygonwellen ($D=216 \mu\text{m}$) beim Entformen aus der Silikonform und konnten nicht getestet werden. Die Gleitlagerprüfwellen aus gehärtetem Stahl und aus Aluminiumbronze wurden mittels einer handelsüblichen Feindrehbank gefertigt.

Der Mikrozahnradprüfstand wurde zum Mikromechanikprüfstand erweitert (vgl. Abbildung 5), um hiermit die Mikro-Gleitlagerprüfungen sowie die Mikro-WNV-Prüfungen durchführen zu können. Zuerst wurde die Elektronik in einen Rack ausgelagert, um die notwendigen Anpassungen des Prüfstands im Bereich der Messtechnik zu ermöglichen. Durch den Einbau einer neuen Bodenplatte mit gerastertem Bohrfeld wurde es möglich, die Prüfstandskomponenten flexibel zueinander anzubringen, neue Komponenten einzubauen und den Abstand von An- und Abtriebsseite in dem benötigten größeren Maße zu verändern als es bislang möglich war.

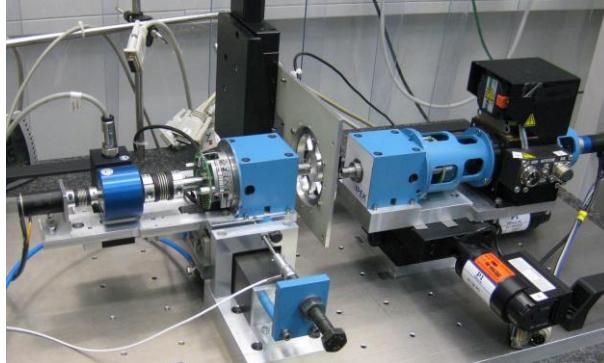


Abbildung 5: Versuchsaufbau des Mikromechanikprüfstands für Gleitlager- und WNV-Prüfungen

Für die Versuche mit Mikro-WNV waren erneut Umbauten nötig, da hier besonders die Präzision des Prüfstands wichtig ist. Dazu wurde auf der Abtriebsseite das Luftlager durch einen Sockel ersetzt. Die zwischen An- und Abtriebsseite montierte Aufnahme für Gleitlager wurde entfernt. Durch die großen Fertigungsabweichungen ließen sich die geplanten Luftpalte bei den Gleitlagern nicht bei allen Paarungen umsetzen. Deshalb musste durch die systematische Messung aller relevanten Maßen bei allen Probekörpern eine sinnvolle Auswahl getroffen werden mit der Zielsetzung, die Vergleichbarkeit zu sichern. Vor der Durchführung der Versuche wurde für Polygon- und Klebeverbindungen das theoretisch übertragbare Drehmoment ermittelt. Als Basis dienten extrapolierte Normen [DIN32711] für die Polygonverbindung, sowie [HAB2009] für die Klebeverbindung. Die Berechnung der Festigkeit nach [DIN32711] unter Berücksichtigung der im SFB erreichten Werkstoffeigenschaften von ZrO_2 [SCH2008] ergibt ein durchschnittlich übertragbares Drehmoment von 26,9mNm. Gemessen wurden in den Versuchen jedoch durchschnittlich 9,5mNm, d.h. etwa ein Drittel. Abbildung 6 zeigt ein typisches Bruchbild.



Abbildung 6: Typisches Bruchbild der Polygonwellen (rechts)

Das Bruchbild stellt einen Widerspruch zur Belastung dar. ZrO_2 müsste als spröder Werkstoff unter reiner Torsionsbelastung im 90° Winkel versagen. Das oben gezeigte Bruchbild zeigt jedoch einen Winkel von 45° . Dieser tritt beim Versagen spröder Werkstoffe unter Biegebelastung auf, was die Vermutung nahelegt, dass die Proben aufgrund leichter Abweichungen in der Koaxialität (von An- und Abtriebsseite) und der daraus resultierenden Biegebelastung, nicht jedoch durch das aufgebrachte Drehmoment versagten. Der Prüfstand war vor Beginn der Versuche sorgfältig und präzise ausgerichtet worden. Legt man die im SFB erreichte durchschnittliche Festigkeit von ZrO_2 und das gemessene Drehmoment zugrunde, lässt sich mittels der Gestaltänderungsenergiethypothese berechnen, dass zwei Drittel der Belastung durch die Biegung aufgebracht wurden. Das bedeutet jedoch auch, dass die 9,5mNm nur ein Drittel der möglichen Belastung darstellen, die somit bei ca. 28,5mNm liegt (was in etwa den berechneten 26,9mNm entspricht). Somit kann die DIN 32711 bei den verwendeten Fertigungsverfahren und Werkstoffen bis $500\mu\text{m}$ extrapoliert werden.

Bei den Klebeverbindungen zeigt eine Berechnung nach [HAB2009], dass theoretisch 1,43mNm übertragen werden können. Praktisch hat sich jedoch gezeigt, dass das Hauptproblem bei Bauteilen dieser Größe die Benetzung der Klebefläche von Welle und Nabe ist. Mittels niederviskosem Einkomponentenklebstoff (Viskosität: $125\text{mPa}\cdot\text{s}$) wurde versucht, die Bauteile rein radial zu verkleben, d.h. ohne Zuhilfenahme axialer

Flächen wie Wellenschultern. Trotz verschiedener Versuche eine Benetzung zu realisieren, konnten keine messbaren Drehmomente übertragen werden. Die Betrachtung des Klebetroppfens unter dem Mikroskop zeigte, dass der Klebetroppen intakt blieb und sich nicht auf Welle und Nabe verteilte. Somit ist der Einsatz von Einkomponentenklebstoffen im Mikrobereich nicht zu empfehlen. Hier sollte aufgrund der höheren Festigkeit mittels Zweikomponenten Klebstoffen radial und axial verklebt werden. Das Widerstandsmoment und die Drehzahl wurden als Messgröße erfasst. Um die Gleitlagerfunktion am Prüfstand zu erfüllen, musste noch eine Belastung auf das Gleitlager ausgeübt werden, was durch einen Kraftsensor mit 0,5 N und 0,25 N Belastung umgesetzt wurde. Die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse setzt konstante Umgebungsbedingungen voraus [ALB2011b] [ALB2011d].

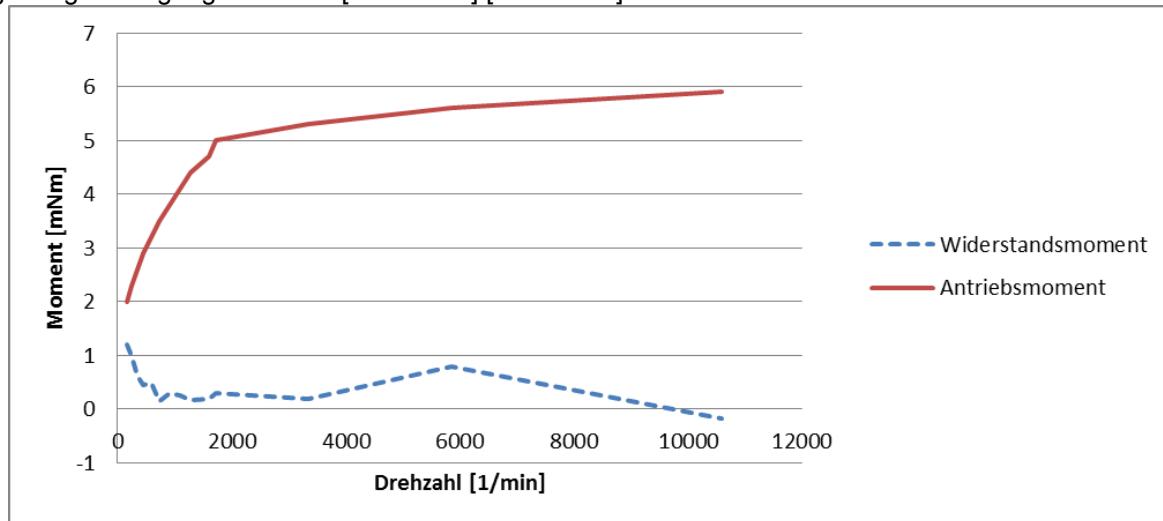


Abbildung 7: Verlauf des Antriebs- bzw. des Widerstandsmoments bei der Gleitlagerprüfung (Raumtemperatur 22,9 °C, Luftfeuchtigkeit: 40,7 %)

Abbildung 7 zeigt den Verlauf des Widerstandsmoments bei einer Welle aus gehärtetem Stahl ($D= 505 \mu\text{m}$), einer Bohrung aus ZrO_2 ($D= 543 \mu\text{m}$), einer Lagerbreite von $392\mu\text{m}$ und einer Lagerlast von $0,25 \text{ N}$. Weil für diesen Versuch kein Schmierstoff verwendet wurde, kann die in Abbildung 7 gezeigte Widerstandsmomentaufnahme als Test der wartungsfreien Gleitlagerfunktion betrachtet werden. Hierfür ist ein gewisser Verschleiß notwendig, der eingelagerte Festschmierstoffpartikel freisetzt. Weil Stahl weniger verschleißfest als Keramik ist, konnte der Wellenwerkstoff selbst freigesetzt werden und als Schmierstoff wirken. Reibungsrost war am Lager festzustellen. Erst bei einem Antriebsmoment von 2 mNm begann sich das Gleitlager zu drehen. Dabei zeigte der Widerstandsmomentssensor einen Wert von $1,2\text{mNm}$. Mit steigender Drehzahl bzw. Drehmoment wurde das Widerstandsmoment niedriger und blieb dann bei einem Wert von $0,4 \text{ mNm}$ fast konstant. Ab einer Drehzahl größer 10.000 U/min wurden die Schwingungen im Antriebsstrang so groß, dass aufgrund der Vibrationen die Messwerte nicht mehr korrekt waren. Dies kann man am Verlauf des Widerstandsmoments erkennen, das ab einer bestimmten Drehzahl negativ wird, d.h. das Widerstandsmoment würde das Antriebsmoment noch mehr unterstützen und nicht dagegen wirken.

5.2.1.3 Herausforderung bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Demonstrator

Größte Herausforderung bei der Gestaltmodellierung des Demonstrators war die Toleranzfestlegung (Längen-, Form- & Lagetoleranzen). Hier konnten nicht wie in makroskopischen Systemen üblich beliebige, für die Funktionserfüllung notwendige Toleranzen festgelegt werden. Vielmehr erforderte die Toleranzvergabe ein Umdenken des Konstrukteurs, da hier die Fertigungsverfahren Grenzwerte für realisierbare Toleranzen lieferten, die eingehalten werden mussten. Diese so gewonnenen minimal möglichen Toleranzen waren aber oftmals noch immer zu groß, um die Funktionsfähigkeit zu gewährleisten. Durch entsprechende Gestaltung konnten die Funktion sichergestellt und die zu erwartenden relativ großen Fertigungsabweichungen akzeptiert werden. Ein Beispiel hierfür war die Gestaltung der Welle-Nabe-Verbindung zwischen Polygonwelle und Laufrad, die durch die Ausführung als P3G-Gleichdickprofil die Fertigungsabweichungen größtenteils ausgleichen konnte. Die benötigte genaue koaxiale Positionierung der Polygonwelle und der Laufräder zueinander konnte dadurch trotz möglicherweise relativ großer Spaltweiten erreicht werden. Da alle Bauteile abformend hergestellt wurden, ergaben sich Prozessverkettungen aus Einzelprozessen, die jeweils spezifische minimale Abweichungen besitzen und ebenfalls miteinander kombiniert werden mussten. Zusätzlich mussten die Bauteile skaliert werden, um thermische Dehnungen beim Abkühlen (z.B. Mikroguss, Mikro-Hochdruckspritzguss) und/oder Sinterschwund

(Niederdruckspritzguss, Mikro-Hochdruckspritzguss) auszugleichen und das gewünschte Endmaß am Bauteil zu erhalten. Danach wurden die Bauteile samt ihrer Toleranzen wieder herunterskaliert, um die aufsummierten und herunterskalierten Endabweichungen am Demonstratorbauteil zu erhalten. Damit konnten deren Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit abgeschätzt werden. Dieses Vorgehen wurde iterativ angewandt, um zu einer funktionsoptimalen Aufteilung der Toleranzen auf die einzelnen Bauteile und Prozessschritte zu erreichen.

Eine weitere wesentliche Herausforderung in der Demonstratorenentwicklung stellte die Entwicklung der Formeinsätze für Lauf- und Leitrad dar. Durch die dreidimensionalen Freiformflächen der Verdichter- und Turbinenschaufeln (vgl. Abbildungen Abbildung 8: Trennebenen am Formeinsatz Laufrad (Auswerferseite) und Abbildung 9: Trennebenen am Formeinsatz Laufrad (Düsenseite)) konnte die Teilung der Formeinsätze im Gegensatz zu sämtlichen bisher verwendeten Formeinsätzen nicht mehr über eine ebene Trennfläche erfolgen. Diese aus vielen kleinen Sub-Trennflächen zusammengesetzte Teilung stellte höchste Anforderungen an die Präzision während der Fertigung, da die Trennflächen nicht mehr wie bei ebenen Trennflächen nachträglich auf Maß geschliffen werden konnten. Zusätzlich erfolgte die Formeinsatztrennung nicht nur über waagerechte, sondern notwendigerweise auch über senkrechte bzw. schräge Trennflächen. Trotz dieser komplexen Formeinsatztrennflächen musste für eine erfolgreiche Abformung sichergestellt werden, dass der Feedstock beim Spritzvorgang zwar die Kavität optimal füllt, gleichzeitig aber nicht zwischen die Trennflächen tritt. Dadurch würden die Trennflächen beschädigt und die weitere Abformung mit den Formeinsätzen unmöglich. Hierfür wurde ein entsprechendes neuartiges Werkzeugkonzept entwickelt, s. Abschnitt 5.2.1.4.

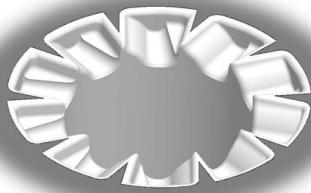


Abbildung 8: Trennebenen am Formeinsatz Laufrad (Auswerferseite)



Abbildung 9: Trennebenen am Formeinsatz Laufrad (Düsenseite)

Wissensbasierte Gestaltung und Entwurfsmuster

Die wesentliche Herausforderung bei der Unterstützung wissensbasierter Gestaltung und Entwurfsmuster war die Fülle der Musterinhalte. Auf der einen Seite sollten in einem Muster möglichst viele Inhalte (Erläuterungen, Beispiel usw.) enthalten sein, damit die Arbeit des Benutzers erleichtert werden kann. Auf der anderen Seite, wurde festgestellt, dass die Länge des Mustertextes mit der Nutzung des Musters korreliert. Manche Konstrukteure schrecken vor zu langen Mustertexten ab und verweigern dementsprechend die Nutzung. Die maximale Länge eines Musters sollte eine DIN-A4 Seite bzw. etwa 500 Wörter nicht überschreiten.

Eigenschaftsabsicherung von Funktionselementen

Das Hauptproblem bestand in der Ausrichtung des Prüfstands. Da bereits Abweichungen von wenigen Mikrometern einen großen Einfluss auf die Versuche haben (wie sich bei den Polygonwellen bestätigt hat), wurde auf die koaxiale Ausrichtung von An- und Abtriebsseite besondere Sorgfalt gelegt. Dazu wurde der gesamte Prüfstand in einer 3D-Koordinatenmessmaschine mikrometergenau vermessen, um dann An- und Abtriebsseite in einem iterativen Prozess möglichst exakt koaxial auszurichten. Da dieses Verfahren noch nicht genau genug ist, sollte zukünftig eine drehmomentsteife, aber radial ausgleichende WNV auf Basis von Polygon- oder Keilwellen entwickelt werden.

Weiterhin war die Abformung der Polygonwellen bei dem gegebenen Aspektverhältnis im Niederdruckspritzguss kaum möglich. Besonders bei der Polygonwelle mit $D=216\mu\text{m}$ war das Entformen der Probekörper aus der weichen Silikonform sehr aufwendig, da die spröden ZrO_2 -Proben hierbei leicht brechen. Diesem Problem kann durch Wechsel des Fertigungsverfahrens bzw. Begrenzung des Aspektverhältnisses bei kleinen Durchmessern begegnet werden.

5.2.1.4 Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Demonstrator

Wie in Abschnitt 5.2.1.3 dargestellt bestand eine wesentliche Herausforderung darin, die geometrische Tolerierung so durchzuführen, dass gleichzeitig Herstellbarkeit, Montage- und Funktionsfähigkeit garantiert werden konnten. Dazu konnte der Microfeature-Katalog des Teilprojekts C4 unterstützendes Erfahrungswissen auf Basis der Demonstratorenentwicklungen der vorhergehenden Förderphasen

bereitstellen. In diesem Katalog sind die Werte der dimensionellen Messung bestimmter Strukturdetails (sog. Microfeatures, z.B. Bohrungen, Ebenen,...) zuvor realisierter Bauteile hinterlegt. Das Wissen, wie groß die Abweichungen bestimmter Fertigungsverfahren bei der Herstellung bestimmter Strukturen sind, war also explizit verfügbar. Allerdings bestand ein wesentlicher Nachteil des Katalogs in seinem Aufbau. Die Art und Weise, wie auf die relevanten Informationen zugegriffen werden musste, unterstützte den Konstrukteur in nicht-optimaler Weise. Informationen zu den Abweichungen einzelner Fertigungsverfahren erhielt der Konstrukteur über die Auswahl eines bestimmten zuvor realisierten Bauteils und die darauffolgende Spezifikation eines an diesem Bauteil vorhandenen Features. Das Ergebnis waren Listen von Einzelmessungen dieser Features (z.B. Mittelwert und Standardabweichung des Durchmessers einer Bohrung, die auf drei Querschnittsebenen und zehn unterschiedlichen Bauteilen ermittelt wurden). Die auf diese Weise erhaltene Information war einerseits schwierig zu erhalten und musste andererseits weitergehend interpretiert werden, um hilfreich zu sein.

Der Konstrukteur hingegen legt im Konstruktionsprozess zunächst die Nennmaße der Bauteile fest, um die prinzipielle Machbarkeit einschätzen zu können. Danach legt er die für die Funktionserfüllung notwendigen Toleranzen fest und muss sich dabei wie zuvor beschrieben stark an den minimalen Abweichungen der Fertigungsverfahren orientieren. Er benötigt also für die zu vergebenen Längen-, Form- und Lagetoleranzen Erfahrungswerte aus vorherigen Produktentstehungsprozessen. Um diese Vorgehensweise zu unterstützen, muss der Zugriff auf die Informationen des Microfeature-Katalogs möglichst intuitiv über die zu definierenden Längen, Form- und Lagetoleranzen erfolgen. Diese Idee zur Verbesserung des Microfeature-Katalogs wurde im AK Qualitätssicherung diskutiert und bilateral mit Teilprojekt C4 umgesetzt [LAN2011].

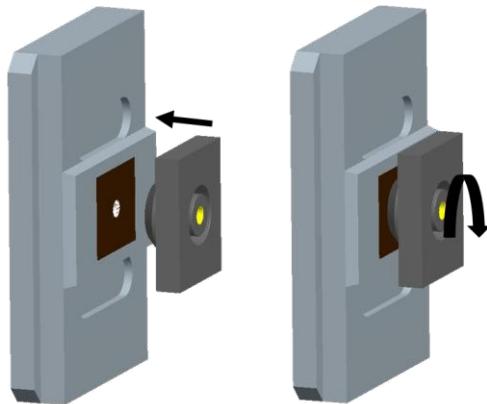


Abbildung 10: Gemeinsam mit Teilprojekt C1 entwickeltes Werkzeugkonzept zur kollisionsfreien Ausrichtung der Formeinsatzhälften zueinander bei gleichzeitig bei minimaler Trennfugenbreite

Wie in Kapitel 5.2.1.3 beschrieben wurden zur Herstellung der Lauf- und Leiträder Formeinsätze mit komplexen, ineinander greifenden Trennflächen benötigt (vgl. Abbildung 8 und Abbildung 9). Diese Formeinsatzhälften mussten im Spritzgusswerkzeug möglichst exakt aufeinander ausgerichtet werden, um beim Spritzgussvorgang das Eindringen des Feedstocks zwischen die Trennflächen zu vermeiden. Gleichzeitig musste sichergestellt werden, dass die Strukturen der beiden Formeinsatzhälften beim Schließen des Spritzgusswerkzeugs nicht durch gegenseitige Kollision beschädigt werden. Diese konkurrierenden Zielsetzungen konnten durch ein entsprechendes Werkzeugkonzept, das in Kooperation mit Teilprojekt C1 entwickelt wurde, erfüllt werden. Dieses Konzept ermöglicht ein Schließen des Werkzeugs bei um wenige Winkelgrad zueinander verdrehten Formeinsätzen. Dadurch konnten die über die Hauptebene einer Formeinsatzhälfte herausragenden Strukturen (die „kronenartigen“ Strukturen) mit ausreichender Sicherheit in die Kavitäten der gegenüberliegenden Formeinsatzhälfte eintauchen. Durch eine entsprechende Mechanik in einer der beiden Werkzeughälften wird kurz vor dem vollständigen Schließen des Werkzeugs der Winkelversatz wieder kontinuierlich reduziert, bis sowohl senkrechte als auch waagerechte Sub-Trennflächen in Kontakt kommen. Die Trennfuge kann somit auf ein Minimum reduziert werden, vgl. Abbildung 10. Schließlich wurden in Kooperation mit Teilprojekt C1 Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Mikro-Spritzgussformeinsätzen durchgeführt [HEN2011].

Wissensbasierte Gestaltung und Entwurfsmuster

Die Zusammenarbeit mit allen anderen Teilprojekten des SFB war maßgeblich für die erfolgreiche Bearbeitung dieses Arbeitspaket. Die Bearbeiter der einzelnen Teilprojekte stellen Experten auf ihren Gebieten dar. Wie in Kapitel 5.2.1.2 erwähnt wurde, fanden sowohl Workshops mit allen als auch Interviews mit einzelnen Teilprojektbearbeitern statt mit dem Ziel, wiederkehrende Muster zu identifizieren. Nach der Ableitung und Formatierung der Muster ins Musterformat, wurden die Inhalte nochmal mit den jeweiligen Teilprojektbearbeitern validiert.

Eigenschaftsabsicherung von Funktionselementen

Die Entwicklung und Gestaltung der Mikro-WNV (Polygon- und Klebeverbindung) erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Teilprojekt B4. Dort wurden die Probekörper für die Klebeverbindung, sowie die Rohlinge für die Polygonverbindung mittels Mikro-Funkenerosion hergestellt. Das Abformen und Sintern der Mikro-Polygonverbindung zu Probekörpern aus ZrO_2 wurde in Teilprojekt A3 durchgeführt. Mit Teilprojekt Z3 wurden die Möglichkeiten erörtert, Mikro-WNV durch Mikro-Fräsen herzustellen.

Um zukünftig zur Validierung mikrotechnischer Systeme stärker virtuelle Prüfstandsversuche durchführen und nutzen zu können, wurde gemeinsam mit Teilprojekt A2 ein Abgleich zwischen virtuellen und realen Prüfstandsversuchen am Beispiel von Zahnrad-Wälzprüfungen durchgeführt. Dazu wurden Zahnräder im Teilprojekt C4 geometrisch vermessen und die erhaltene Punktewolke zur Modellierung virtueller Zahnräder genutzt [ALB2008]. Eine Zahnrädegeomtrie (inkl. ihrer Abweichungen von der idealen Geometrie) lag somit in einem realen und einem virtuellen Bauteil vor. Die nachfolgenden Prüfstandsversuche konnten daraufhin sowohl real als auch virtuell durchgeführt und ihre Ergebnisse korreliert werden. Um die anfangs schlechten Korrelationen zu verbessern, wurden verschiedene Änderungen an den genutzten Mess-, Prüf- und Modellierungsverfahren vorgenommen, die sukzessive zu einer relativ guten Übereinstimmung führten [ALB2008, ALB2009b, ALB2009c, ALB2009d, ALB2010a].

5.2.1.5 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Demonstrator

Es gibt bereits einige Ansätze und Studien zur Realisierung von Mikro-Gasturbinen [EPS2003, JAC2004, LEU2011, ONE2011, PEI2005]. Allerdings nutzen diese Forschungsprojekte als Herstellungsmethode für die Turbinenläufer entweder photolithographische Verfahren (z.B. Elektronenstrahl-, Röntgenlithographie, LIGA,...) oder direkt formgebende Verfahren wie z.B. Mikrofräsen, Mikrodrahterosion oder Mikrosenkerosion.

Photolithographische Verfahren lassen eine freie Formgebung von Bauteilen lediglich in zwei Raumrichtungen (x, y) zu, da die dritte Raumrichtung durch „translatorisches Verschieben“ der 2D-Struktur erzeugt wird. Die Vorteile photolithographischer Verfahren sind eine günstige Massenherstellung, geringe Seitenwandauhigkeiten von weniger als 50 nm und hohe Abformgenauigkeit. Damit können Genauigkeiten von weniger als 1 μm bei der Herstellung einer Mikro-Gasturbine erreicht werden. Weiterhin entfällt bei photolithographisch gefertigten Systemen ein nachfolgender separater Montageschritt, da die Montage durch entsprechende Prozessführung schon bei der Herstellung der Bauteile integriert ist. Nachteilig bei photolithographischen Verfahren ist die eingeschränkte Werkstoffwahl, da diese Werkstoffe entweder belichtbar, ätzbar und/oder galvanisierbar sein müssen. Außerdem lassen sich durch diese Herstellverfahren nur sehr schlecht Werkstoffkombinationen in einem technischen System realisieren. Die Werkstoffwahl geschieht also nicht aufgrund von Überlegungen zu den Einsatzbedingungen (welche Anforderungen werden an die Bauteile aus funktionaler Sicht gestellt), sondern aufgrund von prozesstechnischen Beschränkungen. Weiterhin nutzen photolithographische Verfahren wie z.B. das LIGA-Verfahren teilweise sehr aufwändige und damit teure Strahlungsquellen (z.B. Synchrotronstrahlung) zur Belichtung und sind damit wenn überhaupt nur ökonomisch für Bauteile und Systeme einsetzbar, die in sehr großen Stückzahlen gefertigt werden.

Durch direkt formgebende Verfahren wie Mikrofräsen, Funkenerosion, usw. können zwar Bauteile mit dreidimensionalen Freiformflächen hergestellt werden. Diese Verfahren eignen sich aber nicht zur ökonomischen Herstellung von Bauteilen in großen Stückzahlen und können auch nur begrenzt verschleißfeste und harte Werkstoffe wie z.B. Keramiken bearbeiten. Im Gegensatz dazu besitzen die hier entwickelten Herstellungsverfahren Mikroguss und Mikropulverspritzguss das Potential, Bauteile mit dreidimensionalen Freiformflächen herzustellen, für die sowohl metallische als auch keramische Spritzgussformmassen genutzt werden können. Hochverschleißfeste und temperaturbeständige Mikroturbinenschaufeln und -räder z.B. aus ZrO_2 mit optimierten Schaufelgeometrien werden dadurch herstellbar. Da jedes Bauteil separat hergestellt wird, stellt eine Kombination verschiedener Werkstoffe im System kein Problem dar. Durch Nutzung des Mikro-Hochdruckspritzgusses oder des Niederdruckspritzgusses lassen sich sowohl hohe Stückzahlen als auch Einzelbauteile und Kleinserien mit akzeptablem Aufwand realisieren.

Wissensbasierte Gestaltung und Entwurfsmuster

Verglichen mit anderen Technologien ist die Mikrosystemtechnik, insbesondere die Mikrosystemtechnik eine relativ neue Disziplin. Zur Unterstützung des Entwurfsprozesses mittels wissensbasierter Gestaltung wurden bisher nur regelbasierte Methoden entwickelt, die den Austausch formalisierbaren Wissens unterstützen. Ein Beispiel dafür sind die Arbeiten im Rahmen der dritten Förderperiode mittels Konstruktionsregeln. Bisher sind für den Austausch nicht-formal fassbaren Wissens im Bereich der Mikrosystemtechnik keine Ansätze

bekannt. Im Makrobereich wurden in den letzten Jahren erste Ansätze entwickelt, die den Austausch dieses speziellen Wissens unterstützen sollen, unter anderem mittels Entwurfsmustern.

5.2.2 Quellen

- [EPS2003] Epstein, A.H.: *Millimeter-scale, MEMS gas turbine engines*, Massachusetts Institute of Technology, 2003
- [JAC2004] Jacobson, S.A., *Progress towards a microfabricated gas turbine generator for soldier portable power applications*, Massachusetts Institute of Technology, 2004
- [LEU2011] Universität Leuven, Department of Mechanical Engineering, <http://www.powermems.be/>, besucht am 01.12.2011
- [ONE2011] Onera, French aerospace Lab, <http://www.onera.fr/defa-en/thermal-mems-micro-machines/decawatt.php>, besucht am 01.12.2011
- [PEI2005] Peirs, J.: *A micro gas turbine unit for electric power generation: design and testing of turbine and compressor*, Department of mechanical engineering, University Leuven, 2005
- [DIN32711] Deutsches Institut für Normung, Normenausschuss Maschinenbau, Normenausschuss Werkzeugmaschinen: *DIN 32711 Welle-Nabe-Verbindung – Polygonprofil P3G*, Berlin: Beuth Verlag, 2009
- [DIN32712] Deutsches Institut für Normung, Normenausschuss Maschinenbau, Normenausschuss Werkzeugmaschinen: *DIN 32712 Welle-Nabe-Verbindung – Polygonprofil P4C*, Berlin: Beuth Verlag, 2009
- [DIN5464] Deutsches Institut für Normung, Normenausschuss Maschinenbau: *DIN 5464 Passverzahnungen mit Keilflanken – Schwere Reihe*, Berlin: Beuth Verlag, 2010
- [DIN5471] Deutsches Institut für Normung, Deutscher Normenausschuss, Fachnormenausschuss Werkzeugmaschinen: *DIN 5471 Keilwellen- und Keilnaben-Profile mit 4 Keilen*, Berlin: Beuth Verlag, 1974
- [DIN 8734] Deutsches Institut für Normung, Normenausschuss Maschinenbau: *DIN EN ISO 8734 Zylinderstifte aus gehärtetem Stahl und martensitischem nichtrostendem Stahl*, Berlin: Beuth Verlag, 1997
- [HAB2009] Habenicht, G.: *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2009
- [MYB2011] SFB 499 *MyBoK – Micro Book of Knowledge*, <https://wiki.ipek.uni-karlsruhe.de/mybok/doku.php>, besucht am 01.12.2011
- [SCH2008] Schulze, V., Kerscher, E., Ritzhaupt-Kleissl, H.-J., Bauer, W., Müller, M., Kurzenhäuser, S., Okolo, B., Rögner, J.: *Relationships between process, microstructure and properties of molded zirconia micro specimens*, *Microsystem Technologies*, Vol. 14, S. 1831-1837, 2008
- [ALE1977] Alexander, C., Ishikawa, S., Silverstein, M.: *A pattern language: towns, buildings, construction*, Oxford University Press, London, 1977
- [GAM2010] Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., Vlissides, J.: *Design patterns: elements of reusable object-oriented software*, Addison-Wesley, Massachusetts, 2010
- [TID1998] Tidwell, J.: *Interaction Design Patterns*, Procs. Pattern Languages of Programs PloP'98, Allerton Park, Monticello, Illinois, USA, August 11-14, 1998
- [SAL2005] Salustri, F.A.: *Using Pattern Languages in Design Engineering*, Procs. ICED 2005, Melbourne, August 15-18, 2005
- [DIN3548] DIN Normenausschuss Gleitlager (NGL): *Gleitlager. Dünnwandige Lagerschalen mit und ohne Bund*, Beuth, Berlin, 2001
- [DIN1496] DIN Normenausschuss Gleitlager (NGL): *Ermittlung des Betriebsverhaltens von feinwerktechnischen Gleitlagern mit der SLPG-Prüfeinrichtung*, Beuth, Berlin, 1996

5.2.3 Projektrelevante eigene Publikationen

- [ALB2008] Albers, A., Fleischer, J., Börsting, P., Enkler, H.G., Leslabay, P., Schlipf, M.: *Dealing with Uncertainty of Micro Gears – Integration of Dimensional Measurement, Virtual and Physical Testing*, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2008), Boston, Massachusetts, USA, October 31–November 6, 2008, pp. 257-265, doi:10.1115/IMECE2008-66672, 2008
- [ALB2009a] Albers, A., Deigendesch, T., Turki, T.: *Patterns for Design in Microtechnology*, 8th International Workshop on High Aspect Ratio Micro Structure Technology HARMST 2009, Saskatoon, Canada, June 25-28, 2009
- [ALB2009b] Albers, A., Börsting, P., Deigendesch, T., Enkler, H.G., Leslabay, P.: *Micro Gear Validation – Improving the Correlation between Virtual and Physical Testing*, 8th International

- Workshop on High Aspect Ratio Micro Structure Technology HARMST 2009, Saskatoon, Canada, June 25-28, 2009
- [ALB2009c] Albers, A., Börsting, P., Deigendesch, T., Enkler, H.G., Leslabay, P.: *Validierung von Mikrozahnrädern: Erhöhung der Korrelation zwischen Simulation und Versuch*, 4. Kolloquium Mikroproduktion, BIAS-Verlag, Bremen, 28.-29. Oktober, 2009
- [ALB2009d] Albers, A., Börsting, P., Enkler, H.G., Leslabay, P.: *Validierung von Mikrogetrieben – Erhöhte Korrelation zwischen Simulation und Prüfstandsversuch*, VDE/VDI GMM MikroSystemTechnik Kongress, Berlin, 12.-14. Oktober, 2009
- [ALB2009e] Albers, A., Deigendesch, T., Turki, T.: *Design Pattern in Microtechnology*, International Conference on Engineering Design, ICED '09, Stanford, USA, 24 - 27 August, 2009
- [ALB2010a] Albers, A., Börsting, P., Deigendesch, T., Enkler, H.G., Leslabay, P.: *Micro gear validation: improving the correlation between virtual and physical testing*, Microsystem Technologies, Volume 16, Numbers 8-9, pp. 1529-1535, DOI: 10.1007/s00542-009-0997-9, 2010
- [ALB2010b] Albers, A., Börsting P., Turki, T.: *Application of Design Patterns for the Development of Primary Shaped Microsystems: a Case Study*, Multi-Material Micro Manufacture 4M 2010, Oyonnax, France, 17.-19. November, 2010
- [ALB2010c] Albers, A., Deigendesch, T., Turki. T., Müller T.: *Patterns for Design in Microtechnology*, Microsystem Technologies, Volume 16, Numbers 8-9, 1537–1545, DOI 10.1007/s00542-010-1042-8, 2010
- [ALB2010d] Albers, A., Deigendesch, T.: *Patterns in Product Development*, Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2010, Ancona, Italien, 12.-16. April, 2010
- [ALB2011a] Albers, A., Börsting, P., Turki, T.: *Micro Gas Turbine Development: Design Improvements using Design Patterns*, Micro and Nanosystems, Volume 3, Number 3, September 2011, Bentham Science Publishers, 2011
- [ALB2011b] Albers, A., Turki, T., Hoppen, P.: *Ensuring functional reliability of molded micro components*, 9th International Workshop on High Aspect Ratio Micro Structure Technology HARMST 2011, Hsin-Chu, Taiwan, 12.-18. Juni, 2011
- [ALB2011c] Albers, A., Turki, T.: *Supporting Microsystem Technology Design through provision of Experience*, 9th International Workshop on High Aspect Ratio Micro Structure Technology HARMST 2011, Hsin-Chu, Taiwan, 12.-18. Juni, 2011
- [ALB2011d] Albers, A., Lanza, G., Turki, T., Troll, D., Hoppen, P., Kippenbrock, K.: *Validierung von Mikrokomponenten und -systemen durch Simulationen und Prüfstandsversuche*, Kolloquium Mikroproduktion, Karlsruhe, 11.-12. Oktober, 2011
- [ALB2011e] Albers, A., Turki, T.: *Abbildung von Erfahrungswissen zur Unterstützung des Entwurfsprozesses in der Mikrotechnik*, VDE/VDI GMM MikroSystemTechnik Kongress, Darmstadt, 11-12. Oktober, 2011
- [ALB2011f] Albers, A., Turki, T.: *Supporting Microsystem Technology Design through provision of Experience*, Microsystem Technologies (eingereicht)
- [BAU2010] Bauer, W., Müller, M., Knitter, R., Börsting, P., Albers, A., Deuchert, M., Schulze, V.: *Design and prototyping of a ceramic micro turbine: a case study*, Microsystem Technologies, Volume 16, Number 4, 607-615, DOI: 10.1007/s00542-009-0974-3, 2010
- [HEN2011] Heneka, J., Prokop, J., Börsting, P., Piotter, V., Ritzhaupt-Kleissl, H.J.: *Wear-effects induced by powder injection molding of zirconia feedstocks*, Multi-Material Micro Manufacture 4M 2011, Stuttgart, 08.-10. November, 2011
- [LAN2011] Lanza, G., Albers, A., Kippenbrock, K., Börsting, P.: *Support for Micro-Tolerancing through the Feedback of Existing Quality-Related Data to Product Developers*, 11th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology EUSPEN, Como, Italien, 23.-27. Mai, 2011

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit 01.01.2000 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	Laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1	Albers, A., o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c.	Entwicklungs-methodik	IPEK	4	
	2	Burkhardt, N., Dipl.-Ing.	Entwicklungs-methodik	IPEK	4	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	3	Weber, U.		IPEK	2	
	4	Müller, P.		IPEK	2	
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	5	Börsting, P., Dipl.-Ing.	Entwicklungs-methodik	IPEK	39,5	E13
	6	Turki, T., Dipl.-Ing.	Entwicklungs-methodik	IPEK	19,75	SH
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	7	Thöres, D.,		IPEK	19,75	E12

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

1. Albers, Albert, o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c.

Leiter des Instituts für Produktentwicklung. Leiter des Teilprojekts.

2. Burkhardt, Norbert, Dipl.-Ing.

Oberingenieur und Lehrbeauftragter

3. Weber, Uwe (Techniker)

IT Management – CAD und EDV Administration

4. Müller, Petra

Administration, Terminabsprachen, Raumbelegung, Schriftverkehr und Kommunikation

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

5. Börsting, Peter, Dipl.-Ing. (2009: 12MM, 2010: 10MM, 2011: 12MM)

Turki, Tarak, Dipl.-Ing. (2010: 2MM)

Der wissenschaftliche Mitarbeiter ist für die Planung, Koordination und Durchführung der beantragten Forschungsarbeiten im Teilprojekt A1 sowie für die Kooperation mit den anderen SFB-Teilprojekten verantwortlich. Er entwickelt bis zur Entwurfsfreigabe sowohl konzeptionelle Demonstratorsysteme sowie Konzepte für Probe- und Testkörper als auch deren zugehörige Formeinsatzkonzepte.

Er erforscht Methoden und Werkzeuge für die mikrospezifische Produktentwicklung und die Gestaltung mikromechanischer Systeme. Neben der konzeptionellen Weiterentwicklung des Mikrozahnradprüfstandes plant er Programme für Messungen an Mikrogleitlagern und Mikro-WNV sowie für die Validierung von Versuch und Simulation. Zudem werden durch den wissenschaftlichen Mitarbeiter Auswertungen der Messungen und Interpretationen der Messergebnisse erarbeitet und bereitgestellt.

6. Studentische Hilfskräfte

Die studentische Hilfskraft unterstützt den wissenschaftlichen Mitarbeiter in der konzeptionellen Entwicklung von Demonstrator-, Probe- und Testkörpern einschließlich der zugehörigen Formeinsätze. Im Bereich des Mikrozahnradprüfstandes hilft sie bei der Auswertung von Messschrieben und dem Erstellen von Versuchspfotokollen.

8. Thöres, Dietmar, (2010: 6MM, 2011: 12MM)

Durch die modulare Erweiterung des Mikrozahnradprüfstandes und des breit gefächerten Versuchspfotokolls wird es notwendig, den Prüfstand an die Anforderungen einzelner Versuchsreihen anzupassen. Der Techniker übernimmt alle Umrüstarbeiten am Prüfstand, insbesondere die zeitaufwendige, mikrometergenaue Ausrichtung der einzelnen Module. Weiterhin obliegt dem Techniker die Aufgabe, Versuche vorzubereiten, durchzuführen und auch auszuwerten. Er unterstützt den wissenschaftlichen Mitarbeiter sowohl bei der Konzipierung neuer und der Anpassung vorhandener Prüfstandsmodule.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt A2

5.1.1 Titel

Modellierung – Modellierung von ungeformten Mikrobauteilen und mikromechanischen Systemen aus metallischen und keramischen Werkstoffen

Modeling – Modeling of Molded Micro Components and Micro Mechanical Systems made of Metallic and Ceramic Materials

5.1.2 Projektleitung

Albers, Albert, o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c., 20. April 1957, deutsch

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

Kaiserstraße 10

76131 Karlsruhe

Telefon: 0721 608-42371

E-Mail: albers.albert@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

Ausgehend von einer kurzen Zusammenfassung des Kenntnisstandes bei der letzten Antragsstellung werden die Ausgangsfragestellungen, die neu entwickelten Verfahren und die zur Bearbeitung angewandten Methoden dargestellt. Die Ergebnisse sowie deren Bedeutung werden diskutiert. Abschließend wird auf die Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten des Sonderforschungsbereiches eingegangen.

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Ziel des Teilprojektes A2 war die simulationsgestützte Durchdringung des Verhaltens ungeformter Mikrobauteile und -systeme sowie die Absicherung von deren Funktion unter Berücksichtigung mikrospezifischer Aspekte. In der vergangenen Förderphase wurden – aufbauend auf den Forschungsergebnissen und den entstandenen Methoden und Werkzeugen der vorigen Phasen – Methoden für eine frühzeitige Funktionsabsicherung sowie ein robustes Verhalten mikromechanischer Bauteile und Systeme entwickelt.

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Auf Bauteilebene konnte in der dritten Phase ein erfolgreicher Übergang von zweidimensionalen Betrachtungen hin zur Modellierung und Analyse komplexer dreidimensionaler Bauteile samt Kornstruktur und Defekten erreicht werden. Des Weiteren wurde die Simulation des Systemverhaltens um die Berücksichtigung funktionsbestimmender Toleranzen ergänzt sowie deren Auswirkungen analysiert. Aufbauend auf diesen Forschungsarbeiten wurden in der letzten Phase aus Sicht des Teilprojektes die folgenden Aspekte betrachtet:

- Bewertung der Einflüsse von Geometrieabweichungen bereits in der Konzeptphase der Produktentwicklung (AP1)
- Optimierung ungeformter Mikrobauteile und -systeme unter Berücksichtigung von Robustheitsaspekten (AP2 und AP3)
- Entwicklung und Bereitstellung einer durchgängigen Prozesskette (AP4)

Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

Genereller Ansatz (AP1, AP2, AP3, AP4)

Im Hinblick auf Mikrobauteile und -systeme galt es, experimentelle Arbeiten zur Charakterisierung von Materialeigenschaften und des Systemverhaltens durch numerische Analysen zu ergänzen. Generell wurde hierbei eine durchgängige, virtuelle Prozesskette angestrebt. Bei der Entwicklung von Methoden und Werkzeugen

gen wurde hierzu stets auf die Möglichkeit zur Automatisierung Wert gelegt, um z. B. statistische Analysen durchführen zu können. Die Betrachtung erfolgte auf zwei verschiedenen Ebenen: der Bauteil- und der Systemebene. Auf Systemebene wurden beispielsweise Kontaktkräfte ermittelt und der Einfluss von Geometrieabweichungen auf das Systemverhalten untersucht. Auf Bauteilebene wurde der Einfluss von Korngefüge, Anisotropie und Defekten untersucht. Wegen der Interaktion von Bauteil und System wurden darüber hinaus beide Ebenen miteinander verknüpft (Abbildung 1).

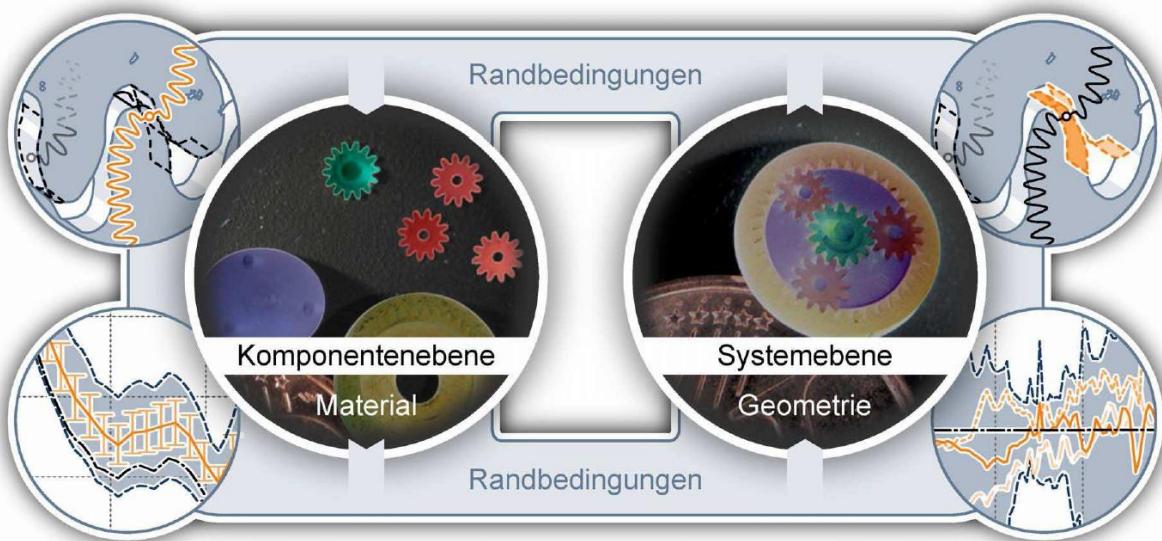


Abbildung 1 Genereller Ansatz – Berücksichtigung von Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten und dem daraus aufgebautem System

Auf beiden Ebenen galt es, den Ansatz der Optimierung des Bauteil- bzw. Systemverhaltens unter Berücksichtigung von Robustheitsaspekten umzusetzen. Dabei wurde beispielsweise die Standardabweichung eines Optimierungskriteriums durch Modifikation der Geometrie und unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen an einen Referenzwert angenähert, um einen homogenen Verlauf der Standardabweichung innerhalb eines Designbereichs zu erzeugen (Abbildung 2).

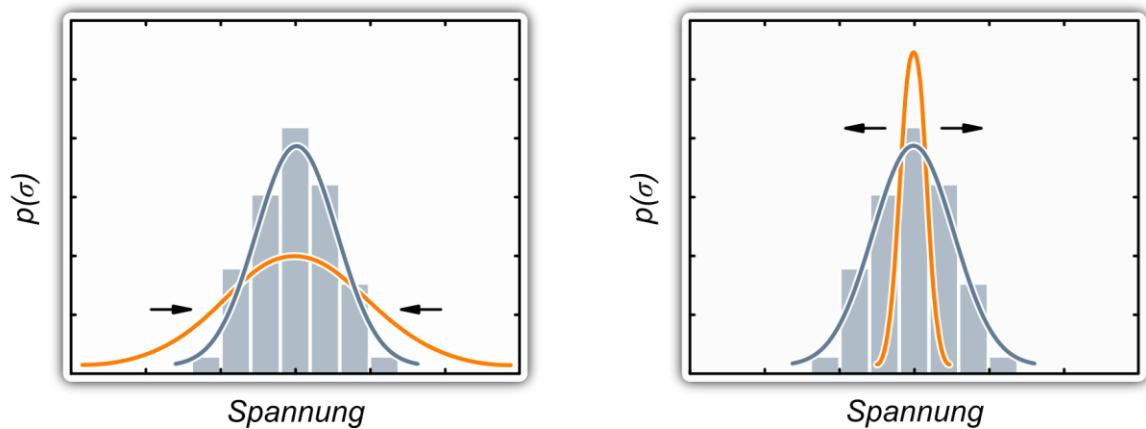


Abbildung 2 Qualitative Darstellung des Vorgehens bei der robustheitsbasierten Formoptimierung (hier: hinsichtlich der Spannung)

Bauteilbetrachtung (AP1, AP2, AP4)

Auf Bauteilebene wurden die Ergebnisse der vorangegangenen Projektphasen um ein Werkzeug zur Formoptimierung von Mikrobauteilen ergänzt, das neben dem herkömmlichen Kriterium der maximalen Spannung zusätzlich statistische Größen, wie die Standardabweichung der Spannung berücksichtigt. Die gesamte Prozesskette umfasst damit eine Methode zur Modellierung von Bauteilen, einschließlich deren Kornstruktur und Defekten sowie die Möglichkeit einer statistischen Untersuchung einzelner, komplexer dreidimensionaler Bauteile und daraus aufgebauter Systeme mit einer anschließenden Optimierung. Das gesamte Prozessmodell ist in Abbildung 3 dargestellt.

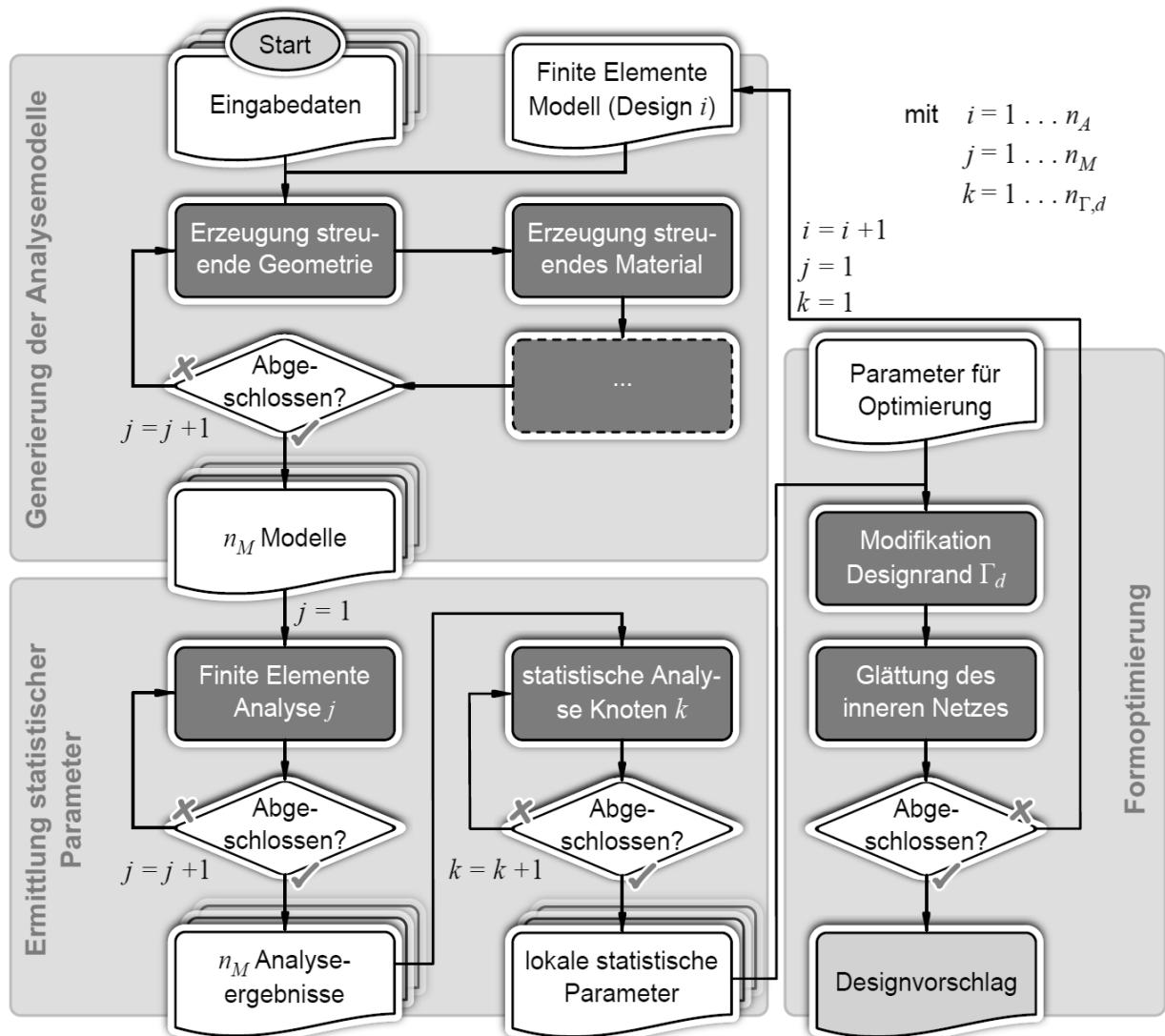


Abbildung 3 Das entwickelte Prozessmodell zur Formoptimierung von Mikrobauteilen unter Robustheitsaspekten

Alle weiteren Methoden und Werkzeuge aus der letzten Projektphase bauen auf der in Phase 3 entwickelten Methode zur automatisierten Modellierung der Kornstruktur von Bauteilen inklusive der darin enthaltenen Defekte und Poren auf. Dieses Werkzeug konnte unter anderem als Beitrag in den virtuellen Produktentstehungsprozess mit einfließen, der im Zentrum für Integrierte Mikrofertigung (ZIM) eine bedeutende Rolle spielt.

Die Generierung der Kornstruktur wird hier noch einmal kurz zusammengefasst. Beim sogenannten Finite Elemente basierten Ansatz wird die CAD-Geometrie des Bauteils direkt diskretisiert. Das Finite Elemente Netz kann auf konventionelle Weise unter Verwendung eines Finite Elemente Präprozessors erzeugt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass das Netz sich zum Bauteilinnern hin nicht vergrößert. Die Größe der Finiten Elemente sollte im relevanten Bauteilvolumen in etwa gleich sein. Daneben ist eine definierte Menge an Keimen zu erzeugen. Das diskretisierte Modell wird in der Folge in einen Polykristall unterteilt. Dies geschieht durch eine Zuweisung der Finiten Elemente zu den Keimen. Um dies zu erreichen, wird in einem ersten Schritt der Schwerpunkt jedes Elementes anhand dessen Knoten bestimmt. Im anschließenden Schritt wird für sämtliche Elemente der Abstand deren Schwerpunkte zu den Keimen bestimmt. Die Zuweisung eines Elementes zu einem Keim erfolgt auf Basis der geringsten Distanz. Die Gruppe der Elemente um einen Keim repräsentiert damit das aus ihm entstehende Korn. Über einen wählbaren Radius können unterschiedliche Porositätsgrade erzeugt werden. Elemente, deren geringster Abstand zu einem Keim größer ist, als der vorgegebene Radius, werden verworfen und es entstehen Poren. Ein zunehmender Radius ermöglicht die Abbildung von Kornwachstum, wobei sich die Porosität bis zum Erreichen eines porenfreien Zustandes kontinuierlich verringert (Abbildung 4). Für jeden Zwischenschritt kann ein Finite Elemente Modell

gesichert werden, so dass das Bauteil bei gleicher Kornstruktur, aber verschiedenen Porositätsgraden betrachtet werden kann. Abschließend werden die kristallographischen Orientierungen festgelegt.

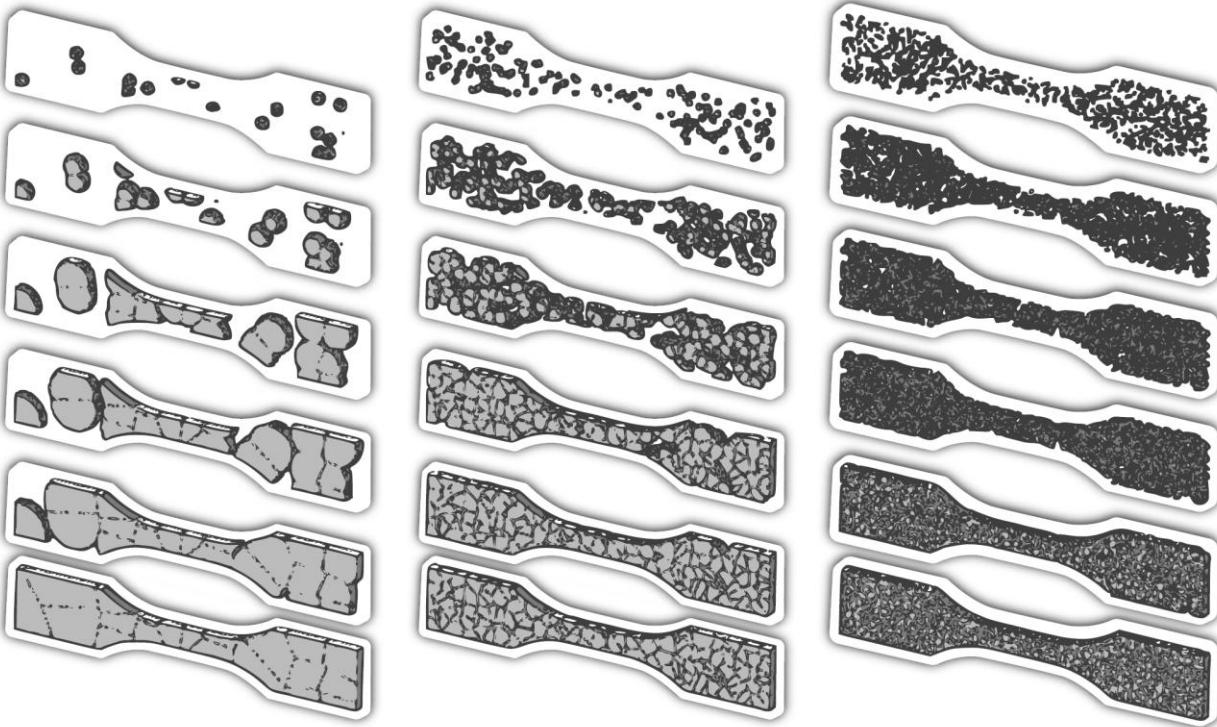


Abbildung 4 Eine mit Hilfe des Finite Elemente basierten Ansatzes erzeugte Zugprobe mit 20 (links), 200 (Mitte) und 2000 (rechts) Körnern

Bei der entwickelten Formoptimierung unter Robustheitsaspekten wurden die oben genannten Einflüsse, wie Kornstruktur und Porosität berücksichtigt. Ihre Auswirkungen sollten durch den entwickelten Prozess vermindert werden. Auf Basis einer gegebenen Geometrie wurden hierzu mehrere Finite Elemente Analysen durchgeführt, bei denen jeweils Bauteile mit individuellen Kornstrukturen und/oder Porosität untersucht wurden. Anhand der Ergebnisse dieser Analysen wurden lokal statistische Daten wie die Standardabweichung oder der Variationskoeffizient der Spannung ermittelt.

In einer nachgeschalteten Formoptimierung wurden diese Daten herangezogen, um die Form des Bauteils geeignet zu variieren. In den meisten Fällen basieren Verfahren der Formoptimierung auf Kenngrößen wie beispielsweise Spannungskomponenten, Vergleichsspannungen oder Dehnungsenergien. Kritisch wird die Anwendung einer spannungsbasierten Formoptimierung bei stochastisch und/oder komplex belasteten Bauteilen. Eine aufgrund der Kornstruktur und Porosität streuende Materialstruktur von Mikrokomponenten kann sich erheblich auf Ort und Höhe von deren maximaler Belastung auswirken. Die lokal auftretenden Spannungen als Eingangsgröße für ein solches spannungsbasiertes Verfahren unterliegen damit ebenfalls Streuungen. Entscheidend für die Verbesserung eines Entwurfes, bei dem von stark streuenden Kornstrukturen auszugehen ist, war daher nicht nur die anhand einer einzelnen Stichprobe ermittelbare Belastung. Ein Prozessmodell, welches die Robustheit und Zuverlässigkeit eines solchen Bauteils durch geometrische Modifikationen erhöhen soll, musste demnach auf statistischen Parametern der Belastung aufbauen. Im Folgenden wurde daher das Prozessmodell aus Abbildung 3 entwickelt, das bei Bauteilen mit stark streuenden Kornstrukturen angewendet werden kann.

Um den genannten Zielen mit Hilfe des Prozessmodells gerecht zu werden, ist in jeder Iteration der Optimierung eine Monte Carlo Simulation vorgesehen. Sie dient der Ermittlung statistischer Parameter der lokal herrschenden Spannungen aus einer virtuellen Versuchsreihe, d. h. die Stichproben werden mit Hilfe einer definierten Anzahl an Finite Elemente Berechnungen generiert. Das Prozessmodell setzt sich damit zusammen aus einem äußeren, iterativen Teil, in welchem die eigentliche Formoptimierung durchgeführt wird und einem inneren, Monte Carlo basierten Teil zur Bestimmung statistischer Parameter. Eingangsdaten für die Monte Carlo Simulation sind ein Finite Elemente Modell, in welchem relevante Daten, wie z.B. die durch das Netz repräsentierte Geometrie, Randbedingungen und Lastfälle hinterlegt sind sowie Daten zur Generierung der Kornstruktur. Für jede der generierten Kornstrukturen wird ein individuelles Simulationsmodell erstellt. Sämtliche Kornstrukturen bestehen aus einer vorab zu definierenden und damit stets gleichen Anzahl an Körnern. Deren individuelle Lage, Form und Orientierung werden mit Hilfe der bereits beschriebenen Vorge-

hensweise automatisiert generiert. Für jedes der deterministischen Modelle wird eine Strukturanalyse durchgeführt mit dem Ziel, die lokal an den Knoten herrschenden Spannungen zu berechnen. Damit sind für jeden einzelnen Knoten des jeweiligen Modells Spannungswerte bekannt, die als Grundlage für eine anschließende statistische Analyse zur Bestimmung der Parameter der Verteilung der Grundgesamtheit dienen. Für alle den Designrand beschreibenden Knoten wird aus den anhand der berechneten Modelle ermittelten lokalen Spannungen eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ermittelt. Die Ermittlung der statistischen Parameter auf Grundlage einer endlichen Anzahl an Messdaten ist mit einer Unsicherheit behaftet. Die Parameter der Grundgesamtheit werden über entsprechende Verfahren geschätzt. Eine zentrale Rolle bei der Durchführung einer solchen statistischen Analyse von Messdaten nimmt die Kenntnis über die den Daten zugrunde liegende Verteilung ein. Ziel der statistischen Analyse ist es, Schätzwerte für die diese Verteilung charakterisierenden Parameter zu ermitteln. Für die im Rahmen dieses Projekts betrachteten lokalen Spannungen wurde angenommen, dass diese normalverteilt sind. Im Falle einer Normalverteilung kann diese eindeutig durch die Parameter Varianz und Mittelwert beschrieben werden. Die Schätzung der beiden Parameter erfolgt über eine Intervallschätzung. Für jeden der beiden Parameter wird ein sogenanntes Konfidenzintervall konstruiert. Dieses umfasst ein um den geschätzten Parameter gelegtes Intervall, das die wahre Lage des Parameters mit einem definierten Konfidenzniveau, also einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, enthält:

- Für die hier durchgeführten Untersuchungen wird ein Konfidenzniveau von 99,9% gewählt.
- Zur Bestimmung der Modifikationen der Bauteilform wird jeweils die obere Grenze dieses Intervalls herangezogen.
- Für die Konstruktion eines Konfidenzintervalls für den Mittelwert der Grundgesamtheit wird die sich aus der Varianz und dem Mittelwert der Stichprobe ergebende t-Verteilung verwendet.
- Die Konstruktion eines Konfidenzintervalls für die Varianz der Grundgesamtheit wird über die Chi-Quadrat-Verteilung realisiert. Die Werte der verwendeten Verteilungen sind entweder in tabellarischer Form hinterlegt oder können durch eine Vorschrift berechnet werden.

Diese Vorgehensweise ermöglicht bei Kenntnis der Varianz und des Mittelwertes der Stichprobe, entsprechende Vertrauensintervalle für die ihr zugrunde liegende Grundgesamtheit zu konstruieren.

Die Ergebnisse der statistischen Analyse werden anschließend für die Berechnung virtueller Knotenspannungen anhand einer Zielfunktion herangezogen, da das Programm in der Regel Spannungswerte als Eingangsgrößen erwartet. Diese virtuellen Knotenspannungen werden der der aktuellen Iteration zu Beginn zur Verfügung gestellten Ausgangsgeometrie in Form eines Analyseergebnisses zugeordnet. Das im weiteren Verlauf verwendete Analyseergebnis umfasst damit die Ergebnisse aller in der Iteration durchgeführten Einzelanalysen in Form der in der Zielfunktion verrechneten statistischen Parameter.

Die virtuellen Spannungen wiederum werden im äußeren Teil des Prozessmodells, der Optimierungsschleife, für die Modifikation der dem Designbereich zugehörigen Geometrie entsprechend einer Redesign-Regel im Rahmen einer parameterfreien Formoptimierung verwendet. Als Designvariablen dienen die Positionen der den Designrand beschreibenden Knoten. Dies bietet neben dem damit einhergehenden großen Lösungsraum den Vorteil, dass keine Parametrisierung des Modells notwendig ist. Es wurde angenommen, dass eine geringe und entlang des Designrandes möglichst homogen verlaufende Standardabweichung zu einem robusten Design führt. Ein zuverlässiges Design wird erreicht, wenn entlang des Designrandes das p-Quantil unterhalb eines zu definierenden kritischen Wertes liegt und ebenfalls möglichst homogen verläuft. Darüber hinaus wurde die Hypothese aufgestellt, dass die genannten Kriterien erreicht werden können, indem in Bereichen, in denen die Kriterien nicht erfüllt sind, Material hinzugefügt wird und in Bereichen, in denen die Kriterien erfüllt sind, Material entfernt werden kann. Die Nutzung solch etablierter Homogenisierungsverfahren bot sich aus verschiedenen Gründen an. Einerseits handelt es sich um in der Praxis bereits erfolgreich angewendete, effiziente Verfahren. Andererseits kann auch bei Verwendung anderer Beanspruchungsgrößen ein gutes Konvergenzverhalten erreicht werden. Darüber hinaus wird bei Verwendung von Optimalitätskriterien-Verfahren der Forderung nach einer Anwendbarkeit auch bei komplexen und praxisnahen Modellen Rechnung getragen. Gegebenenfalls wird aufgrund der modifizierten Lage der Designknoten eine Glättung des bauteilinneren Netzes durchgeführt, um eine hohe Elementqualität gewährleisten zu können. Nach Prüfung eines Abbruchkriteriums wird entweder eine weitere Iteration, also ein Durchlaufen einer weiteren inneren und äußeren Schleife, angestoßen oder der Prozess beendet. Das Ergebnis wird in Form eines Designvorschlags, dessen neue Berandung innerhalb des Variationsgebietes durch die modifizierten Knotenpositionen beschrieben wird, bereitgestellt. Ergebnis ist eine Bauteilform, die – trotz Kornstruktur etc. – ein robusteres Verhalten als das Ausgangsdesign aufweist.

Der Prozess wurde automatisiert und in Form eines Moduls für das Softwarepaket G/Struct implementiert (siehe Kapitel *Implementierung*). Der hier erläuterte Ansatz ermöglicht somit durch eine Formoptimierung die Reduktion beispielsweise des Einflusses der aufgrund ihrer Anisotropie für Mikrobauteile relevanten Kornstruktur. Mit Hilfe des Ansatzes konnte so die Robustheit von Bauteilen mit streuenden Werkstoffeigenschaften erhöht und so ein Beitrag für die Dimensionierung solcher Bauteile geleistet werden.

Implementierung (AP1, AP2, AP4)

Die Implementierung des in Abbildung 3 dargestellten Prozessmodells geschah in Form des Softwarepaket G/Struct, dessen Basis bereits am Markt etablierte und kommerziell verfügbare Finite Elemente Pre-/Postprozessoren und Solver bilden. Der Anwender wird durch eine grafische Benutzeroberfläche geführt, kann aber auch durch die Definition einzelner Parameter innerhalb einer Input-Datei auf einen Batch-Modus zurückgreifen (Abbildung 5). Dem Entwickler wurde damit eine Umgebung zur Modellierung, Simulation und Optimierung von Bauteilen mit streuender Kornstruktur zur Verfügung gestellt.

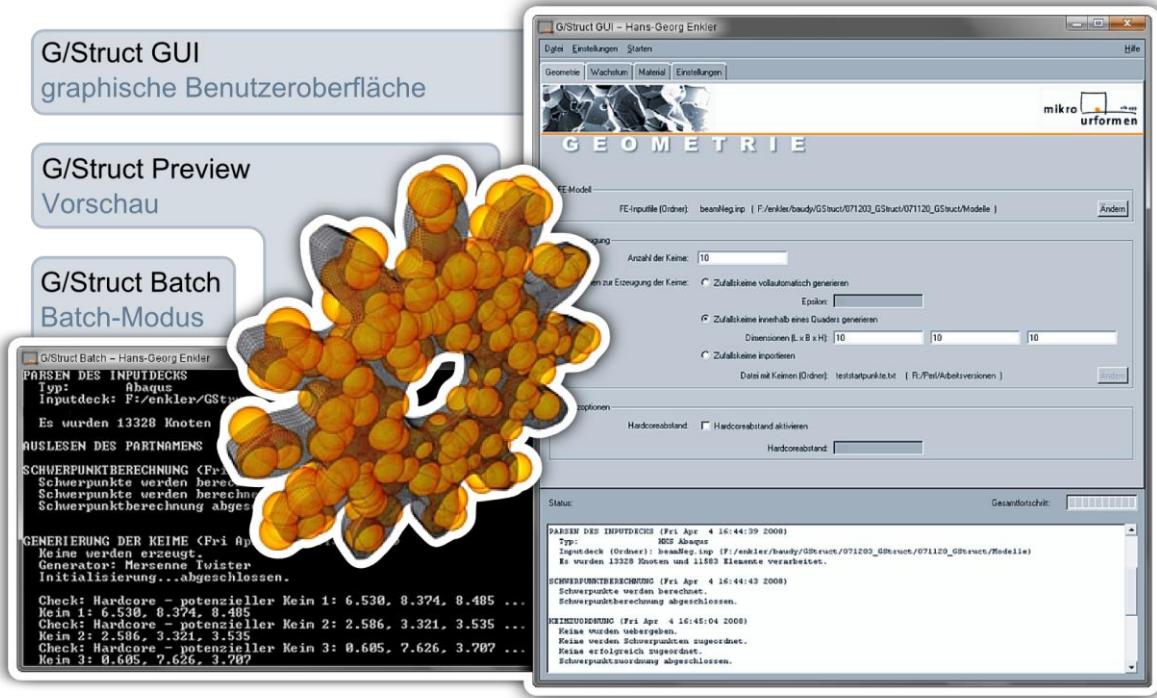


Abbildung 5 Das entwickelte Softwarepaket G/Struct mit Benutzeroberfläche, Vorschaufunktion und Batch-Modus für statistische Analysen

Das Softwarepaket G/Struct ist ein modular aufgebautes System. Es ermöglicht die Einbindung von Finite Elemente Modellen mit beliebig vielen Lastfällen und Randbedingungen. Eine Parametrisierung des Modells ist auch für das entwickelte Formoptimierungsverfahren nicht erforderlich. Als Finite Elemente Solver können MSC.Nastran sowie Abaqus eingebunden werden. Als modular aufgebautes System können, dank der offenen Schnittstellen, weitere Solver eingebunden werden. Durch die Ankopplung an die kommerziellen Präprozessoren MSC.Patran und Abaqus/CAE können außerdem die relevanten, im Umfeld der gängigen CAD- und CAE-Werkzeuge erforderlichen Schnittstellen verwendet werden. Damit ist es möglich, eine beliebige CAD-Geometrie einzulesen und innerhalb von G/Struct zu verwenden. Die offenen Schnittstellen, die Kompatibilität zu kommerziellen Finite Elemente Prä- und Postprozessoren und Sovern sowie die Möglichkeit, bereits existierende CAD-Modelle ohne die Notwendigkeit von Modifikationen direkt verwenden zu können, erlauben eine schnelle und einfache Einbindung des Softwarepaket in reale Entwicklungsprozesse, unter anderem im Rahmen des ZIM. Durch die Kopplung der Module von G/Struct wurde eine geschlossene Prozesskette vom ersten Konzept bis hin zur optimierten Geometrie erreicht.

Eine Berücksichtigung der Streuung von Wirkflächenpaaren eines Systems, d.h. der Abweichung von der gewünschten Soll-Geometrie, bedingt durch Streuungen in der Fertigungsgenauigkeit, kann direkt bei der Geometrieerstellung erfolgen. Einzelheiten hierzu werden im nachfolgenden Abschnitt behandelt. Eine Einbindung von G/Struct in ein solches Prozessmodell ist ebenfalls möglich.

Alle relevanten Parameter für die Generierung einer Kornstruktur werden vom Benutzer über ein Inputfile angegeben. Dessen Erzeugung wird durch die Verwendung der grafischen Benutzeroberfläche G/Struct erleichtert. Über eine schnelle Vorschaufunktion kann die mit den vom Benutzer angegebenen Daten entstehende Kornstruktur vorab grob abgeschätzt und betrachtet werden. Die Vorschau erfolgt mit Hilfe des Standards VRML.

Systembetrachtung (AP1, AP3, AP4)

Im Mikrobereich müssen Systeme mit relativ großem Spiel zwischen den einzelnen Bauteilen ausgelegt werden, um den fertigungsbedingten Schwankungen der Geometrie ohne Funktionsverlust gerecht werden zu können. Dadurch werden noch mehr Unsicherheiten im System erzeugt, da die Komponenten mehr Bewegungsfreiraum haben, als in konventionellen, makroskopischen Systemen. Die Einflüsse dieser Schwankungen auf die Ausgangsgrößen des Systems wurden anhand virtueller Modelle des Demonstrators, d.h. anhand des Mikroplanetengetriebes untersucht (Abbildung 6).

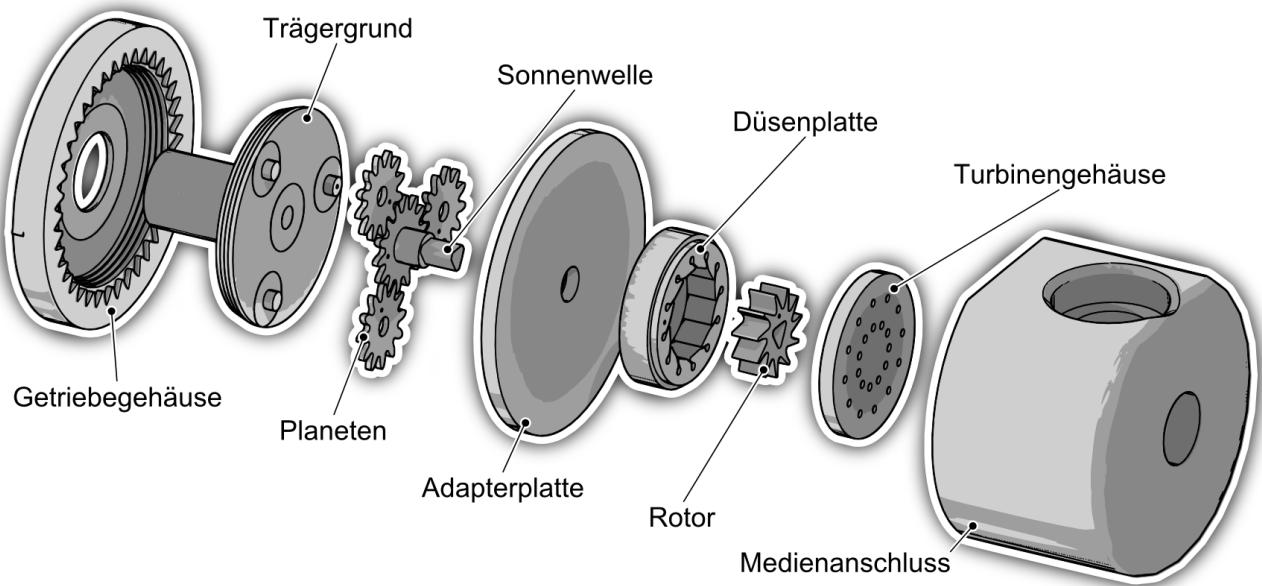


Abbildung 6 Das untersuchte Demonstratorsystem mit Turbine und Planetengetriebe

Die Modellerstellung begann mit der Untersuchung, welche geometrischen Eigenschaften makroskopischer Getriebe häufig Schwierigkeiten bereiten, die Funktionsfähigkeit des Systems betreffend. Diese Faktoren wurden dann auf das Mikroplanetengetriebe übertragen und das Spektrum ihrer Streuungen abgeschätzt. Die drei betrachteten Ausgangsgrößen wurden auf Basis bestehender makroskopischer Vorkenntnisse ausgewählt. Eine Reihe zunehmend komplexerer, vollständig parametrisierter Modelle wurde abgeleitet, die viele bzw. alle der betrachteten Einflussfaktoren beinhalteten. Das detaillierteste Modell basiert auf einer hybriden Mehrkörpersimulation, welche mit einer Finite Elemente Analyse gekoppelt wurde.

Es ist bekannt, dass alle variierbaren Faktoren nicht mit gleicher Gewichtung in einen Prozess einfließen. In der Regel gibt es eine reduzierte Menge an Parametern, die das System besonders stark beeinflussen. Um herauszufinden, ob das Demonstratorsystem ebenfalls dieser Regel folgt, wurde eine Sensitivitätsanalyse mit allen variierbaren Faktoren durchgeführt. Die 43 Freiheitsgrade konnten dabei in zwei Gruppen funktional ähnlicher Parameter aufgeteilt werden, die nacheinander untersucht werden konnten, wodurch die Dimension des Versuchsraums reduziert wurde. Dadurch war ein Vergleich der Leistungsfähigkeit mehrerer etablierter Methoden zur Sensitivitätsanalyse möglich, da die zu Anfang sehr eingeschränkte Kenntnis der Systemantwort auf geometrische Abweichungen es schwer machte, die bestgeeignete Methode vorherzusagen. Diese Studie beinhaltete alle gängigen Optimierungsalgorithmen, wie Zwei- und Drei-Ebenen-Methoden oder Optimalitätskriterien. Nachdem das erste, kleinere Parameterset im Detail untersucht worden war, konnten zwei Drittel der Parameter im nächsten Schritt vernachlässigt werden. Die zweite Studie umfasste einen weitaus größeren Suchraum, daher wurde hier nur die bis zu diesem Punkt am besten arbeitende Methode angewendet, das D-Optimale Design. Das Ergebnis dieser aufwändigen Versuchsdurchführung war, dass sich von den ursprünglichen 43 Freiheitsgraden nur elf als relevant erwiesen, um die Schwankungen der Ausgangsgrößen zu beschreiben (Abbildung 7). Sechs weitere Parameter wurden als potenzielle Kontrollfaktoren für die Optimierungsläufe identifiziert.

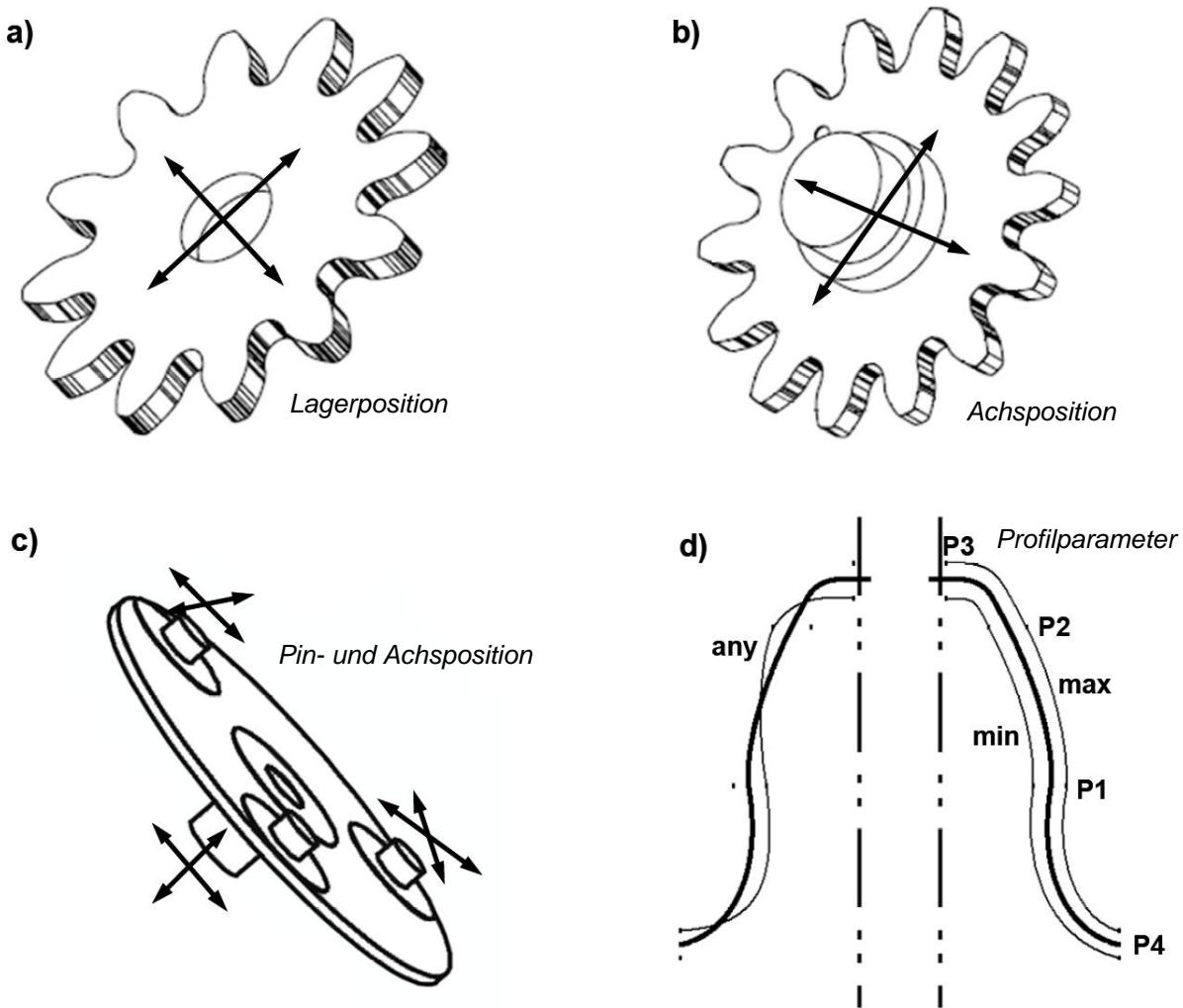


Abbildung 7 Geometrische Parameter, die im Modell berücksichtigt wurden: a) Lagerposition im Planetenrad, b) Achsposition des Sonnenrades, c) Pin- und Achsposition auf dem Planetenträger, d) Profilparameter mit Beispielen für eine Profilvariation

Parallel zu dieser Untersuchung der Relevanz einzelner Parameter wurde eine Validierung des Simulationsmodells anhand eines realen Prüfstandsversuchs in Kooperation mit Teilprojekt A1 durchgeführt.

Im Anschluss konnte mit den Robustheitsstudien unter Verwendung der identifizierten 17 statistisch schwankenden Parameter begonnen werden. Mehrere etablierte stochastische Methoden und Extrapolationsverfahren wurden bezüglich ihrer Tauglichkeit und Leistungsfähigkeit getestet. Von hier an war nicht nur die Vorhersagequalität von Interesse, sondern auch die Menge der Proben, die benötigt werden, um diesen Wert zu erhalten. Es ist für die Optimierung extrem wichtig, dass die statistischen Kennwerte mit minimalem Rechenaufwand ermittelt werden. Die Vorhersagequalität wurde mit einem Design verglichen, welches aus einer Monte-Carlo-Simulation ermittelt wurde. Für Robustheitsuntersuchungen eigneten sich die mit wenigen Stichproben zurechtkommenden, momentenbasierten linearen Näherungsverfahren nicht sehr gut. Die Latin Hypercube Versuchsdesigns erzielten die gleichen Ergebnisse wie Monte-Carlo-Schemas, allerdings war nur ein Bruchteil der Anzahl an Stichproben nötig, daher wurden diese als geeignetes Mittel ausgewählt (Abbildung 8).

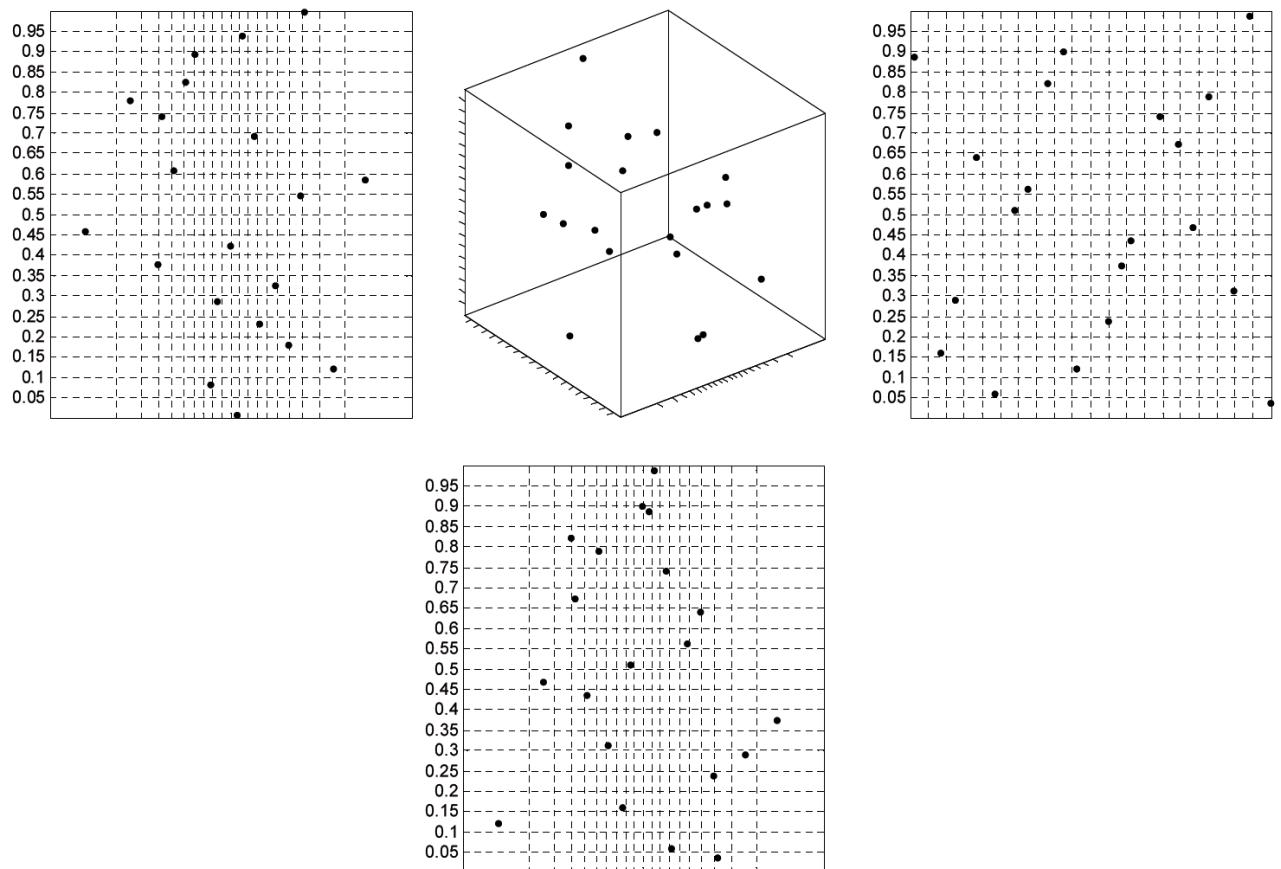


Abbildung 8 Dreidimensionales Beispiel eines Latin Hypercube mit zwei gleichverteilten und einer normalverteilten Zufallsvariablen. Die ebenen Projektionen zeigen, dass jedes Intervall nur durch eine Stichprobe abgedeckt wird

Damit waren alle Vorbereitungen für die Optimierung getroffen und das Simulationsmodell wurde entsprechend vorbereitet. Die verbleibenden diskreten Parameter wurden entfernt, da diese bei den meisten Optimierungsstrategien Probleme bereiten und die Modellgenauigkeit wurde etwas reduziert, um weitere Verbesserungen in der Rechenzeit zu erreichen.

Bevor mit der eigentlichen Optimierung gestartet wurde, wurde zunächst grob abgeschätzt, in welcher Höhe Verbesserungen zu erwarten sind. Dazu wurde eine Parameterstudie durchgeführt, bei der ein Parameter nach dem anderen bis zu den Grenzen seines erlaubten Toleranzbereichs variiert wurde (Abbildung 9). Die Ergebnisse wurden hinsichtlich ihrer Mittelwerte und Tendenzen gegenüber den Nominalwerten verglichen.

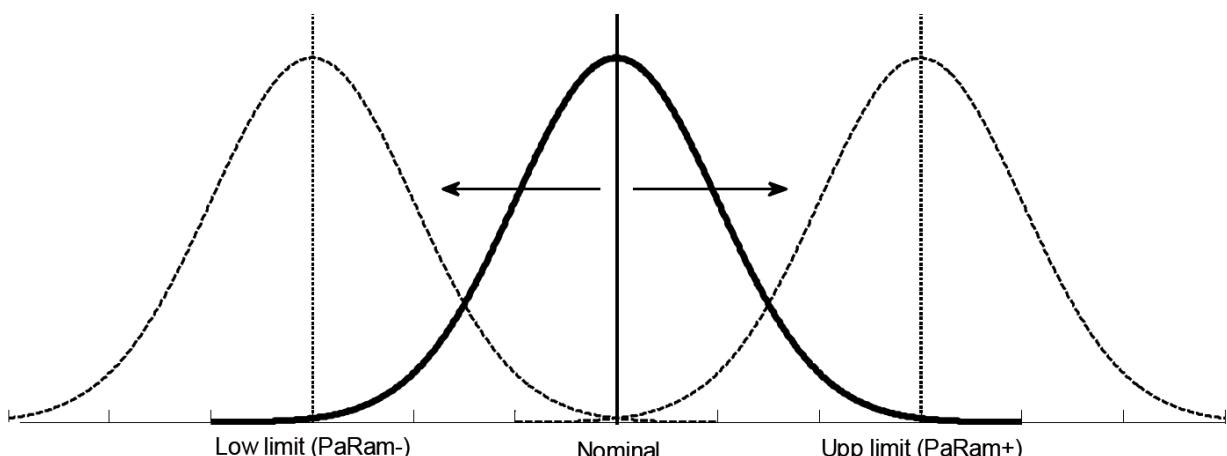


Abbildung 9 Nominalwert des Geometriepunkts wird an die untere und obere Grenze des Toleranzbereichs verschoben

Dabei konnte ermittelt werden, in welche Richtung die Parameter variiert werden müssen, um eine Verbesserung zu erzielen. Dabei gibt es mehrere Möglichkeiten. Wenn in keiner der beiden Extremlagen eine Verbesserung zu erkennen ist, liegt das Optimum dazwischen, ist eine Extremlage positiv, dann gibt es eine bevorzugte Optimierungsrichtung. Wenn in beiden Extremlagen eine Verbesserung erkennbar wird, kann eine Optimierung in beide Richtungen erfolgen. Diese Ergebnisse wurden berechnet, indem bei jeder Simulation nur ein Parameter variiert wurde. Es konnten daher keine Informationen über die gegenseitige Beeinflussung der Parameter gewonnen werden, reale Beispiele können andere Optimierungsergebnisse liefern. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass für alle betrachteten Ausgangsgrößen Potenzial vorhanden ist, das System zu optimieren, allerdings verhalten sich die Optimierungsparameter für jede der drei untersuchten Ausgangsgrößen unterschiedlich, was eine der größten Herausforderungen bei der Optimierung mit mehreren Zielgrößen ist.

Für die Optimierung wurden unterschiedliche Algorithmen verglichen. Die Beobachtungen unterstrichen die relativ geringe Sicherheit linearer Robustheitsabschätzungen und die Notwendigkeit, bessere Alternativen zu verwenden. Insgesamt wurde beobachtet, dass eine Optimierung im Sinne einer Minimierung der Streuung auch eine Reduktion des Mittelwertes nach sich zog, im umgekehrten Fall eine Minimierung des Mittelwerts zu einer Zunahme der Streuung der Ausgangsparameter führt. Daher ist der Zusatzaufwand einer robustheitsbasierten Optimierung in jedem Fall gerechtfertigt.

Kopplung von Bauteil- und Systembetrachtung (AP4)

In der Regel wird für die Simulation eines Systems auf ein Mehrkörpersystemsimulations-Softwarepaket zurückgegriffen. In Mehrkörpersystemen werden im klassischen Sinne ausschließlich Starrkörper zur Modellierung verwendet. Ist wie im vorliegenden Fall der Spannungszustand innerhalb der sich bewegenden Bauteile von Interesse, so ist der klassische Ansatz jedoch nicht mehr ausreichend. Durch die Integration deformierbarer Körper in die Mehrkörpersystemsimulation können auch die Belastungen innerhalb eines Bauteils angenähert werden. Mit einem solchen flexiblen Mehrkörpersystem können somit Wechselwirkungen zwischen Bauteil und System erfasst werden. Für Voruntersuchungen wurde ebenfalls ein Mehrkörpersystem-simulationsmodell entwickelt. Da die Untersuchungen des Spannungszustandes innerhalb eines Bauteils im Vordergrund der Untersuchung der Kornstruktur standen, wurde anschließend allerdings mit der Finiten Elemente Methode auf das Standardverfahren zur Berechnung flexibler Strukturen zurückgegriffen. Die durchgeführten Untersuchungen konzentrierten sich im Sinne einer strukturdynamischen Analyse mit Hilfe der Finiten Elemente Methode auf eine sich zeitliche verändernde Antwort, beispielsweise einem sich zeitlich verändernden Spannungsverlauf. Diese resultiert aus sich während der Simulation ändernden Lasten, die z.B. während eines Zahneingriffes oder bei Stößen aufgrund von Spiel auftreten. Für lineare Problemstellungen eignen sich modal-basierte Ansätze zur Ermittlung derartiger Verläufe. Sie bieten sich aufgrund der vergleichsweise geringen Rechenzeiten u.a. bei der Betrachtung mehrerer Lastfälle an. In vielen Anwendungen sind sie eine der effizientesten der hierzu verfügbaren Methoden. Trotz geringer Deformationen in den durchgeführten Studien, lag aufgrund der Einführung von Kontaktflächen, die durch die gewünschte Interaktion der Zahnradflanken bedingt war, ein nichtlineares Problem vor. Der modale Ansatz war daher ungeeignet. Erforderlich war ein direktes Integrationsverfahren, welches die sukzessive Lösung der dynamischen Gleichung zu n Zeitpunkten, unterteilt in Inkremente der Größe Δt ermöglichte. Für die Lösung derartiger Problemstellungen existieren implizite und explizite Verfahren. Die Bewegungsgleichungen werden bei diesen Verfahren nicht zwingend für jeden Zeitpunkt t exakt erfüllt, sondern nur in diskreten Zeitintervallen Δt . Die Genauigkeit der Lösung ist daher abhängig von der Wahl des Zeitschritts Δt . Der explizite Ansatz erwies sich aufgrund der Notwendigkeit einer äußerst geringen kritischen Schrittweite als impraktikabel. Beim impliziten Ansatz wird im Vergleich zum expliziten Ansatz für den einzelnen Analyselauf weitaus weniger Zeit benötigt, die gewünschte Effizienz wurde aber noch nicht erreicht. Eine anschließende Studie bestätigte den äußerst geringen Beitrag der auftretenden Beschleunigungen und Trägheiten auf die Belastung der Bauteile. Es wurde daher davon ausgegangen, dass deren Einfluss vernachlässigt werden kann. Darüber hinaus wurde in den Untersuchungen keine Reibung berücksichtigt. Die Lagerdämpfung konnte aufgrund der geringen Rotationsgeschwindigkeiten niedrig gehalten werden. Das Verhalten wurde als anisotrop, aber linear-elastisch angenommen. Mit diesen Annahmen konnte das ursprünglich dynamische Problem in ein quasistatisches Problem und damit in eine Serie statisch betrachteter Situationen überführt werden. Damit konnte als wesentlicher Vorteil des Verfahrens der in seiner Bedeutung reduzierte Zeitschritt Δt frei gewählt werden. Mit Hilfe dieses Ansatzes lagen die Rechenzeiten auf einem für statische Analysen mit Kornstruktur akzeptablen Niveau.

Mit der entwickelten Software G/Struct zur Optimierung von Bauteilen mit streuender Kornstruktur wurde auf Basis des im vorherigen Absatz genannten quasi-statischen Ansatzes zusätzlich zu einzelnen Mikrobauteilen das Demonstratorssystem des Mikroplanetengetriebes und somit ein komplexes System untersucht. Die dabei durchgeführten Studien zeigen, dass die Kornstruktur und insbesondere die Porosität bei der Auslegung solcher Mikrobauteile und daraus aufgebauter Systeme berücksichtigt werden müssen. Aus diesem Grund werden in jeder Iteration des Optimierungsprozesses zunächst statistische Analysen des Bauteils

oder Systems durchgeführt, bevor in einer nachgeschalteten Formoptimierung die durch die schwankenden Eingangsparameter hervorgerufene Variabilität des Bauteilverhaltens reduziert wird. Das vorgeschlagene Prozessmodell bietet die Möglichkeit, dem Entwickler ein tieferes Verständnis für einen optimalen Bauteil- und Systementwurf zu verschaffen. Damit erweitert die erarbeitete Methodik die Anwendbarkeit bisheriger Ansätze durch die Erfassung der Einflüsse von Unsicherheiten bei der Optimierung.

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Die im Rahmen dieses Teilprojekts verfolgten Ansätze beschäftigen sich einerseits mit der Optimierung von Bauteilen und Systemen hinsichtlich der Streuungen des Materialgefüges, genauer der Kornstruktur und andererseits der Optimierung der Lage der Nennmaße eines Bauteils bei gegebener Toleranzfeldbreite, ebenfalls mit dem Ziel eines robusten Bauteil- und Systemverhaltens. Die Integration beider Ansätze – und damit von werkstoff- und geometriebedingten Streuungen – würde eine ganzheitliche Betrachtung ermöglichen. Aufgrund der bereits in den beiden einzelnen Prozessen erforderlichen hohen Rechnerkapazität wird für deren Verknüpfung eine geeignete Vorgehensweise zur Reduktion der Anzahl der Analysen erforderlich werden. Ein Ansatz für die Steigerung der Effizienz der in diesem Projekt entwickelten Optimierungsmethoden mit Hilfe der sogenannten polynomial chaos expansion und Antwortflächenverfahren wäre denkbar.

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Die Kooperationen mit anderen Teilprojekten bzw. Arbeiten des Sonderforschungsbereiches werden im Folgenden grob in die Bereiche „Allgemeine Zusammenarbeit, Validierung“, „mikrospezifischer Produktentwicklungsprozess (μ PEP), Demonstratorenentwicklung“ und „durchgängige Simulation“ eingeordnet, um die Struktur der Zusammenarbeit erkennen zu lassen.

Allgemeine Zusammenarbeit, Validierung

Gemeinsam mit den Teilprojekten A1, D1 und D2 konnte eine Erweiterung des Dimensionierungskonzeptes für Mikrobauteile vorgenommen sowie das Toleranzkonzept für mikromechanische Systeme, um den zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten, vorangetrieben werden. Hierzu fanden neben der Zusammenarbeit im Rahmen des Arbeitskreises „Dimensionierung“ auch Kooperationen auf bilateraler Ebene statt.

Um eine Validierung von experimentellen Ergebnissen und Simulationsresultaten vornehmen zu können, fand eine enge Zusammenarbeit zwischen mehreren Teilprojekten statt. So wurden Daten zu den idealen Referenzgeometrien sowie den vorgesehenen Toleranzen seitens des Teilprojektes Z2 für die Simulation des Demonstratorsystems zur Verfügung gestellt. Um einen Vergleich der Simulationsdaten mit den in Teilprojekt A1 am dort entwickelten Prüfstand zu ermöglichen, wurde neben Teilprojekt A1 auch in enger Kooperation mit dem Teilprojekt C4 eine Vorgehensweise zur Abbildung realer Bauteile in der Simulation erarbeitet. Hierzu wurde gemeinsam an Herangehensweisen zur Vermessung und Virtualisierung geforscht. So erhielt beispielsweise das Teilprojekt A2 von Teilprojekt C4 Geometriedaten der in Teilprojekt A1 getesteten Mikrobauteile aus der Vermessung. Umgekehrt wurden seitens des Teilprojektes A2 Simulationsergebnisse bereitgestellt, um diese in die Qualitätssicherung einfließen lassen zu können.

Zum Abgleich mit dem Versuch wurden mit Teilprojekt A1 Betriebs- und Leistungsdaten ausgetauscht und die jeweiligen Ergebnisse gemeinsam diskutiert. Zur Einbeziehung von Frikitionsaspekten in die Systembeachtung wurden mit Teilprojekt D3 Kennwerte zum Reibungsverhalten sowie Simulationsergebnisse ausgetauscht. Weiterhin wurden beispielsweise virtuell generierte Kornstrukturen anhand von daraus abgeleiteten Schliffbildern in den Teilprojekten D1 und D2 mit denselben Werkzeugen charakterisiert wie die dort untersuchten realen Proben. Somit konnte eine Abstimmung der Charakteristika virtueller Kornstrukturen mit Hilfe realer Kornstrukturen erfolgen.

Mikrospezifischer Produktentwicklungsprozess (μ PEP), Demonstratorenentwicklung

Die Erkenntnisse aus der Simulation konnten in den Teilprojekten A1, A3 sowie den weiteren sich mit der Herstellung und Qualitätssicherung befassenden Teilprojekten bei der Entwicklung und Optimierung der Demonstratoren genutzt werden. So konnte beispielsweise das Design des Turbinenrotors gemeinsam überarbeitet werden. In Kooperation mit Teilprojekt A1 wurde zudem die Wissensdatenbank MyBoK (Micro Book of Knowledge, s. Bericht des Teilprojektes A1) um das Wissen aus der Modellierung und Simulation ergänzt.

Durchgängige Simulation

Um eine möglichst durchgängige virtuelle Begleitung des Produktentstehungsprozesses zu ermöglichen, fand eine enge Zusammenarbeit der Teilprojekte A2 und A4 statt. Neben einem bilateralen Austausch erwiesen sich hierbei die Arbeitskreise als hilfreiches Instrument. So wurden beispielsweise in den vergangenen Phasen gemeinsame Schnittstellen definiert und in die spezifischen Werkzeuge implementiert. Des Wei-

teren konnte durch einen Austausch von Simulationsmodellen eine konsequent durchgängige Vorgehensweise und somit das Potenzial zur Zeitersparnis durch eine Weiterverwendbarkeit bereits existierender Modelle aufgezeigt werden.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Der DFG-geförderte Sonderforschungsbereich 440 befasste sich von 1997 bis 2009 mit der Montage hybrider Mikrosysteme (Handhabungs- und Fügetechniken in der Klein- und Mittelserienfertigung). In Teilprojekt A5 „Systemplattformen zur hybriden Mikrointegration“ wurden unter anderem Mikrofederkontaktelemente und allgemein flexible Halbleiter erzeugt. Diese sind gegen Zug- und Scherbelastung sehr empfindlich, weswegen auch rechnergestützte Analysen zum Einsatz kommen. Die verwendeten Materialien sind jedoch nicht mit denen des Sonderforschungsbereiches 499 vergleichbar. Das Teilprojekt B4 „Mikroelektronenstrahlschweißen“ befasste sich mit dem Fügen in der Mikrotechnik. Hierzu wurde auch eine Simulation des Prozesses durchgeführt, um beispielsweise die thermische Beanspruchung mikrosystemtechnischer Komponenten während des Fügevorgangs abschätzen oder Aussagen zu energetischen Wechselwirkungen zwischen Strahl und Materie treffen zu können. Auch in den Teilprojekten B3 „Mikrolöten – Prozess- und Applikationsentwicklung“ und D1 „Entwicklung von Lotwerkstoffen“ kamen zur Beurteilung der thermischen Belastung der Mikrobauteile während des Fügeprozesses numerische Simulationen zum Einsatz. Keines der angesprochenen Forschungsthemen überdeckt sich mit den Arbeiten des Teilprojektes A2 des Sonderforschungsbereiches 499.

Der ebenfalls durch die DFG von 1998 bis 2010 geförderte Sonderforschungsbereich 516 befasste sich mit der Konstruktion und Fertigung aktiver Mikrosysteme. In Teilprojekt A1 „Auslegung aktiver Mikrosysteme“ wurden Simulationen bezüglich der elektromagnetischen, mechanischen und thermischen Systemgrößen durchgeführt, welche anschließend als Optimierungskriterien herangezogen wurden. So wurde beispielsweise die Wirkung oberschwingungsbehafteter Speiseströme mittels numerischer Methoden analysiert. Teilprojekt A3 „Rechnerunterstützte Entwurfsumgebung“ entwickelte zur Unterstützung des Entwurfes aktiver Mikrosysteme rechnerbasierte Werkzeuge, die die Simulation nasschemischer Ätzprozesse und der automatischen Optimierung lithographischer Masken erlauben. Teilprojekt A6 „Steuerung und Regelung aktiver Mikrosysteme“ entwickelte simulationsgestützte Steuerungs- und Regelungsalgorithmen für eine kontrollierte Bewegung und genaue Positionierung aktiver Mikrosysteme. Ebenfalls mit der Simulation im Mikrobereich befasste sich Teilprojekt B4 „Sensorführung von Mikromontageprozessen“, beispielsweise zur Senkung der Zykluszeiten bei der Mikromontage. In Teilprojekt B5 „Baueinheiten zur Montage aktiver Mikrosysteme“ wurden unter anderem Finite-Elemente-Analysen zur Simulation elektrostatischer Greifkräfte herangezogen, um das Elektrodendesign zu optimieren. Zur Umsetzung einer elektromagnetischen Lagerung wurden in Teilprojekt B7 „Fertigung von Funktionskomponenten für elektromagnetische Mikroaktoren“ zur Erstellung eines Prototypen zunächst Simulationen zur Hubkraft durchgeführt. In Teilprojekt C3 „Aktive Linearführungen für Mikrosysteme“ konnten durch FE-Simulationen Strukturparameter für Luftlager untersucht und optimiert werden. Zusätzlich wurden Regelkonzepte basierend auf Co-Simulationen entwickelt. Unter Verwendung von Simulationen wurde in Teilprojekt C5 „Wegmesstechnik“ beispielsweise die Geometrie eines Wegsensors spezifiziert. Keiner der genannten Forschungsschwerpunkte überschneidet sich mit den Arbeiten des Teilprojektes A2 des Sonderforschungsbereiches 499.

Am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM wurde für die Simulation des Ziehens von Wolframdrähten für die Glühlampenproduktion der Einfluss der Mikrostruktur erkannt. Die Körner wurden mikromechanisch betrachtet, um deren Auswirkungen zu analysieren. Dieses Verfahren ist dem in Teilprojekt A2 durch die diskrete Repräsentation von Körnern am ähnlichsten. Soweit bekannt, wurden hierbei jedoch beispielsweise keine Poren berücksichtigt. Des Weiteren wurden keine komplexen Mikrosysteme und damit keine Interaktion mehrerer Bauteile untereinander untersucht.

Daneben wurde am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM an der Übertragung von realen Polysiliziumstrukturen in Finite-Elemente-Simulationen gearbeitet. Es wurde eine Methode entwickelt, um mittels Electron Back Scatter Diffraction (EBSD) aufgenommene Gefügebilder in Finite-Elemente-Simulationen einzubeziehen zu können. Somit sind zur Erzeugung von virtuellen Kornstrukturen jeweils reale Schliffbilder erforderlich. Für eine statistische Analyse, wie sie in Teilprojekt A2 erforderlich ist, wurde der Weg über rein virtuell erstellte Kornstrukturen unter Zuhilfenahme der vorgestellten Validierung mit Teilprojekt D1 bevorzugt.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen (Auszug)

a) Arbeiten, die in Publikationsorganen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung zum Zeitpunkt der Antragstellung erschienen oder endgültig angenommen sind, und Buchveröffentlichungen

- (1) ALBERS, Albert; ENKLER, Hans-Georg; Leslabay, Pablo: *Methods for Simulating and Optimizing Molded Micro Components and Systems*. Microsystem Technologies, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, Volume 16, April 2010, S. 1517-1527, DOI 10.1007/s00542-010-1073-1
- (2) ALBERS, Albert; LESLABAY, Pablo: *Modeling, Sensitivity Analysis and Optimization of Mechanisms made of Micro-Molded Components*. ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences (IDETC) & Computers and Information in Engineering Conference (CIE), 30. August – 02. September 2009, San Diego
- (3) ALBERS, Albert; BÖRSTING, Peter; DEIGENDESCH, Tobias; ENKLER, Hans-Georg; LESLABAY, Pablo: *Micro Gear Validation – Improving the Correlation between Virtual and Physical Testing*. Microsystem Technologies, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, DOI 10.1007/s00542-009-0997-9
- (4) ALBERS, Albert; ENKLER, Hans-Georg: *An Approach to increase Robustness of Molded Micro Components subject to high Scatter using Adapted Shape Optimization*. 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-8), 01. – 05. Juni 2009, Lissabon
- (5) ALBERS, Albert; ENKLER, Hans-Georg; LESLABAY, Pablo: *On the Simulation of Molded Micro Components and Systems*. Microsystem Technologies, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, Volume 14, Numbers 9-11 / Oktober 2008, S. 1269-1277
- (6) ALBERS, Albert; DEIGENDESCH, Tobias; ENKLER, Hans-Georg; LESLABAY, Pablo; OERDING, Jochen: *An integrated Approach for Validating Micro Mechanical Systems*. Microsystem Technologies, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, ISSN 1432-1858

b) Andere Veröffentlichungen

- (7) ENKLER, Hans-Georg: *Rechnergestützter Entwurf von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen am Beispiel hochbelastbarer ungeformter mikromechanischer Systeme*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2010
- (8) LESLABAY, Pablo: *Robust optimization of mechanical systems affected by large system and component variability*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2009

c) Patente

keine

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit Januar 2000 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1	Albert Albers, Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c.	SO	IPEK – Institut für Produktentwicklung	2	
	2	Norbert Burkardt, Dipl.-Ing.	P	IPEK – Institut für Produktentwicklung	2	
	3	Thomas Maier, Dipl.-Ing.	SO	IPEK – Institut für Produktentwicklung	4B	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	4	Uwe Weber		IPEK – Institut für Produktentwicklung	2	
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	5	Hans-Georg Enkler, Dr.-Ing.	SO	IPEK – Institut für Produktentwicklung	39,5	13
	6	Daniela Troll, Dipl.-Ing.	SO	IPEK – Institut für Produktentwicklung	39,5	13
	7	Wissenschaftliche Hilfskraft	SH	IPEK – Institut für Produktentwicklung	19,25	SH
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	8	Technischer Mitarbeiter		IPEK – Institut für Produktentwicklung	19,75	8

Abkürzungen

SO Simulation und Optimierung

P Prüfstandsbetreuung

A Administration

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

- 1 Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, Leiter des Instituts für Produktentwicklung
- 2 Dipl.-Ing. Norbert Burkardt, Oberingenieur am Institut für Produktentwicklung
- 3 Dipl.-Ing. Thomas Maier, Mitarbeiter der Forschungsgruppe CAE/Optimierung
- 4 Uwe Weber, Mitarbeiter der EDV

Die unter 1 bis 4 aufgeführten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind am Institut für Produktentwicklung beschäftigt und werden über Landesmittel finanziert. Sie konnten nur in einem beschränkten Umfang für das geplante Forschungsvorhaben eingesetzt werden.

Prof. Albert Albers leitete den aus der Ergänzungsausstattung beantragten wissenschaftlichen Angestellten zur wissenschaftlichen Arbeit an und stellte seinen Erfahrungsschatz für das Teilprojekt zur Verfügung. Herr Norbert Burkardt unterstützte das Teilprojekt bei der Verknüpfung von Simulation und Prüfstandsversuchen. Herr Thomas Maier ist langjähriger Mitarbeiter der Forschungsgruppe CAE/Optimierung und unterstützte den aus der Ergänzungsausstattung beantragten wissenschaftlichen Angestellten bei numerischen Fragestellungen. Herr Uwe Weber ist in der EDV tätig und war verantwortlich für sämtliche CAE-seitigen administrativen Fragestellungen. Zudem beriet er das Teilprojekt bei allen programmiertechnischen Anwendungen.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

5 Dr.-Ing. Hans-Georg Enkler/

6 Dipl.-Ing. Daniela Troll

Die Aufgabe des wissenschaftlichen Mitarbeiters war die Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Berücksichtigung des Einflusses von Geometrieabweichungen auf Mikrokomponenten und mikromechanische Systeme. Er war weiterhin für die Erarbeitung eines Prozesses zur Robustheitsbewertung für Mikrobauteile und mikromechanische Systeme zuständig. Hierzu konzentrierten sich seine Arbeiten zunächst auf Sensitivitätsanalysen zur Identifikation relevanter Parameter, wobei die bereits im Rahmen der vorigen Phasen entwickelten Werkzeuge und Softwaretools verwendet wurden. Ihm oblag darüber hinaus das Zusammenführen der erarbeiteten Methoden zu einer durchgängigen Prozesskette.

Der wissenschaftliche Mitarbeiter übernahm die Präsentation der Ergebnisse auf Vortagsveranstaltungen bei nationalen und internationalen Fachtagungen und im Rahmen von Veröffentlichungen.

7 Wissenschaftliche Hilfskraft

Die studentische Hilfskraft unterstützte den wissenschaftlichen Mitarbeiter und den technischen Mitarbeiter bei der Modellierung, der Durchführung von Berechnungen und deren Dokumentation. Er führte unter Anleitung Parameterstudien durch und wertete diese gemeinsam mit dem wissenschaftlichen Mitarbeiter aus.

8 Technischer Mitarbeiter

Der technische Mitarbeiter unterstützte den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Vorbereitung und Durchführung der Simulationen und führte unter Anleitung des wissenschaftlichen Mitarbeiters programmiertechnische Routinearbeiten aus. Darüber hinaus zählten zu seinem Aufgabenspektrum die Aufbereitung von Daten sowie die parametrisierte Modellierung sämtlicher Berechnungsmodelle.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt A3

5.1.1 Titel

Prototypenfertigung – Entwicklung von Methoden zur festigkeitsoptimierten Herstellung mikrostrukturierter Prototypen und Kleinserien aus Keramik

Prototyping – development of production processes for prototypes and small series of high strength ceramic micro components

5.1.2 Projektleitung

Bauer, Werner, Dr.-Ing., geb. 02.11.1960, deutsch

Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT)

Karlsruher Institut für Technologie

Postfach 3640

76021 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-22990

Telefax: 0721 / 608-24612

E-Mail: werner.bauer@kit.edu

Knitter, Regina, Dr. rer. nat., geb. 26.01.1960, deutsch

Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT)

Karlsruher Institut für Technologie

Postfach 3640

76021 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-22156

Telefax: 0721 / 608-24612

E-Mail: regina.knitter@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

5.2.1.1 Defektausheilungsmechanismus

5.2.1.1.1 Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

In der 3. Programmphase wurde die Erkenntnis gewonnen, dass das Phänomen der Festigkeitssteigerung von ZrO_2 -Mikroproben auf Defektausheilungsmechanismen im Zusammenhang mit der thermischen Entbindeung zurückzuführen ist. Allerdings waren noch nicht alle Faktoren verstanden, die zur Defektausheilung beitragen, die zumeist an der Verrundung von Kanten und einer Abnahme der Rauheit erkennbar war. Auch wenn für ZrO_2 standardmäßig Mikrobiegefestigkeiten von ca. 2000 MPa erreicht wurden, war es das Ziel der 4. Phase, die deutlich höheren Festigkeiten von ≥ 3000 MPa genauso reproduzierbar zu realisieren. Die bis zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Erkenntnisse deuteten darauf hin, dass sowohl prozesstechnische (z.B. Ofensteuerung, Luftumwälzung) als auch materialbedingte Faktoren maßgeblichen Einfluss auf den Defektausheilungsmechanismus haben. Zu dessen Beherrschung sollte der Feedstock den effektivsten Ansatzpunkt bieten. Der Dispergatorkomponente des Bindersystems kommt die zentrale Rolle bei der Steuerung der Feedstockrheologie zu. Als grenzflächenaktiver Stoff verbessert der Dispergator nicht nur die Benetzbarekeit des keramischen Pulvers durch den unpolaren Paraffinbinder, sondern beeinflusst auch dessen Oberflächenspannung. Nach der Modellvorstellung wurde davon ausgegangen, dass durch eine Reduzierung der Oberflächenspannung die Triebkraft für die Kantenverrundung sinkt und somit eine geringere Tendenz zur Bauteilverrundung besteht. Negative Auswirkungen auf die Defektausheilung waren nicht zu erwarten, wodurch eine – hinsichtlich Formtreue und Maßhaltigkeit wünschenswerte – Entkopplung von Kantenverrundung und Defektausheilung, möglich erschien.

5.2.1.1.2 Ergebnisse

Materialbedingte Einflüsse

Der in den vorangegangenen Förderphasen entwickelte Feedstock für das Niederdruckspritzgießen weist einen Feststoffgehalt von 50 vol.% auf; die der Binderphase zugegebene Menge an Dispergator (Hypermer LP1) wird üblicherweise auf die Oberfläche des Pulvers bezogen, und war bisher bei 2,0 mg pro m^2 Pulveroberfläche konstant gehalten worden. Im Rahmen der Untersuchungen der laufenden Phase wurde bei weiterhin konstantem Feststoffgehalt von 50% die Dispergatorkonzentration in den Grenzen von 1,6 bis 3,2 mg/m^2 variiert um den Einfluss einerseits auf die rheologischen Eigenschaften des Feedstocks und andererseits auf Oberflächenqualität, Kantenverrundung, Dichte und Festigkeit der gesinterten ZrO_2 -Mikroproben zu bestimmen. Während für die rheologischen Untersuchungen (Bild 1) der Dispergatorgehalt in 0,2 mg/m^2 -Schritten variiert wurde, erfolgte aufgrund des hohen experimentellen Aufwands die mikromechanische Charakterisierung und Untersuchung des Oberflächenzustands mit größerer Schrittweite (Tabelle 1).

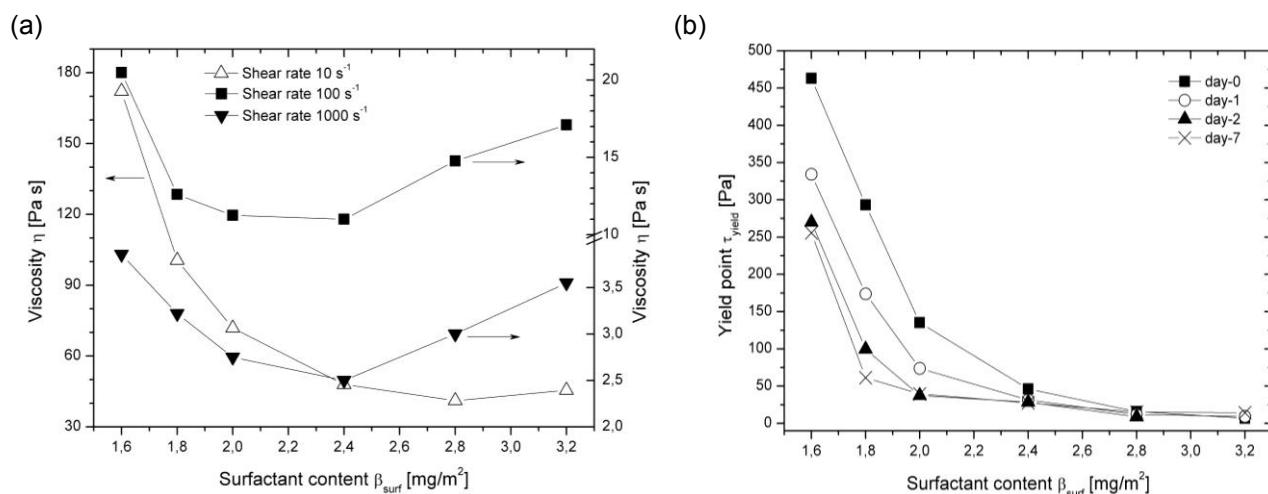


Bild 1: Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften von ZrO_2 -Feedstocks vom Dispergatorgehalt; (a) Viskosität bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten, (b) Fließgrenze nach unterschiedlichen Auslagerungszeiten.

Bild 1(a) zeigt, ausgehend von der niedrigsten Dispergatorkonzentration, zunächst erwartungsgemäß eine deutliche Abnahme der Viskosität. Während bei niedrigen Scherraten (10s^{-1}) sich die Viskositätsabnahme auch zu hohen Konzentrationen fortsetzt, wird bei mittleren und hohen Scherraten (100 bzw. 1000s^{-1}) für Werte von 2,0-2,4 mg/m^2 ein Viskositätsminimum durchlaufen. Die Fließgrenze – also die Scherspannung, die überschritten werden muss, damit eine plastische Verformung auftritt – sinkt hingegen stetig mit steigender Dispergatorkonzentration (Bild 1(b)). Daneben wurde zusätzlich ein zeitlicher Effekt beobachtet, wenn der Feedstock oberhalb der Erstarrungstemperatur gelagert wird: Formmassen mit geringen Dispergatorgehalten zeigen über einen Zeitraum von ca. 2 Tagen eine signifikante Abnahme der Fließgrenze, während diese bei Konzentrationen $> 2,4 \text{ mg}/\text{m}^2$ nahezu unverändert bleiben. Es ist anzunehmen, dass bei $< 2,4 \text{ mg}/\text{m}^2$ die Pulveroberfläche zunächst nicht vollständig mit dem Dispergator gesättigt ist, aber gleichzeitig noch Dispergatoranteile im Binder gelöst bleiben. Diesen gelingt es erst nach einer gewissen Zeit physikalisch oder chemisch an die Oberfläche anzukoppeln. Bei höheren Konzentrationen wird die vollständige Absättigung bereits während der Präparationsphase erreicht. Im Überschuss vorhandene Dispergatormoleküle tragen aufgrund ihrer Kettenlänge eher zu einer erneuten Erhöhung der Viskosität bei (siehe Bild 1(a)).

Tabelle 1: Eigenschaften gesinteter ZrO_2 -Mikroproben in Abhängigkeit der Dispergatorkonzentration

Dispergator mg/m^2	Sinterdichte* %	Rz μm	Kantenradius μm	σ_0 MPa	m -	$\sigma_{0,\text{eff}}$ MPa
1,6	97,0	$3,7 \pm 0,8$	$3,9 \pm 0,7$	1148	9,1	1245
2,0	98,7	$3,0 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,6$	1417	10,3	1512
2,4	98,9	$1,3 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,6$	1895	8,8	2059
3,2	99,6	$0,9 \pm 0,1$	$14,4 \pm 1,3$	2235	11,1	2808

* bezogen auf eine theoretische Dichte von 6,09 g/cm^3 .

$\sigma_{0,\text{eff}}$ berücksichtigt das durch die Kantenverrundung veränderte, tatsächliche Flächenträgheitsmoment.

Anhand von Tabelle 1 lässt sich ablesen, welchen Einfluss Veränderungen der Feedstock-Rheologie auf die gesinterten Mikroproben haben. In Bild 2 ist die Oberflächenmorphologie und Kantenverrundung für die niedrigste und die höchste Konzentration exemplarisch dargestellt. Bei einem Dispergatorgehalt von $1,6 \text{ mg/m}^2$ ist die Verarbeitbarkeit der Formmassen noch unzureichend, was die Wahrscheinlichkeit von Fehlern bereits bei der Abformung erhöht. Dies äußert sich in einer niedrigen Sinterdichte und entsprechend in einer geringen charakteristischen Festigkeit σ_0 von lediglich 1148 MPa . Mit steigendem Dispergatorgehalt nimmt sowohl die Sinterdichte der Proben als auch deren Festigkeit deutlich zu. Dennoch lässt sich mit einer verminderten Porosität alleine der Festigkeitsanstieg nicht erklären; so weisen Proben mit $2,0$ bzw. $2,4 \text{ mg/m}^2$ zwar praktisch die gleiche Sinterdichte auf, die Festigkeit nimmt aber von $\approx 1400 \text{ MPa}$ auf $\approx 1900 \text{ MPa}$ deutlich zu. Bei $2,4 \text{ mg/m}^2$ hat aber bereits eine deutliche Verbesserung der Oberflächenqualität stattgefunden, erkennbar an der Abnahme des Rz -Wertes von $\geq 3 \text{ } \mu\text{m}$ auf $1,3 \text{ } \mu\text{m}$. Noch markanter ist der Effekt beim höchsten Dispergatorgehalt; hier ist neben der Glättung des Oberflächenprofils noch eine starke Kantenverrundung festzustellen. Berücksichtigt man bei der Auswertung der Biegefestigkeit noch die Abnahme der Flächenträgheitsmomente ergibt sich eine Festigkeit von $\approx 2800 \text{ MPa}$ (eine detaillierte Herleitung findet sich in [10]).

Die aus den vorhergehenden Untersuchungen bekannte Korrelation zwischen Kantenverrundung und Festigkeitssteigerung bleibt demnach auch bei einer Variation der Dispergatkonzentration erhalten. Entgegen der ursprünglichen Annahme, dass durch den grenzflächenaktiven Dispergator die Oberflächenspannung des Binders – und damit auch die Triebkraft für eine Verrundung – gesenkt wird, nimmt die Kantenverrundung mit dem Dispergatorgehalt zu. Offensichtlich überwiegt hier die durch den Dispergator bedingte Abnahme von Viskosität und Fließgrenze, was während der Entbinderung den Widerstand der Grünkörper gegenüber Umlagerungsprozessen deutlich senkt.

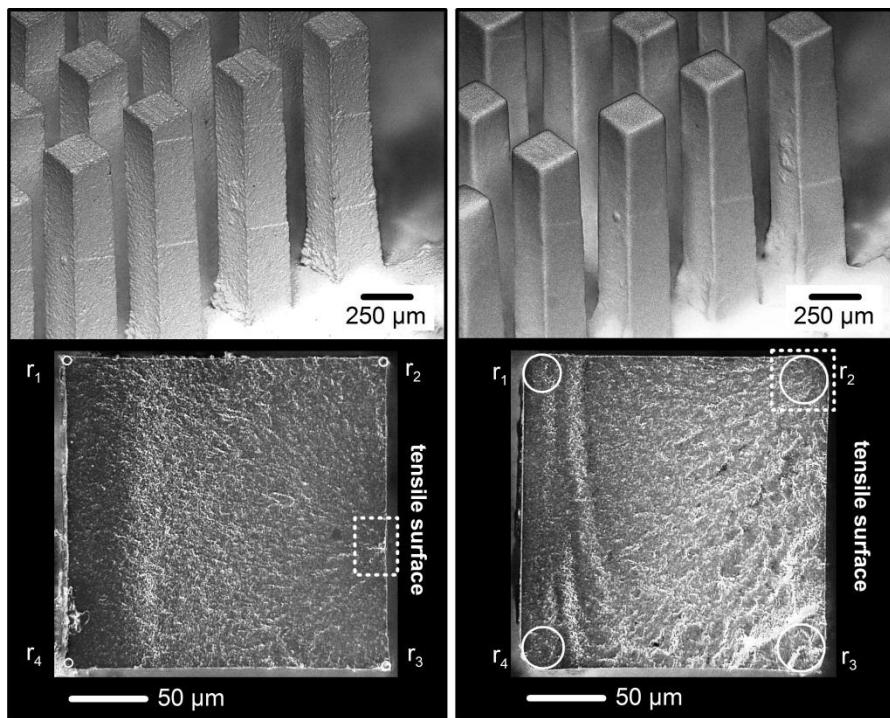


Bild 2: Lichtmikroskopische Aufnahmen entbinderter Mikrobiegebalken (Säulen, oben) und Bruchflächen gesinteter Proben (unten). Kreise zur Bestimmung des Kantenradius, gepunktete Linie umgibt den Versagensursprung, linke Spalte $1,6 \text{ mg/m}^2$, rechte Spalte $2,4 \text{ mg/m}^2$.

Prozesstechnische Einflüsse

Auch wenn dem Dispergator nachgewiesenermaßen eine bedeutende Rolle beim Auftreten von Kantenverrundung und Defektausheilung zukommt, müssen noch andere Faktoren existieren, die ebenfalls Einfluss auf die genannten Vorgänge haben. Zumal in den früheren Versuchen, bei denen Kantenverrundung und Defektausheilung erstmals beobachtet worden waren, der Dispergatoranteil konstant war.

In den Untersuchungen der aktuellen Phase konnte nachgewiesen werden, dass bei den Abformtemperaturen von $90\text{--}100^\circ\text{C}$ die Wechselwirkung zwischen der Formmasse und der Silikonform nicht vernachlässigt werden darf. Eine neu hergestellte Form aus Silikonkautschuk weist ein beachtliches Aufnahmevermögen für den unpolaren Paraffinbinder auf (messbare Gewichtszunahme der Form). Dem Grünkörper wird zumin-

dest oberflächlich Binder entzogen womit der Widerstand gegenüber Verformung während der Entbinderung deutlich zunimmt.

Mit Hilfe eines Heitzisch-Mikroskops (primär für Kontaktwinkelbestimmungen) waren Echt-Zeit-Beobachtungen der Kantenverrundung unter Entbinderungsbedingungen möglich. Dabei hat sich bestätigt, dass für das Auftreten von Kantenverrundung die Anwesenheit eines Flüssigkeitsfilms an der Oberfläche der Mikrobiegebalken/Säulen Voraussetzung ist. Der Binderfilm tritt zu Beginn des Entbinderungsprozesses ab ca. 90°C auf. Die thermische Ausdehnung des verflüssigten Binders im Gerüst des zuvor erstarrten Grünkörpers führt zum „Ausschwitzen“ an der Bauteiloberfläche [GOR10]; dabei speist sich der Binderfilm aus dem Reservoir des gesamten Bauteils und nicht nur aus dem Volumen des Mikrobiegebalkens. Wird dieser Binderfilm durch die Kapillarwirkung (bzw. große Oberfläche) einer porösen Entbinderungsunterlage oder einer Pulverpackung nun schnell entzogen, verhindert dies zwar effektiv die Bauteilverrundung, unterbindet aber gleichermaßen das Ausheilen von Oberflächendefekten.

Der gegenteilige Effekt wurde für eine Erhöhung der Aufheizrate gefunden; bei einer mäßig ausgeprägten Saugwirkung der Entbinderungsunterlage führt ein schnellerer Temperaturanstieg dazu, dass der Binderfilm nicht schnell genug abgeführt wird, während gleichzeitig die Binderviskosität und die Fließgrenze der Formmasse sinken; beides begünstigt tendenziell die Verrundung.

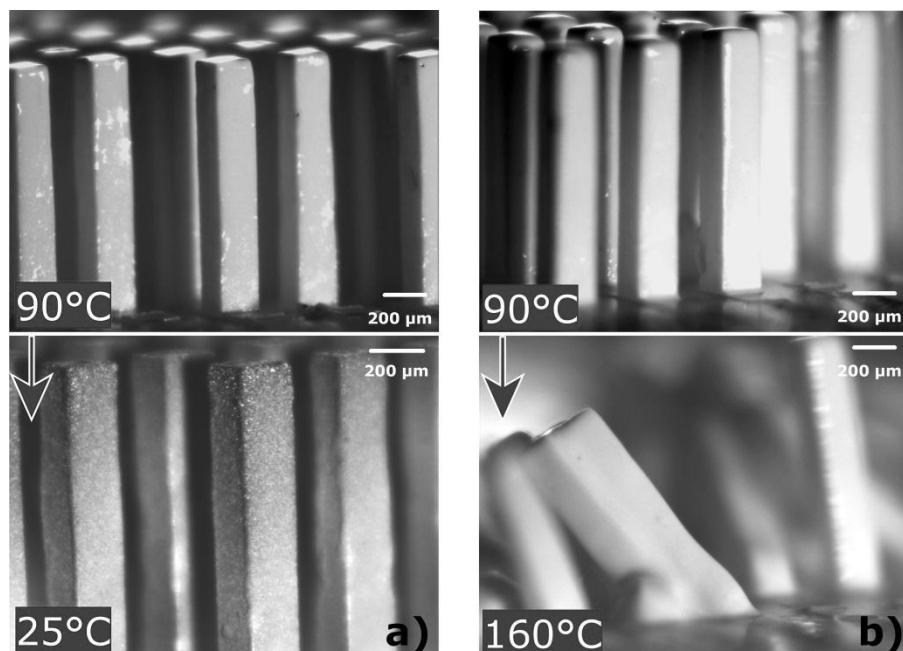


Bild 3: Echtzeitaufnahmen der Entbinderung von Mikrobalken-Arrays auf porösem Al_2O_3 -Substrat (links) und Glasunterlage (rechts): obere Reihe Aufheizphase 90°C; untere Reihe: (a) nach Entbinderung bis 300°C auf 25°C abgekühlt, (b) bei 160°C kollabiert.

Als ein weiterer, wesentlicher Einflussfaktor auf das Entbinderungsverhalten wurde der Feuchtigkeitsgehalt der Entbinderungsatmosphäre identifiziert. Liegen die Voraussetzungen für eine deutliche Verrundung vor (z.B. hoher Dispergatorgehalt), so wird während der Entbinderung dennoch eine sehr hohe Formtreue ohne Verrundung erreicht, wenn die Ofenluft zuvor getrocknet worden war. Erfolgt die Entbinderung mit Umgebungsluft (rel. Feuchte 20-50%) ist eine deutliche Verrundung zu beobachten; wurde die Atmosphäre annähernd feuchtigkeitsgesättigt (80-90%) ist die vollständige Deformation der Proben zu beobachten.

Die Untersuchungen haben verdeutlicht, dass eine Vielzahl an Faktoren existiert, die auf den Entbinderungsprozess einwirken können. Dabei ist es einfacher, durch gezielte Maßnahmen eine generelle Verrundung (bzw. Deformation) der Mikroproben zu unterbinden, als diese auf ein gewünschtes Ausmaß einzustellen. Vor diesem Hintergrund wird verständlich, dass in den zuvor durchgeföhrten Untersuchungen der vorangegangenen Phasen das Phänomen sehr hoher Festigkeiten eher zufällig auftrat. Dadurch dass in der laufenden Phase des SFB das Verständnis der zu Grunde liegenden Mechanismen deutlich verbessert werden konnte, stehen nun Werkzeuge zur Verfügung, ohne Oberflächenbearbeitung außergewöhnlich hohe Bauteilfestigkeiten zu realisieren.

5.2.1.2 Reaktionsgesinterte Werkstoffe (SRBSN)

5.2.1.2.1 Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Mit den Untersuchungen am Werkstoff *gesintertes, reaktionsgebundenes Siliciumnitrid* (SRBSN) wurden mehrere Forschungsansätze verfolgt: Zum einen sollte überprüft werden, inwieweit eine deutlich reduzierte Sinterschwindung tatsächlich zur Erhöhung von Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit von Mikrobauteilen beitragen kann. Zum anderen repräsentiert Si_3N_4 die Klasse der Nichttoxin-Keramik und stellt einen der wichtigsten Vertreter der technischen keramischen Werkstoffe dar, dessen Herstellungsprozess sich signifikant vom bisher untersuchten ZrO_2 unterscheidet. Dementsprechend bestand Entwicklungsbedarf, um die exzellenten mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs auch im Mikrobereich realisieren zu können.

Die zum Zeitpunkt der letzten Antragstellung vorliegenden Ergebnisse hatten bereits zu einer Reihe von Erkenntnissen hinsichtlich des Einflusses wichtiger Prozessparameter (Art und Menge der Sinteradditive, Probenvolumen, Temperatur und Haltezeit) auf den Reaktionsbindungsschritt (Nitridierung) und das Sinterverhalten geführt. Sie hatten allerdings auch die Notwendigkeit weiterer, vertiefender Untersuchungen aufgezeigt. So lagen noch zu wenige, statistisch abgesicherte Mikro-Biegefestigkeiten vor, um belastbare Prozess-Gefüge-Eigenschaftsbeziehungen aufzustellen.

Mit den ersten Feedstockansätzen waren charakteristische Festigkeiten bis zu $\sigma_0 = 1161 \text{ MPa}$ erreicht worden. In makroskopischen Abmessungen weist gesintertes Si_3N_4 (SSN) je nach Herstellungsprozess Festigkeiten von ca. 800-1500 MPa auf [PET02], und ist damit sehr ähnlich dem bisher eingesetzten Zirkoniumoxid (3Y-TZP); selbst für das minimal weniger hochfeste SRBSN sind Festigkeiten von 800-1000 MPa realistisch. Es war deshalb erwartet worden, dass durch entsprechende Optimierung der Prozessparameter für SRBSN im Mikrobereich zumindest ähnlich hohe Festigkeiten erzielt werden können wie für Standard- ZrO_2 -Mikroproben, nämlich 1800-2200 MPa (ohne nennenswerte Kantenverrundung/Defektausheilung).

5.2.1.2.2 Ergebnisse

Ein Schwerpunkt der Untersuchungen in der 4. Förderphase lag auf der Korrelation der im TP D2 bestimmten Mikrobiegefestigkeiten mit den Parametern des Herstellprozesses. Durch die intensive Zusammenarbeit mit den charakterisierenden Teilprojekten konnte die Datenbasis deutlich erweitert werden. In Ergänzung zu den bereits im Bericht zur letzten Projektphase beschriebenen Zusammensetzungen (Si04-Si11) wurden zunächst zwei weitere Mischungen hergestellt und die entsprechenden Probekörper charakterisiert (Si12 u. Si13). Wie Tabelle 2 zeigt, wurden dabei neben Y_2O_3 als weitere Sinteradditive MgO in Verbindung mit Al_2O_3 verwendet, mit dem Ziel eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit der Si_3N_4 -Bildung (MgO) mit guten Sintereigenschaften (Al_2O_3) zu kombinieren. Durch Verdoppelung der Mischmahlzeit von 24 h (Si12) auf 48 h (Si13) wurde die Partikelgröße des Silicium-Ausgangspulvers weiter reduziert. Dadurch erhöht sich die spezifische Oberfläche und der SiO_2 -Anteil des Si-Pulvers, was ein größeres Volumen der zum Sintern notwendigen Flüssigphase zur Folge hat.

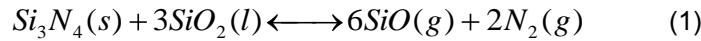
Tabelle 2 fasst neben den Additivanteilen der verschiedenen Pulvermischungen (gruppiert nach Additiv-Typ; die Werte in Klammern beziehen sich auf die Zusammensetzung nach vollständiger Umwandlung von Si in Si_3N_4) auch die spezifische Pulveroberfläche und den Feststoffgehalt im Feedstock zusammen.

Tabelle 2: Pulver- und Feedstockeigenschaften

Pulver	Y_2O_3 wt%	Al_2O_3 wt%	MgO wt%	Spez. Oberfl. m^2/g	Feedstock	Feststoffgehalt vol%
YA-1	8.0 (5.0)	3.2 (2.0)	-	6.8	Si71	56.5
YA-2	8.0 (5.0)	3.2 (2.0)	-	8.8	Si72	61.0
YA-3	12.3 (7.7)	3.0 (1.9)	-	6.3	Si09	56.4
YA-4	12.3 (7.7)	3.0 (1.9)	-	9.1	Si08	56.2
YA-5	12.3 (7.7)	1.7 (1.1)	-	7.8	Si04	56.6
YM-1	12.4 (7.8)	-	0.7 (0.4)	10.5	Si05	57.1
YM-2	12.3 (7.7)	-	3.0 (1.9)	7.1	Si10	55.6
YM-3	12.3 (7.7)	-	3.0 (1.9)	7.1	Si11	60.0
YAM-1	12.3 (7.7)	1.5 (0.9)	1.5 (0.9)	6.3	Si12	56.8
YAM-2	12.3 (7.7)	1.5 (0.9)	1.5 (0.9)	10.1	Si13	56.9

In Tabelle 3 sind die vervollständigten Festigkeitsmessungen der Versuche Si04 bis Si11 dargestellt, sowie die zusätzlichen Ansätze mit den Sinteradditiv-Kombinationen YM-1 und YM-2. Wie sich der Auflistung entnehmen lässt, reichen die Mikrobiegefestigkeiten von etwa 480 MPa (YM-2, YAM-2) bis maximal 1230 MPa (YM-1). Zum Einen musste somit festgestellt werden, dass diese Werte deutlich hinter denen der ZrO_2 -Proben zurückbleiben (und damit hinter den Erwartungen); zum Anderen ließ sich auch keine eindeutige Korrelation mit der Art und Menge der Sinteradditive, den Sinterparametern oder der Porosität ausmachen. Erste Hinweise auf die mögliche Ursache für die niedrigen Festigkeiten und die ungewöhnlich starken Schwankungen fanden sich bei der Untersuchung der Säulenarrays mittels Röntgenbeugungsanalyse (XRD). Bei vielen Proben wurden ausgeprägte Reflexe der Phase YN-Melilith ($Y_2Si_3O_3N_4$) detektiert – allerdings jeweils nur an der Probenoberfläche und nicht im Querschliff (siehe Bild 4). Weiterhin wurde festgestellt, dass die Festigkeit der Mikrobiegeproben umso geringer ausfällt, je mehr $Y_2Si_3O_3N_4$ an der Oberfläche des Probenarrays nachweisbar war. Bild 5 veranschaulicht diesen Zusammenhang, die charakteristische Festigkeit ist hier gegen das Peakhöhenverhältnis Melilith/ β - Si_3N_4 aufgetragen.

Da die Melilith-Phase in hohen Konzentrationen nur in einem wenige 10 μm dicken Bereich an der Oberfläche nachweisbar ist, stellt sich die Frage ob wirklich ein kausaler Zusammenhang mit dem Festigkeitsabfall vorliegt. Eine Antwort können die Umstände liefern unter denen sich Melilith bildet. Während im Probeninneren überwiegend YN-Apatit $Y_5Si_3O_{12}N$ (formal: $10Y_2O_3 \cdot 9SiO_2 \cdot 1Si_3N_4$) und in geringerem Umfang YN-Wollastonit $YSiO_2N$ (formal: $2Y_2O_3 \cdot 1SiO_2 \cdot 1Si_3N_4$) als kristalline Sekundärphasen auftreten, findet sich an der Oberfläche die „ SiO_2 -freie“ YN-Melilith-Phase $Y_2Si_3O_3N_4$ (formal: $1Y_2O_3 \cdot 1Si_3N_4$), womit die Präsenz von $Y_2Si_3O_3N_4$ auf eine Verarmung an SiO_2 hinweist. Als Ursache für den Verlust an SiO_2 – bzw. den Gradienten zur Oberfläche hin – kommt vor allem die Zersetzungsreaktion des Si_3N_4 mit SiO_2 in Frage [WAD01], [YOK00]:



An der Probenoberfläche können die gasförmigen Produkte SiO und N_2 leicht in die (Ofen-)Umgebung entweichen, wohingegen sich im Probeninneren ein Gleichgewichtsdruck einstellt und die Zersetzung zum Erliegen kommt. Da der Abbau des SiO_2 bevorzugt an der Oberfläche stattfindet, verschiebt sich dort die Zusammensetzung des quaternären Systems $Y_2O_3 - SiO_2 - Si_3N_4$ hin zur Bildung von $Y_2Si_3O_3N_4$.

Tabelle 3a: Sinterparameter und Festigkeit der Mikrobiegeproben mit undotiertem Pulverbett

	T_{sint} °C	Haltezeit h	offene Porosität (Hg-Poros.) %	Gesamtporosität (Archimedes) %	σ_0 MPa	m -
YA-1	1750	1	0,6	8	712	11
YA-3	1700	1	15,1	15	540	14
	1750	1	3,2	9	527	6
	1750	2	8,6	13	544	13
YA-4	1750	1	0,7	2	921*	12
	1750	2	1,3	6	953*	7
	1790	1	0,5	<1	873*	12
YA-5	1750	1	11,3	11	920	13
	1790	1	3,9	8	1035*	12
YM-1	1750	2	7,3	9	1161*	19
	1790	1	4,2	4	1234	13
YM-2	1750	2	15,9	16	478	24
YM-3	1750	2	19,5	20	767	13
YAM-1	1750	1	10,7	11	742	11
	1750	4	2,1	6	539	11
YAM-2	1750	2	2,0	2	487	5
	1790	1	0,3	7	709	7

* im Bericht Phase 3 bereits aufgeführt

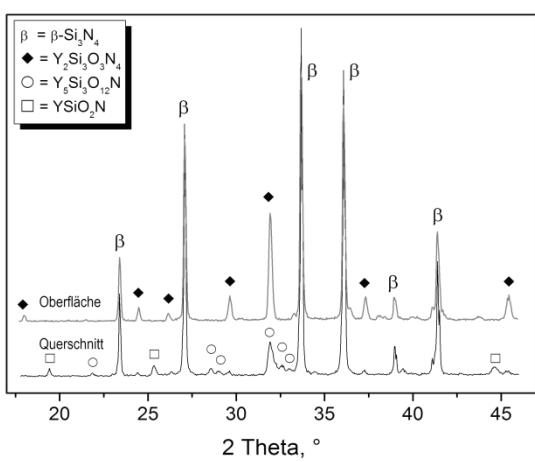
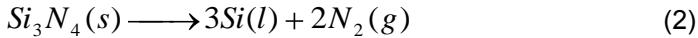


Bild 4: XRD-Spektrum YA-3, 1750°C/2h mit deutlichen Reflexen der Phase YN-Melilit ($\text{Y}_2\text{Si}_3\text{O}_3\text{N}_4$) an der Oberfläche.

Das Vorhandensein von Melilit nach der Sinterbehandlung ist demnach ein wichtiger Indikator dafür, dass ein Teil des Si_3N_4 gemäß Gl. (1) abgebaut wurde¹. Die damit einhergehende Ausbildung von Defekten und Poren in oberflächennahen Probenbereichen ist hingegen als die eigentliche Ursache für niedrige Biegefestigkeiten von <<1000 MPa zu erachten. Um die oben genannte Zersetzungreaktion zu minimieren, werden Si_3N_4 -Bauteile häufig bei höheren N_2 -Drücken gesintert (Gasdruck-Sintern, heiß-isostatisches Pressen HIP), oder in ein Pulverbett eingepackt, das Si_3N_4 enthält. Im letzteren Fall dient das Si_3N_4 der Pulverpackung als Opfermaterial, das durch Dissoziation gemäß Gl. (2) einen erhöhten N_2 -Partialdruck um die Proben erzeugt.



Die in Tabelle 3a aufgeführten Probensätze wurden drucklos (N_2 bei Atmosphärendruck) im Pulverbett aus $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ / h-BN (hexagonales Bornitrid) gesintert. Das unterschiedliche Ausmaß der Melilit-Entstehung an der Oberfläche lässt sich zweifelsfrei auf die Qualität des verwendeten Pulverbettes zurückführen. So zeigen Proben, die in einer neu hergestellten Packung gesintert wurden, wenig bis keine Melilit-Spuren (YA-4, YM1, jeweils 1790°C, 1h). Bei mehrfacher Nutzung einer Packung nimmt dessen Vermögen ab, die Si_3N_4 -Zersetzung im Probenmaterial nach Gl. (1) zu unterbinden und der Melilit-Gehalt nimmt merklich zu. Neben einer kontinuierlichen Abnahme des Si_3N_4 -Anteils im Pulverbett dürfte auch die Vergrößerung des Pulvers (Abnahme der Oberfläche), sowie die Umwandlung in das thermodynamisch etwas stabile $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ ursächlich für dieses Verhalten sein.

Bei weiteren Versuchen mit dem Ziel höhere und vor allem reproduzierbare Festigkeiten zu realisieren, wurde ein besonderes Augenmerk auf die Beschaffenheit des Pulverbettes gelegt und für jede Sinterbehandlung ein neu herstelltes Pulverbett eingesetzt. Verschiedenen Arbeiten ist zu entnehmen [LEE02], [ZIE87], [GIA79], dass Dotierungen des Pulverbettes mit Sinteradditiven deren Verarmung im Probenmaterial entgegenwirken, und somit zu einem günstigeren Sinterverhalten führen können. Tabelle 3b zeigt die Prozessparameter und charakteristischen Festigkeiten von Proben der Zusammensetzung YAM-2, gesintert im Pulverbett mit folgender Zusammensetzung: 45 Masse-% $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, 40% h-BN, 10% Y_2O_3 , 2,5% Al_2O_3 , 2,5% MgO. Mit σ_0 -Werten von 990-1170 MPa werden deutlich höhere Festigkeiten erzielt als mit YAM-2 Proben aus einem undotierten, wiederverwendeten Pulverbett (Tabelle 2a: 490-710 MPa). Der direkte Vergleich bestätigt somit deutlich die Bedeutung des Pulverbettes.

Für vergleichende Untersuchungen konnten Proben der Zusammensetzung YAM-1 und YAM-2 am IAM-KM (früher: Inst. für Keramik im Maschinenbau) in einem zweistufigen Sinter-/HIP-Prozess hergestellt werden². Dabei wurden die Proben ohne Pulverbett zunächst bei 1780°C für 20 min bei 20 bar N_2 -Druck gesintert um dann bei 200 bar für weitere 30 min verdichtet zu werden. Es wurde erwartet, dass sich durch die Vermeidung der Degradationsprozesse und einer hohen Sinterdichte am ehesten hohe Festigkeiten realisieren lassen. Tatsächlich wurde aber für YAM-1 Proben ein σ_0 von 1203 MPa ($m = 13$) bestimmt. Aufgrund einer geringeren Anzahl an untersuchten Biegeproben können für die YAM-2 Proben keine Weibull-Parameter ange-

¹ Prinzipiell wäre die Beobachtung eines Masseverlustes während der Sinterbehandlung ebenfalls ein Indikator; gerade bei SRBSN kann aber der Masseverlust mit einer Massezunahme von unvollständig nitridiertem Si überlagert sein.

² Besonderer Dank an S. Fünfschilling für die Durchführung dieser Versuche.

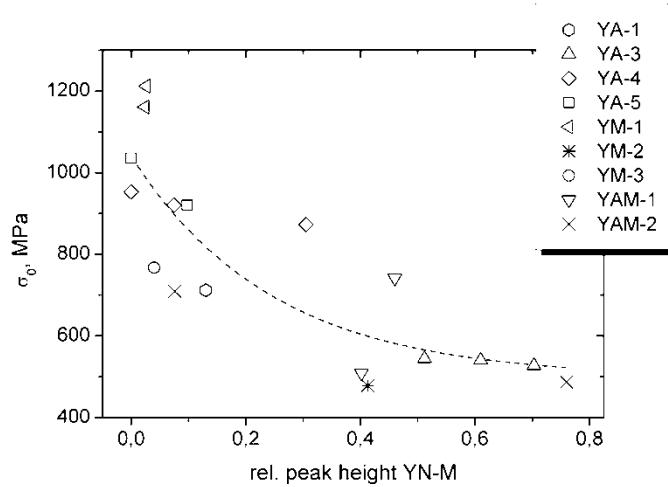


Tabelle 3b: Sinterparameter und Festigkeit der Mikrobiegeproben mit dotiertem Pulverbett

	T _{sint} °C	Haltezeit h	offene Porosität (Hg-Poros.) %	Gesamtporosität (Archimedes) %	σ ₀ MPa	m
YAM-2	1710	1	1,1	8,5	1169	14
	1750	2	0,7	≤1	990	9
	1800	1	1,0	≤1	1079	11

geben werden; nach Auswertung von 6 Proben ergibt sich ein σ_{Bb} von 990 ± 60 MPa (was auf ein σ_0 von ca. 1050 MPa schließen lässt).

Es handelt sich hierbei um ein bemerkenswertes Ergebnis, zeigt es doch, dass das standardmäßig angewandte drucklose Sintern im optimierten Pulverbett nicht für relativ niedrigen Festigkeiten der Si_3N_4 -Mikroproben verantwortlich ist. Werte von 1000-1200 MPa wurden mit unterschiedlichen Sinteradditiven und Sinterbedingungen (und sogar unterschiedlichen Sinterkonzepten) erzielt. Entsprechend deutlich fallen auch die Unterschiede in der Mikrostruktur der jeweiligen Proben aus, insbesondere hinsichtlich Restporosität, Kornlänge und Streckungsgrad (vgl. Bild 6(a), 6(b)). Dass dennoch eine in etwa einheitliche maximale Festigkeit von ca. 1200 MPa erzielt wurde, beweist indirekt, dass andere, festigkeitslimitierenden Faktor existieren und Prozess-Gefüge-Eigenschaftsbeziehungen somit nur eine begrenzte Aussagekraft besitzen.

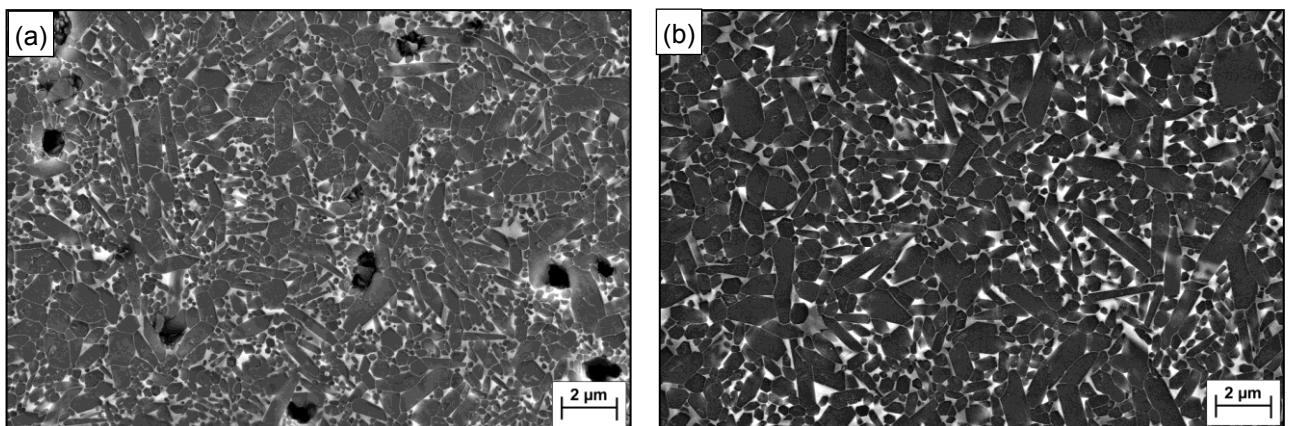


Bild 6: Gefügeaufnahmen von YAM-2 Proben mit vergleichbarer Festigkeit; (a) 1710°C/1h, (b) 1800°C/1h.

Übertragung Defektausheilung auf andere Werkstoffe

Das Prinzip der Festigkeitssteigerung bei Mikroproben durch die Ausheilung von oberflächennahen Defekten während der Entbinderung wurde ausführlich in Abschnitt 1.2.1.1.2 anhand der Untersuchungen an ZrO_2 diskutiert. Die Untersuchungen mit SRBSN sollten auch darüber Aufschluss geben, ob dieser Effekt auch in anderen Werkstoffsystemen beobachtbar ist.

Aufgrund der Vielzahl der für das Si_3N_4 vorgenommenen Prozessparameter-Variationen unterscheiden sich die einzelnen Probensätze stärker als beim ZrO_2 . Dadurch ist ein direkter Vergleich nur eingeschränkt möglich. Stattdessen wurde die Festigkeit der einzelnen Biegeproben gegen den an der Bruchfläche ermittelten Kantenradius aufgetragen. Es zeigt sich, dass grundsätzlich auch im Fall des Si_3N_4 mit zunehmender Kantenverrundung der Biegeproben tendenziell höhere Festigkeiten bestimmt werden. In Bild 7 ist diese Abhängigkeit am Beispiel der Pulvermischungen YA-3 und YA-4 gezeigt; beide Mischungen enthalten die Sinteradditive Y_2O_3 und Al_2O_3 im gleichen Verhältnis, unterscheiden sich aber aufgrund der unterschiedlichen Mahlfeinheit in der spezifischen Oberfläche und damit im SiO_2 -Anteil (siehe Tabelle 2). Unabhängig von den gewählten Sintertemperaturen und Haltezeiten liegen die Festigkeiten einer Zusammensetzung jeweils auf einer Geraden. Für verschiedene Zusammensetzungen unterscheiden sich sowohl die Lage als auch die Steigung dieser Geraden.

Daraus lässt sich schließen, dass prinzipiell auch beim Werkstoff Si_3N_4 durch die während des Entbinderungsvorgangs auftretende Verrundung oberflächennahe Bereiche eine geringere Defektdichte aufweisen und damit statistisch gesehen höhere Festigkeiten erzielen. Allerdings besteht für Si_3N_4 aufgrund der hohen Sintertemperaturen und der damit verbundenen Gefahr von Degradationsprozessen (siehe vorherigen Abschnitt), eine deutlich größere Wahrscheinlichkeit für die Entstehung neuer Defekte.

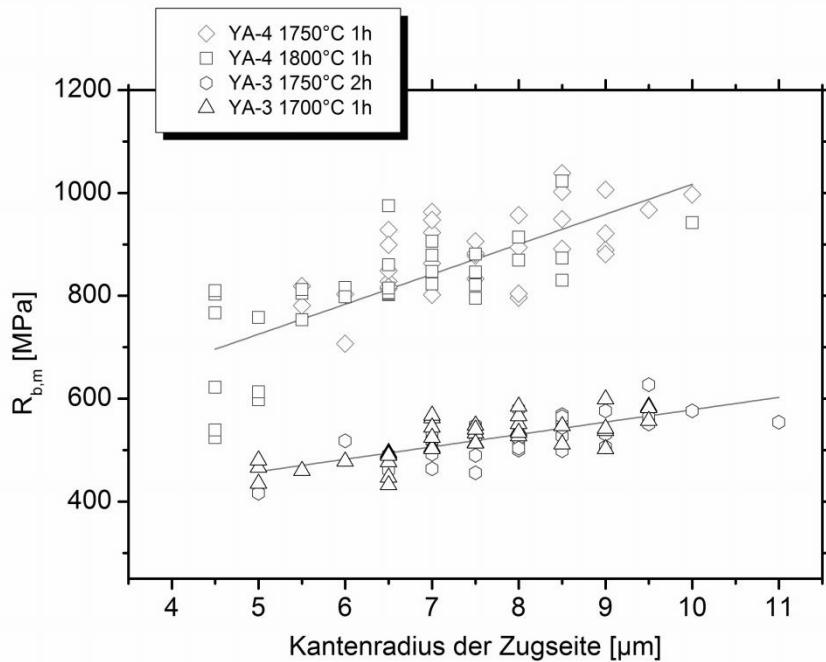


Bild 7: Biegefestigkeit in Abhängigkeit des Kantenradius gesinterter Si_3N_4 -Mikrobiegeproben

5.2.1.2.3 Vergleich ZrO_2 und Si_3N_4

Abschließend soll noch einmal auf die Frage nach der Ursache für die merklichen Festigkeitsunterschiede zwischen ZrO_2 und Si_3N_4 im Mikrobereich eingegangen werden. Dies geschieht auch mit der Vorstellung, möglicherweise allgemeingültige Regeln ableiten zu können, welche keramische Werkstoffe für den Einsatz in mechanisch hochbeanspruchten Mikrosystemen geeignet sind und welche nicht.

Aufgrund der geringen Größe ist bei Mikrobiegeproben eine Oberflächen-Nachbearbeitung kaum durchführbar, und bei komplex geformten Mikrobauteilen praktisch nicht möglich. Die Festigkeiten werden daher immer an „as-sintered“ Proben bestimmt. Im Makrobereich sind Festigkeiten des „as-sintered“ Zustands selten publiziert, da die meisten Normen oberflächenbehandelte Prüfkörper empfehlen. In Tabelle 4 sind für ZrO_2 und Si_3N_4 Literaturwerte von „as-sintered“ bzw. bearbeiteten Proben gegenübergestellt. Es wird ersichtlich, dass ohne Oberflächenbehandlung nur etwa 50% der Festigkeit erreicht wird.

Auf der Basis makroskopischer Festigkeiten und Abmessungen der Mikroproben, lässt sich mit Hilfe des Weibull-Größeneffektes berechnen, welche Festigkeiten für den Mikrobereich zu erwarten sind. Für die Mikroproben aus Si_3N_4 ergibt sich ein Festigkeitszuwachs um den Faktor 1,6 - 1,9 falls Oberflächendefekte limitierend wirken bzw. 1,9 - 2,6 bei Gültigkeit des Volumeneffektes (für einen Weibull-Modul m von 10-14). Die entsprechenden Werte für ZrO_2 lauten 1,7-2,3 bzw. 2,2-3,2 (für m von 8-12), zu Details der Berechnung siehe [RÖG11].

Betrachtet man den Oberflächenzustand der gesinterten Mikroproben (Bild 8), fallen sofort deutliche Unterschiede zwischen ZrO_2 und Si_3N_4 auf. Die Oberfläche der Si_3N_4 -Proben wird durch die ausgeprägte Nadelform der β -Phase dominiert, was eine hohe Rauheit zu Folge hat. Im Gegensatz dazu bilden sich beim ZrO_2 sehr glatte Oberflächen aus. Durch die geringe Korngröße (<500nm) und die enge Korngrößenverteilung wird die Oberfläche des Urmodells sehr präzise abgebildet. Beim Auftreten von Kantenverrundung werden zusätzlich die vom Abformprozess herrührende Rauheit reduziert (Bild 8, rechte Spalte), womit ohne eine

Tabelle 4: Makroskopische Festigkeitswerte im Ausgangszustand und nach Oberflächenbearbeitung

	„as-sintered“	bearbeitet
ZrO_2 (3Y-TZP) ^[TOS11]		1000 - 1200 MPa
ZrO_2 (3Y-TZP) ^[TSE99]	580 MPa	
Si_3N_4 (SSN/GPSN) ^[PET02]		800 - 1500 MPa
Si_3N_4 ^[TSE00]	445 - 750 MPa	820 - 1030 MPa
Si_3N_4 ^[STA02]	414 MPa	950 MPa

Oberflächenbearbeitung Ra-Werte von $0,1\mu\text{m}$ möglich sind. Die Festigkeit solcher Proben erreicht etwa 3000 MPa.

Vor diesem Hintergrund entspricht der mit Si_3N_4 -Mikrobiegproben erzielte Festigungsbereich von 1000-1200 MPa demnach recht gut dem Erwartungswert für „as-sintered“ Proben, wenn man berücksichtigt, dass Oberflächendefekte versagensauslösend und damit festigkeitslimitierend wirken. Die Mikroproben aus ZrO_2 liegen zwar gleichfalls im „as-sintered“ Zustand vor. Aufgrund der besseren Oberflächenqualität kommt hier aber eher der Volumeneffekt zu tragen (Faktor 2,2 bis 3,2). Die mildereren Sinterbedingungen für ZrO_2 vermeiden die Bildung neuer Defekte, so dass die im Zuge der Entbinderung ausgeheilten Defekte sich unmittelbar positiv auswirken können. Stark verrundete Proben weisen darüber hinaus Oberflächenqualitäten auf, die eher denen oberflächenbearbeiteter Makroproben entsprechen.

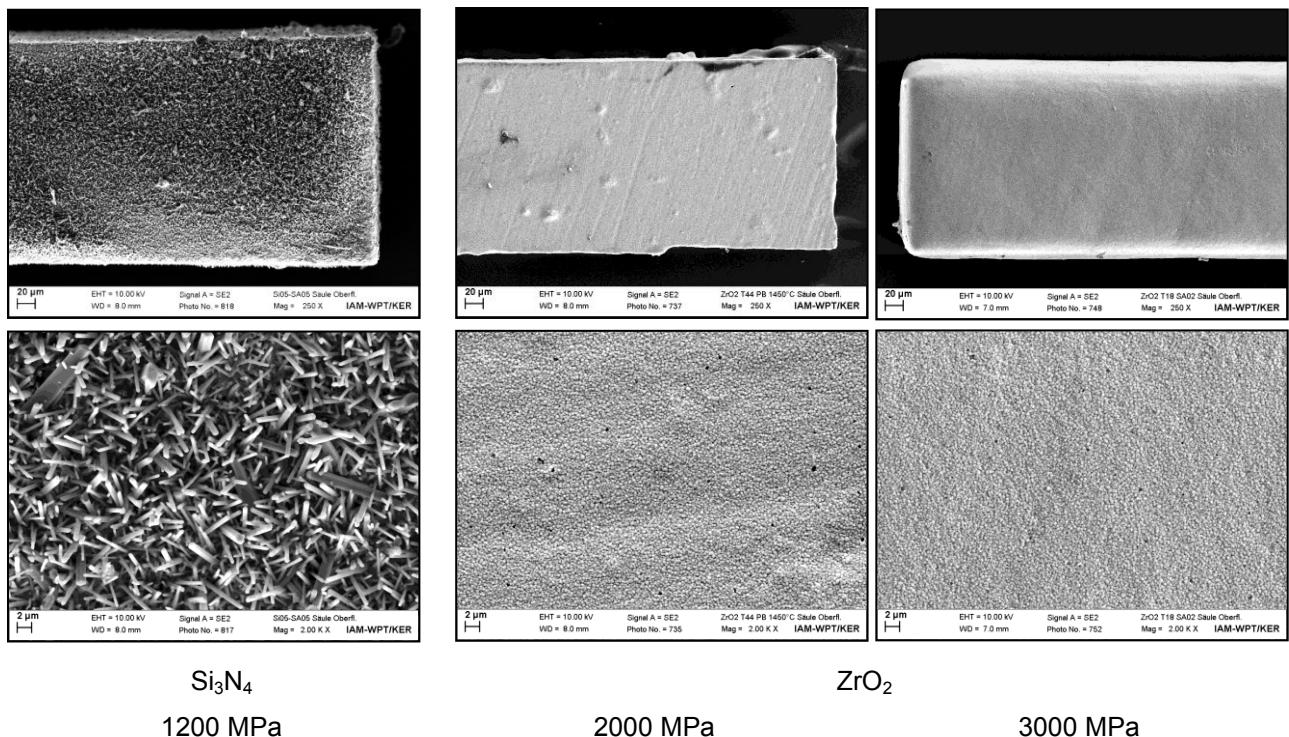


Bild 8: Oberflächenzustand gesinterter Mikrobiegabalken aus Si_3N_4 (linke Spalte) und ZrO_2 (mittlere und rechte Spalte, sowie Angaben typischer charakteristischer Festigkeiten.

5.2.1.2.4 Ausblick

Die zwischen ZrO_2 und Si_3N_4 an Mikroproben beobachteten, signifikanten Festigkeitsunterschiede sind nach den vorliegenden Erkenntnissen zu einem wesentlichen Teil auf den Oberflächenzustand zurückzuführen. Da für beide Werkstoffe dieselben Formgebungsverfahren und –werkzeuge verwendet wurden, sind die Unterschiede materialspezifisch; unter anderem auch deshalb, weil die Sinterbedingungen letztlich von den Materialeigenschaften diktiert werden. Werkstoffe, die aufgrund starker kovalenter Bindungen eine eher geringe Sinteraktivität aufweisen (Si_3N_4 , SiC), erfordern neben hohen Sintertemperaturen meist noch die Anwesenheit einer Flüssigphase, um hohe Dichten und damit die gewünschten mechanischen Eigenschaften zu erreichen. Auch wenn es prozesstechnisch durchaus möglich ist, dennoch ein bestimmtes Werkstoffgefüge einzustellen, so führen die extremen Sinterbedingungen aber eher zu einem undefinierten Oberflächenzustand. Für *makroskopische* Bauteile, die standardmäßig eine abschließende Oberflächenbearbeitung erfahren, sind diese Aspekte weniger relevant; für *mikroskopische* Bauteile kann dies aber entscheidend sein. Mit Strukturwerkstoffen, die sich bei moderaten Temperaturen (also deutlich unterhalb von Schmelz- oder Zersetzungstemperatur) zu hohen Bauteildichten sintern lassen und dabei ein feinkörniges Gefüge ausbilden (ZrO_2 , Al_2O_3), sollte es am ehesten möglich sein, vom Weibull-Effekt zu profitieren und Mikrobauteile mit hoher Festigkeit zu realisieren.

5.2.1.3 Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Bedingt durch die Aufgabenstellung in der 4. Phase des SFB wurde intensiv mit den charakterisierenden Teilprojekten zusammengearbeitet. Insbesondere die im TP D2 ermittelten Mikrobiegefestigkeiten trugen ganz wesentlich zum tieferen Verständnis des Verhaltens der Si_3N_4 -Proben bei. Neben den im Abschnitt 1.2.1.2 beschriebenen wissenschaftlichen Untersuchungen und der damit verbundenen Bereitstellung von Probekörpern, wurden im Teilprojekt Komponenten für das aktuelle Demonstratordesign gefertigt (Lagerschild). In den TP Z2 und Z3 wurde das Design festgelegt, bzw. ein um den entsprechenden Aufmaßfaktor vergrößertes Urmodell gefertigt (Bild 9). Mit Hilfe dieses Urmodells konnten Silikonformen hergestellt, und mittels Heißgießen Prototypen abgeformt werden. Anhand von Bild 9 lässt sich auch die beim Sinterprozess auftretende Schwindung ablesen.

Neben den ausführlich dargelegten prozesstechnischen und werkstoffkundlichen Fragestellungen wurde auch untersucht, ob sich durch die Reduzierung der Sinterschwindung tatsächlich eine Reduzierung der Fertigungstoleranzen erzielen lassen. Mit einer linearen Schwindung von 10-12% weisen SRBSN-Proben einen fast um den Faktor zwei niedrigeren Wert auf als entsprechende Proben aus ZrO_2 (20-21%), was sich positiv auf Formtreue und Maßhaltigkeit auswirken sollte.

Zur Validierung wurden 2 Serien von Mikrodüsenplatten aus ZrO_2 bzw. SRBSN mittels Heißgießen aus der gleichen Silikonform gewonnen und vom Teilprojekt C4 optisch vermessen (*Werth Videocheck HA 400*). Bei den Proben handelte es sich nicht um eine Auswahl, sondern jeweils um 14 bzw. 15 Bauteile, die unmittelbar nacheinander abgeformt und anschließend unter identischen Bedingungen entbindet und gesintert wurden. Bild 10 zeigt eine Mikrodüsenplatte aus SRBSN und die für die Vermessung herangezogenen Maße. In Tabelle 5 sind die Mittelwerte der ermittelten Durchmesser mit den jeweiligen Standardabweichungen aufgeführt; aufgrund der geringeren Schwindung fallen die Si_3N_4 -Bauteile trotz gleicher Form entsprechend größer aus.

Tabelle 5: Maßhaltigkeit Düsenplatte

Durchmesser	ZrO_2		SRBSN	
	\varnothing , mm	STABW, μm	\varnothing , mm	STABW, μm
1	3,957	4,0 (0,10%)	4,415	6,3 (0,14%)
2	3,656	4,9 (0,13%)	4,084	6,9 (0,17%)
3	2,333	4,7 (0,20%)	2,634	10,6 (0,40%)
4	0,922	2,7 (0,29%)	1,039	8,1 (0,78%)

Insgesamt ist zu beobachten, dass die dimensionellen Schwan-

kungen für den Werkstoff SRBSN entgegen der Erwartungen größer sind. Die Unterschiede zwischen ZrO_2 und Si_3N_4 fallen umso stärker aus, je kleiner der gemessene Durchmesser ist. Zum Teil ist dies sicher eine Folge der deutlich ungleichmäßigeren Oberflächenmorphologie der Si_3N_4 -Bauteile (vgl. Bild 8) mit hohen Rauheitswerten ($R_t = 4-7 \mu\text{m}$), die sich beim Vermessen von kleinen Abmessungen prozentual stärker auswirkt. Es muss aber auch festgestellt werden, dass das anisotrope Gefüge und die Prozessroute aus Reaktionsbindung und anschließender Flüssigphasen-Sinterung von Si_3N_4 offensichtlich mehr Ansatzpunkte für eine anisotrope Schwindung bietet als das Festphasen-Sintern von ZrO_2 .

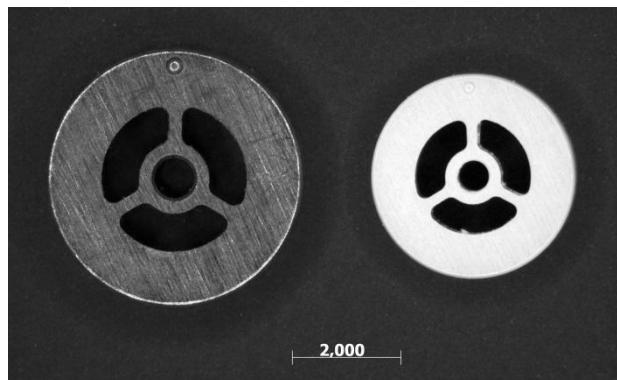


Bild 9: Messing-Urmodell (links) und gesintertes ZrO_2 -Lagerschild für den Demonstrator Mikrogasturbine; Maßbalken entspricht 2mm.

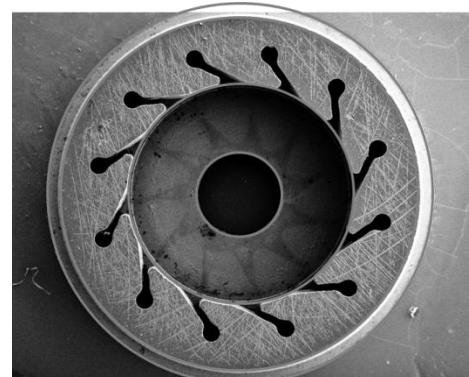


Bild 10: Mikrodüsenplatte mit Markierungen der Vermessungpositionen.

5.2.1.4 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

In der neueren Literatur sind inzwischen Arbeiten zu finden, die sich ebenfalls mit der Herstellung und mechanischen Charakterisierung ungeformter Mikroproben aus ZrO_2 (Y-TZP) beschäftigen, und somit einen Vergleich mit den eigenen Arbeiten zulassen. Antolino et al. stellten Mikrobiegebalken mit Abmessungen von $340 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ mittels Gelcasting und photolithographisch erzeugten, verlorenen Formen her. Durch Verbesserungen des Herstellprozesses konnten die Autoren die 3-Punkt-Biegefestigkeit von $\sigma_0 = 880 \text{ MPa}$ bzw. 930 MPa (Weibull-Modul $m = 6,8$) [ANT09a] auf $\sigma_0 = 2390 \text{ MPa}$ ($m = 6,3$) steigern [ANT09b]. Diese Festigkeitswerte entsprechen in etwa den Resultaten, die in den eigenen Arbeiten bei einer mittleren Kantenverrundung von ca. $10 \mu\text{m}$ erhalten wurden (siehe Bericht 3. Phase). Dabei ist zu beachten, dass das Probenvolumen in der hier zitierten Arbeit um den Faktor 240 kleiner ist als bei den im Rahmen des SFB hergestellten und charakterisierten Mikrobiegeproben. Aufgrund des Weibull-Größeneffektes wären also noch deutlich höhere Festigkeiten zu erwarten. Wie Danzer aber in einer Arbeit gezeigt hat [DAN06], über- schätzt die Weibull-Theorie bei sehr kleinen Proben bzw. Bauteilen die Festigkeit; nämlich dann, wenn die effektiven Volumina in derselben Größenordnung liegen wie die versagensauslösenden Defekte. In einer weiteren Arbeit zur mechanischen Charakterisierung von Kleinstproben aus ZrO_2 wurden mittels Tintenstrahl-Drucktechnik hergestellte Plättchen untersucht [ÖZK10]. Die Abmessungen betragen $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 300 \mu\text{m}$, bzw. $3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 300 \mu\text{m}$ und liegen damit etwa eine Größenordnung über den im Rahmen des SFB untersuchten Proben. Mit Hilfe von Biaxialtests (ball-on-three ball) wurden charakteristische Festigkeiten von $\sigma_0 = 1366 \text{ MPa}$ (2×2) und $\sigma_0 = 1393 \text{ MPa}$ (3×4) ermittelt.

Die Bedeutung von Oberflächendefekten (und deren Ausheilung) auf die Festigkeit zeigt sich auch in den Arbeiten von Harrer [HAR12]. Es wurde festgestellt, dass sich die Festigkeit von Si_3N_4 -Proben je nach Oberflächenbehandlungszustand (geschliffen, poliert) um 300 bis 500 MPa steigern lässt, wenn die Proben zuvor bei 1000°C an Luft ausgelagert wurden. Durch diese Temperaturbehandlung wird der Werkstoff oberflächlich oxidiert. Dabei bildet sich ein $0,5\text{-}2 \mu\text{m}$ dicker SiO_2 -Film, der in der Lage ist, oberflächennahe Defekte auszuheilen. Auch wenn in dieser Arbeit keine ausgesprochenen Mikroproben untersucht wurden ($\varnothing=20 \text{ mm}$, $d=2 \text{ mm}$), können sich diese Ergebnisse als relevant für die Arbeiten des SFB erweisen und eine Möglichkeit aufzeigen, auch im Mikrobereich Si_3N_4 für hochfeste Bauteile einzusetzen.

- [ANT09a] N.E. Antolino, G. Hayes, R. Kirkpatrick, C.L. Muhlstein, M.I. Frecker, E.M. Mockensturm, J.H. Adair: Lost Mold Rapid Infiltration Forming of Mesoscale Ceramics: Part 1, Fabrication, *J. Am. Ceram. Soc.* 92 (S1) (2009) S63-S69.
- [ANT09b] N.E. Antolino, G. Hayes, R. Kirkpatrick, C.L. Muhlstein, M.I. Frecker, E.M. Mockensturm, J.H. Adair: Lost Mold-Rapid Infiltration Forming of Mesoscale Ceramics: Part 2, Geometry and Strength Improvements, *J. Am. Ceram. Soc.* 92 (S1) (2009) S70-S87.
- [DAN06] R. Danzer: Some notes on the correlation between fracture and defect statistics: Are Weibull statistics valid for very small specimens? *J. Eur. Ceram. Soc.* 26 (2006) 3043-3049.
- [GIA79] A. Giachello, P. C. Martinengo, G. Tommasini, P. Popper, Sintering of silicon nitride in a powder bed, *J. Mater. Sci.* 14 (1979) 2825-2830.
- [GOR10] L. Gorjan, A. Dakskobler, T. Kosmac: Partial wick-debinding of low-pressure powder injection-moulded ceramic parts, *J. Eur. Ceram. Soc.* 30 (2010) 3013-3021.
- [HAR12] W. Harrer, R. Danzer, R. Morell: Influence of surface defects on the biaxial strength of a silicon nitride ceramic – Increase of strength by crack healing, *J. Eur. Ceram. Soc.* 32 (2012) 27-35.
- [LEE02] S.-H. Lee, G. Rixecker, F. Aldinger, S.-C. Choi, K.-H. Auh: Effects of powder bed conditions on the liquid-phase sintering of Si_3N_4 , *J. Mater. Res.* 17 (2002) 465-472.
- [ÖZK10] E. Özkol, A.M. Wätjen, R. Bermejo, M. Deluca, J. Ebert, R. Danzer, R. Telle: Mechanical Characterisation of miniaturised direct inkjet printed 3Y-TZP specimens for microelectronic applications; *J. Eur. Ceram. Soc.* 30 (2010) 3145-3152.
- [PET02] G. Petzow, M. Herrmann: Silicon Nitride Ceramics; in: *Structure and Bonding* Vol 102, 2002, 47-167.
- [RÖG11] J. Rögner: Mechanische Eigenschaften ungeformter Mikroproben aus CuAl10Ni5Fe4 , ZrO_2 und Si_3N_4 , Shaker Verlag, Aachen, 2011.
- [STA02] J. Stampfl, H.-C. Liu, S.W. Nam, K. Sakamoto, H. Tsuru, S. Kang, A.G. Cooper, A. Nickel, F.B. Prinz: Rapid Prototyping and manufacturing by gelcasting of metallic and ceramic slurries, *Mater. Sci. Eng. A* 334 (2002) 187–192.

- [TOS11] Tosoh Corp., Datenblatt TZ-3Y Qualitäten.
- [TSE99] W.J. Tseng, M. Taniguchi, T. Yamada: Transformation strengthening of as-fired zirconia ceramics, *Ceram. Int.* 25 (1999) 545-550.
- [TSE00] W.J. Tseng, H. Kita: As-fired strength of sintered silicon nitride ceramics, *Ceram. Int.* 26 (2000) 197-202.
- [WAD01] S. Wada, Control of instability of Si_3N_4 during pressureless sintering, *J. Ceram. Soc. Jpn.* 109 (2001) 803-808.
- [YOK00] K. Yokoyama, S. Wada, Solid-Gas Reaction during Sintering of Si_3N_4 Ceramics (Part 4), *J. Ceram. Soc. Jpn.* 108 (2000) 357-364.
- [ZIE87] G. Ziegler, J. Heinrich, G. Wötting, Review: Relationships between processing, microstructure and properties of dense and reaction-bonded silicon nitride, *J. Mater. Sci.* 22 (1987) 3041-3086.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

- **Begutachtete Veröffentlichungen**

- [1] Müller, M.; Rögner, J.; Bauer, W.; Knitter, R.: Influence of the surface constitution on the as-sintered strength of Si_3N_4 microspecimens, *Mater. Sci. Eng. A* 528 (2011) 7895-7900.
- [2] Piotter, V.; Bauer, W.; Knitter, R.; Müller, M.; Müller, T.; Plewa, K.: Powder injection moulding of metallic and ceramic micro parts, *Microsyst. Technol.* 17 (2011) 251-263.
- [3] Cetinel, F. A.; Bauer, W.; Knitter, R.; Haußelt, J.: Factors affecting strength and shape retention of zirconia micro bending bars during thermal debinding, *Ceram. Int.* 37 (2011) 2809-2820.
- [4] Bauer, W.; Müller, M.; Knitter, R.; Börsting, P.; Albers, A.; Deuchert, M.; Schulze, V.: Design and prototyping of a ceramic micro turbine: a case study, *Microsyst. Technol.* 16 (2010) 607-615.
- [5] Piotter, V.; Hanemann, T.; Heldele, R.; Müller, M.; Müller, T.; Plewa, K.; Ruh, A.: Metal and Ceramic Parts Fabricated by Microminiature Powder Injection Molding, *Int. Journal of Powder Metallurgy*, 46, [2] (2010), 21-28.
- [6] Müller, M.; Bauer, W.; Knitter, R.; Rögner, J.: Processing of Complex-Shaped Micro Parts by Reaction-Bonding and Sintering of Silicon Nitride, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, Volume 31 (2010), Issue 8, 213-222.
- [7] Cetinel, F. A.; Bauer, W.; Müller, M.; Knitter, R.; Haußelt, J.: Influence of dispersant, storage time and temperature on the rheological properties of zirconia-paraffin feedstocks for LPIM, *J. Eur. Ceram. Soc.* 30 (2010) 1391-1400.
- [8] Müller, M.; Rögner, J.; Okolo, B.; Bauer, W.; Knitter, R.: Processing of micro-components made of sintered reaction-bonded silicon nitride (SRBSN). Part 2: Sintering behaviour and micro-mechanical properties, *Ceram. Int.* 36 (2010) 707-717.
- [9] Müller, M.; Rögner, J.; Bauer, W.; Knitter, R.: Processing of micro-components made of sintered reaction-bonded silicon nitride (SRBSN). Part 1: Factors influencing the reaction-bonding process, *Ceram. Int.* 35 (2009) 2577-2585.

- **Andere Veröffentlichungen**

- [10] Cetinel, F. A.; Müller, M.; Bauer, W.; Haußelt, J.: Mikrospezifische Festigkeitssteigerung von keramischen Mikrobiegeln durch Oberflächendefektausheilung während der thermischen Entbindeung; GMM-Fachbericht 65 – Technologien und Werkstoffe der Mikrosystem- und Nanotechnik, VDE Verlag (2010) 50-55.
- [11] Rögner, J.; Müller, M.; Lang, K.-H.; Schulze, V.; Sintered Reaction Bonded Silicon Nitride for Micro Mechanical Components, Proc. 7th Intern. Conf. on Multi-Material Micro Manufacture, 17-19 November 2010, Oyonnax, France, 231-234.
- [12] Rögner, J.; Müller, M.; Maisenbacher, J.; Lang, K.-H.; Kraft, O.; Wanner, A.; Schulze, V.: Prozess-Gefüge-Eigenschaftsbeziehungen ungeformter Mikroproben aus Siliziumnitrid; Kolloquium Mikroproduktion, Karlsruhe, 11-12.10.2011

- **Patente**

Entfällt.

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit 01.01.2000 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1	Haußelt, J., Prof. Dr.-Ing.	WER	IAM-WPT	2B	
	2	Bauer, W., Dr.-Ing.	WER	IAM-WPT	8	
	3	Knitter, R., Dr. rer. nat.	MIN	IAM-WPT	4	
	4	Binder, J. Dr. rer. nat.	CHE	IAM-WPT	2B	
	5	Çetinel, F. A.	WER	IAM-WPT	10	
	6	Kaufmann, U., Dr.-Ing.	WER	IAM-WPT	2	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	7	Dörzapf, B.		IAM-WPT	4	
	8	Frey, C.		IAM-WPT	2	
	9	Odemer, C.		IAM-WPT	4	
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	10	Müller, M., Dr. rer. nat.	PRO	IAM-WPT	39	
	11		HW	IAM-WPT	19,25	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter						

Kürzel	Beschreibung
WER	Werkstoffwissenschaften
MIN	Mineralogie
CHE	Chemie
PRO	Feedstockentwicklung, Abformung
HW	Hiwi, möglichst Werkstoffkunde oder Maschinenbau

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

- 1 Prof. Dr.-Ing. J. Haußelt:
Leiter des Instituts für Angewandte Materialien – Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT)
- 2 Dr.-Ing. W. Bauer:
Leiter der Gruppe „Formgebung“ am IAM-WPT. Wissenschaftliche Federführung des Teilprojektes
- 3 Dr. rer. nat. R. Knitter:
Leiterin der Abteilung „Keramik“ am IAM-WPT. Wissenschaftliche Federführung des Teilprojektes

- 4 Dr. rer. nat. J. Binder:
Leiter der Gruppe „Material“ am IAM-WPT. Unterstützung in chemischen Fragestellungen und in der Charakterisierung von Pulvern
- 5 F. A. Çetinel:
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IAM-WPT. Untersuchung von Fragestellungen zur Defektausheilung von ZrO_2 -Mikroproben
- 6 Dr.-Ing. U. Kaufmann:
Wissenschaftliche Mitarbeiterin am IAM-WPT. Unterstützung in Fragestellungen zur thermischen Prozesstechnik
- 7 B. Dörzapf:
Technischer Mitarbeiter, zuständig für Probenpräparation
- 8 C. Frey:
Technischer Mitarbeiter, zuständig für thermische Prozesstechnik
- 9 C. Odemer:
Laborantin, zuständig für keramographische Arbeiten

Die unter 1) bis 9) aufgeführten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind am Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffprozesstechnik beschäftigt und werden über Bundes- bzw. Landesmittel finanziert. Die unter 1) bis 3) aufgeführten Institutsmitglieder sind in ihren Leitungsfunktionen vorwiegend mit der Koordination der Arbeiten im Teilprojekt und der strategischen Planung der in Zukunft anzugehenden Forschungsarbeiten befasst. Dr. Bauer und Dr. Knitter leiten das Teilprojekt und sind in dieser Funktion unmittelbare Betreuer des wissenschaftlichen Mitarbeiters. Dr. Binder leistet wichtige Hilfestellung auf dem Gebiet der Charakterisierung keramischer Pulver. Herr Çetinel untersucht im Rahmen seiner Dissertation Fragestellungen, die auch für das Teilprojekt relevant sind. Die Kompetenz von Fr. Dr. Kaufmann ermöglicht eine Unterstützung in der thermischen Prozesstechnik. Die Laborantinnen und technischen Mitarbeiter 7-9 betreuen die zur Probenpräparation notwendigen Geräte und führen Aufgaben zur Aufrechterhaltung der Versuchsanlagen durch.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

- 10 Dr. rer. nat. M. Müller (wissenschaftlicher Mitarbeiter, EG 13):
Aufgabe des wiss. Mitarbeiters ist die weitgehend selbständige Planung, Durchführung, Auswertung und die wissenschaftliche Aufarbeitung der vorgesehenen Versuche. Hierunter fallen Feedstockentwicklung, Optimierung der Abformung und die Weiterentwicklung der thermischen Prozesstechnik. Des Weiteren obliegt ihm das direkte Zusammenwirken mit den Bearbeitern der anderen Teilprojekte des SFB. Dies betrifft sowohl die Planung und Durchführung von Versuchsprogrammen, um den charakterisierenden Teilprojekten definierte Probekörper und Demonstratorkomponenten zur Verfügung zu stellen, als auch gemeinsam mit diesen Teilprojekten die gemessenen Eigenschaften in Beziehung zu den Herstellungsparametern zu setzen. Er berichtet über den Fortgang der Arbeiten auf Seminaren, Arbeitskreissitzungen sowie nationalen und internationalen Fachtagungen. Diese komplexe Aufgabenstellung erfordert zwingend einen Mitarbeiter mit abgeschlossenem Hochschulstudium im Bereich Werkstoffwissenschaften oder Technische Chemie.
- 11 N.N. (studentische Hilfskraft):
Die studentische Hilfskraft unterstützt den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei Routinearbeiten im Bereich der Versuchsvorbereitung, -durchführung und -auswertung sowie bei der Dokumentation der Ergebnisse

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt A4

5.1.1 Titel

Simulation Mikro-PIM und Mikroguss – Simulation von Mikro-Urformverfahren für die Mikro-Fabrik: Automatisierung und Erweiterung des Partikelsimulators

Simulation of MicroPIM and micro casting – Simulation of microscale primary shaping for the center for integrated micro production: automatization and enhancement of the particle simulator

5.1.2 Projektleitung

Korvink, Jan Gerrit, Prof. Dr. sc. techn., geb. 11.01.1961

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Institut für Mikrosystemtechnik

Georges-Köhler-Allee 103

79110 Freiburg

Telefon: 0761 / 203-7434

Telefax: 0761 / 203-7437

E-Mail: korvink@imtek.uni-freiburg.de

Greiner, Andreas, Dr. rer. nat., geb. 07.08.1960

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Institut für Mikrosystemtechnik

Georges-Köhler-Allee 103

79110 Freiburg

Telefon: 0761 / 203-7384

Telefax: 0761 / 203-7437

E-Mail: greiner@imtek.de

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Die zentrale Fragestellung des Projekts war die Simulation von Befüllvorgängen sowohl beim Mikropulverspritzgießen von pulverbeladenen Feedstocks als auch beim Mikroguss von Legierungen. Für die Simulation der Befüllung von Kavitäten mit Mikrodimensionen wurde im Rahmen dieses Projektes ein Simulationstool erstellt, dessen Kapazität und Einsatzmöglichkeiten sukzessive erweitert wurden. Hierbei wurde insbesondere die Notwendigkeit einer Benutzerschnittstelle identifiziert, die es ermöglicht, das entwickelte Simulationsprogramm einem breiten Kreis von fachkundigen Anwendern bereitzustellen.

Eine wichtige Fragestellung für das Pulverspritzgießen bezog sich auf das Verhalten des Feedstocks unter den extremen Bedingungen des Spritzgießprozesses. Die auftretenden hohen Scherraten wurden als Grund für eine Entmischung des Feedstockmaterials identifiziert und ein entsprechendes Modell für die Pulvermigration wurde basierend auf der Arbeit von Phillips et al. [Phi92] implementiert, dem ein diffusiver Fluss der Feststoffanteile im Feedstock zu Grunde liegt. Hierzu sollten zweidimensionale Dichteprofile berechnet werden, die mit dem Experiment verglichen werden sollten. Es wurde festgestellt, dass die diffusiven Flussmodelle für Poiseuillefluss in der stationären Lösung ein unphysikalisches Verhalten in Regionen mit verschwindender Scherrate zeigen [Phi92]. In Merhi et al. [Mer05] findet sich eine Erweiterung dieses Modells zur Berücksichtigung von Inertialeffekten an gekrümmten Fließlinien. Das Migrationsmodell ist für die resultierende PulverdichteVerteilung von zentraler Bedeutung. Die Dichte des zu sinternden Bauteils ist entscheidend für die Ergebnisse des Sinterprozesses, insbesondere ist sie für den Sinterverzug verantwortlich. Für die Simulation des Sinterns von Pulverkörpern existieren ausgereifte Tools [Rie04], die bei Angabe der GründichteVerteilung eine quantitative Vorhersage der resultierenden Verformung nach dem Sintern ermöglichen [Kra04]. Damit war die Verbesserung des Pulvermigrationsmodells zur genaueren Vorhersage der PulverdichteVerteilung als zentrale Aufgabe für die Erweiterung des implementierten Modells identifiziert worden.

Beim Mikroguss wurden weitere Simulationen zum zeitlichen Ablauf der Erstarrung der Legierung durchgeführt. Es ist besonders die Keimbildung und das Kornwachstum während des Gießprozesses von großem Interesse, da hiervon die Gefüge-Eigenschaftsbeziehung der Mikroteile abhängt. Das Auftreten der verschiedenen Phasen bei unterschiedlicher Prozessführung ist hier von zentraler Bedeutung.

Die Weiterentwicklung des im Teilprojekt entstandenen Simulationstools *Moldyn* war in allen Projektphasen ständiger Bestandteil der Arbeiten. Dabei wurde die Einrichtung einer Benutzerschnittstelle als weiterer zentraler Punkt für diese Arbeiten identifiziert. Die Einrichtung einer Benutzerschnittstelle sollte es erlauben, einer fachkundigen Person, die sich nicht mit den Details des Simulationsprogramms beschäftigen musste, die Bedienung des Programms zu ermöglichen. Da bis zu diesem Zeitpunkt die Bedienung nur mittels einer Skripteingabesprache – in diesem Falle XML (XML = extensible markup language) – möglich war, wurde die Entwicklung einer graphischen Benutzerschnittstelle als wichtige Aufgabe angesehen.

Ergebnisse sowie angewandte und neu entwickelte Methoden

2D Pulverdichteprofile

Das Modell von Phillips wurde auf die Berechnung der Pulverdichteverteilung angewandt. In Bild 1 ist deutlich zu erkennen, wie sich das Dichteprofil in einem Kanal mit quadratischem Querschnitt zeitlich entwickelt. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Pulverpartikeldichte durch Migration weg von den Bereichen hoher Scherraten am Rand hin zur Mitte des Kanals mit der Zeit zunimmt.

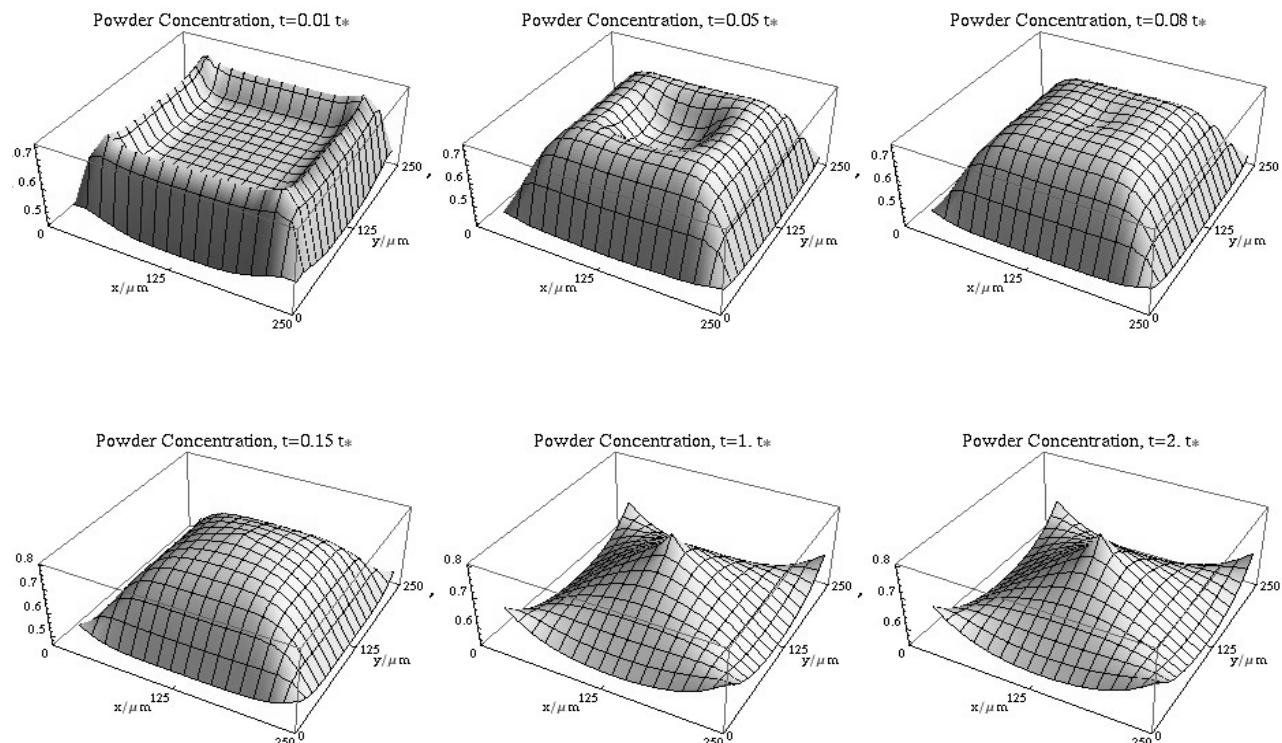


Bild 1: Zeitliche Entwicklung des Pulverdichteprofils in einem Kanal mit quadratischem Querschnitt von 250x250 μm .

In Bild 2 sind in a) die Schnittlinien des Pulverdichteprofils durch den quadratischen Querschnitt der Probe für verschiedene Werte des Verhältnisses der Diffusionskonstanten D_c und der Diffusionskonstante D_η gezeigt. D_c bezeichnet die kollisionsinduzierte Diffusionskonstante und D_η die Diffusionskonstante, die durch Viskositätsgradienten hervorgerufen wird. Der Vergleich mit der CT Messung aus Teilprojekt B1 zeigt eindeutig, dass es sich um einen eingefrorenen transienten Zustand handelt. Das Simulationsergebnis hängt nun von zwei Größen ab, dem Verhältnis D_c/D_η der Diffusionskonstanten und der effektiven Zeit, die die Scherkräfte wirken konnten. Für komplexe Geometrien ist diese Aussage von großer Bedeutung, da je nach Verteilung des Scherfeldes Anhäufungs- und Verarmungszonen zu erwarten sind, die wiederum als wichtige Information für den Sinterprozess und dessen Simulation als Anfangsbedingung eingehen.

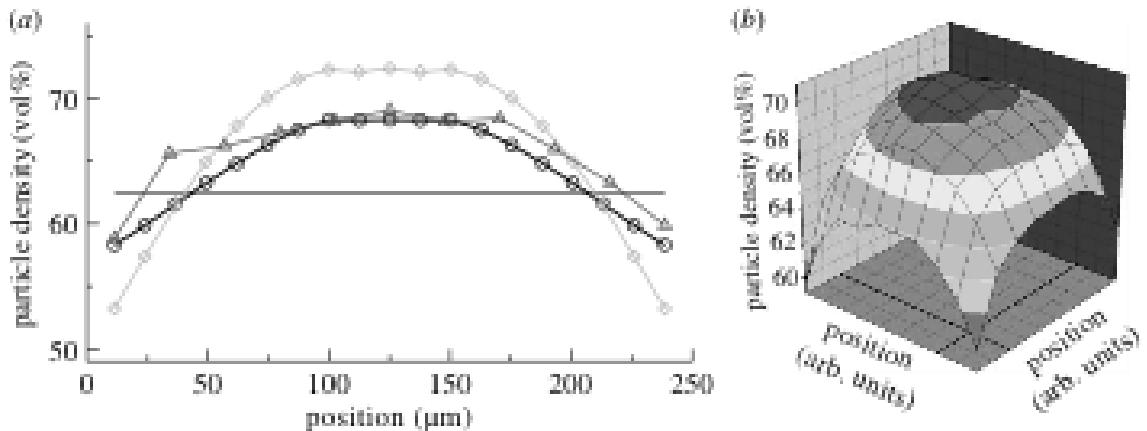


Bild 2: Zeitliche Entwicklung des Pulverdichteprofils in einem Kanal quadratischen Querschnitts von $250 \times 250 \mu\text{m}$. a) Momentaufnahme der Pulverdichte auf der Mittellinie des quadratischen Querschnitts für verschiedene Werte $D_c/D_\eta = 0.1, 0.2$. Die Zeiteinheit in der Simulation beträgt $t^* \approx 66 \text{ ns}$. Ebenfalls gezeigt sind die CT Messung. Diese Symbole bezeichnen die Messpunkte. Die gerade Linie bezeichnet die mittlere Dichte bei $t=0$, Kreise $t=0.11t^*$ und $D_c/D_\eta=0.1$, Rauten $t=0.10t^*$ mit $D_c/D_\eta=0.2$, Dreiecke CT Messung. (b) 2D Grafik der CT Messung [Hel08].

Die in Bild 2 erwähnte Zeitskala verlangt nach einer Erklärung. In der Simulation ist wohlgemerkt nur das Verhältnis der beiden Diffusionskonstanten D_c/D_η so festgelegt worden, dass das aus dem Experiment erhaltene Dichteprofil möglichst gut reproduziert werden kann. Der Absolutwert einer der beiden Größen D_c oder D_η wurde so festgelegt, dass die Simulation in annehmbaren Rechenzeiten bewerkstelligt werden konnte. Da in diesem Fall von einer hydrodynamischen Äquivalenz ausgegangen werden kann, sind die Ergebnisse auf die Absolutwerte für D_c und D_η skalierbar, welche aber leider aus dem Experiment nicht direkt zugänglich sind. Eine direkte Simulation bedeutet, dass ein anderer Zeitintegrationsalgorithmus integriert werden muss. Diese Erweiterung ist mit begrenztem Aufwand im Programm *Moldyn* durch Einbau eines inkompressiblen SPH-Modells möglich.

Sintersimulation

Die Sintersimulation wurde mit dem am Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik in Freiburg vorliegenden Simulationstool *SimPARTIX* [IWM11] durchgeführt. Hierbei galt es vor allem zu zeigen, dass die aus der Migrationssimulation von *Moldyn* erhaltenen Daten für eine Weiterverarbeitung in einem kommerziellen Programm tauglich sind. *SimPARTIX* ist ein Simulationstool, mit dem die Dynamik von granularen Werkstoffen auf Partikelbasis beschrieben wird.

In *SimPARTIX* wird der simulierte Werkstoff in Form einzelner Partikel dargestellt. So wird für ein Pulver jedes einzelne Korn separat berücksichtigt, was eine wesentlich realistischere Beschreibung des Pulververhaltens gegenüber herkömmlichen, kontinuumsmechanischen Simulationsansätzen ermöglicht. Die Wechselwirkung zwischen den Teilchen wird mittels der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) implementiert. Damit ist es möglich ein realistisches Sintermodell zu Grunde zu legen.

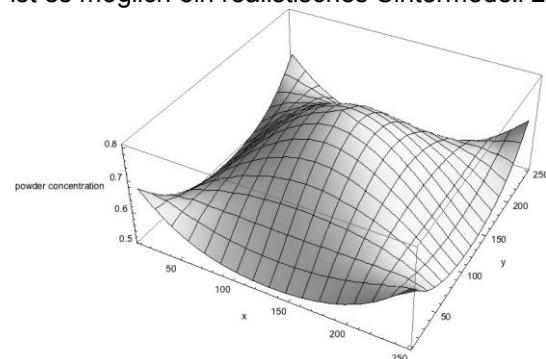


Bild 3: Pulverdichteverteilung in einem quadratischen Kanal der Kantenlänge $250 \mu\text{m}$

Bild 3 zeigt die graphische Aufbereitung der Eingabedaten für das Sintersimulationstool. Hierbei wurde ein Zeitpunkt der Simulation gewählt, bei dem die Pulverdichteverteilung der Simulation mit der der Messung der Pulverdichteverteilung aus dem Spritzgussexperiment möglichst gut übereinstimmt. Mit *Moldyn* wurden die

Daten des Dichteprofils in Form einer simplen dreispaltigen ASCII-Datei erzeugt, die die Koordinaten der Messpunkte im Kanal und die dazugehörige resultierende Pulverdichte enthielt. Diese so ausgegebenen Daten wurden auf das Finite-Elemente-Netz abgebildet um der Sintersimulation eine AnfangsdichteVerteilung des Bauteils zu übergeben. Die abgebildete Verteilung ist in Bild 4 zu sehen. Es sind deutlich die Verarmungs- und Anhäufungszonen zu erkennen.

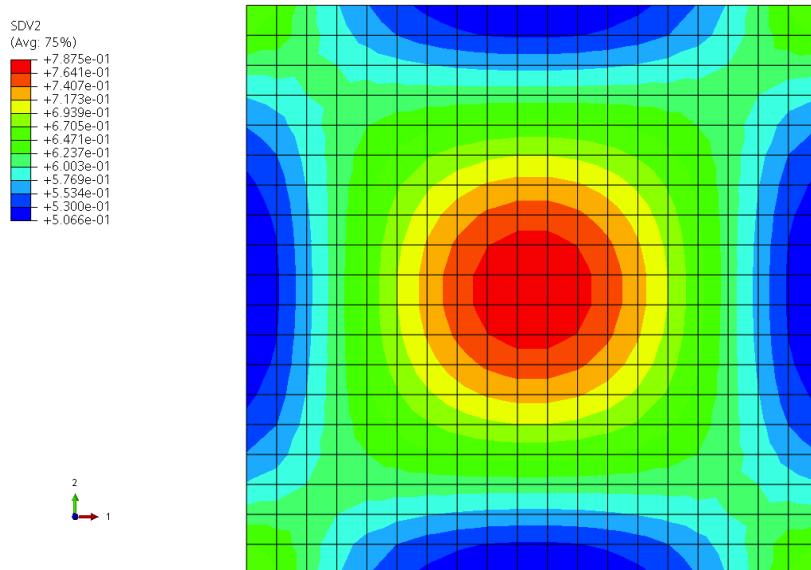


Bild 4: Die auf das FE-Netz gemappte AnfangsdichteVerteilung aus Bild 3

Die Endform nach der Sintersimulation ist in Bild 5 dargestellt. Bei der Berechnung der gesinterten Endform wurde die linke untere Ecke als Referenzpunkt gewählt und deren Verschiebung auf 0 gesetzt. Aus dem Farbplot ist die Verschiebung der Knoten durch den Sinterschrumpf abzulesen. Es ist deutlich an der Formänderung zu erkennen, dass die Bereiche, die, wie in Bild 4 zu sehen, eine niedrigere Anfangsdichte aufweisen einem stärkeren Schrumpf unterliegen. Die inhomogene PulverdichteVerteilung führt also zu einer Formänderung des Bauteils. Da diese Formänderung keinen homogenen Sinterschrumpf darstellt, ist davon auszugehen, dass eine starke Geometrieabhängigkeit für komplexe Bauteile zu erwarten ist.

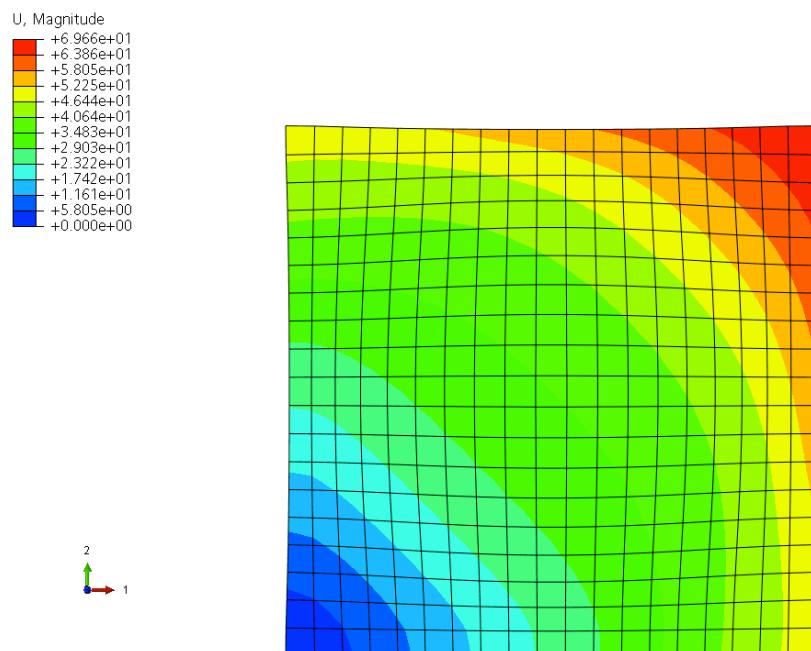


Bild 5: Endform nach der Sintersimulation. Bei der Endform wurde die linke untere Ecke festgehalten, der Farbplot bezeichnet die Amplitude der Verschiebung der Knoten beim Schrumpfen.

Modellverbesserung: nichtlokale Erweiterung

In diesen Untersuchungen lag der Fokus auf der stationären Partikeldichteverteilung in einem Poiseuillefluss zwischen zwei planparallelen Platten. Es wurde nach der einfachsten Erweiterung des ursprünglichen von Phillips aufgestellten Modells gesucht, das gleichzeitig alle dessen Nachteile aufhebt, wie das spitze, nicht-differenzierbare Dichteprofil in der Mitte des Kanals, maximale Packungsdichte bei verschwindender Scherrate, Unabhängigkeit der stationären Verteilung vom Verhältnis zwischen Partikelradius und Kanalbreite.

Die Lösungsstrategie war die Formulierung einer effektiven Deformationsrate in Form einer Taylorreihenentwicklung des Tensors der Deformationsraten, wie sie ein suspendiertes Partikel erfährt [Kau11]. Wir beobachten, dass mit diesem Modell die Migrationsrate mit der n-ten Potenz des Partikeldurchmessers skaliert, wobei $2 < n < 3$ von der Geometrie und dem Flussmodell abhängt. In diesem Modell wird n für eine Migration, die rein durch lokale Effekte bestimmt ist, den Wert 3 annehmen. Das Modell nach Phillips erklärt die Partikelmigration durch zwei Mechanismen, zum einen durch eine räumlich variierende Kollisionsrate der Teilchen und zum anderen durch die räumlich variierende Viskosität.

Für ersten Mechanismus kann ein Scherfluss als eine Ansammlung von Ebenen gesehen werden, die relativ zueinander gleiten. Ein suspendiertes Teilchen verlässt diese Fläche nicht, solange es keine Kollision mit einem anderen Teilchen erfährt. Dies wiederum geschieht, wenn zwei Teilchen benachbarter Scherebenen einander streifend berühren. Da sich die Ebenen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegen, streuen die Teilchen aneinander. Die Zahl der Streuungen ist proportional zum Produkt aus dem Volumen, das die suspendierten Teilchen einnehmen und der lokalen Deformationsrate.

Der zweite Mechanismus ist eine Folge des Konzentrationsgefälles der suspendierten Teilchen. Im Viskositätsmodell erhöht sich die Viskosität mit steigender Partikelkonzentration, wobei hier ein Viskositätsmodell nach Krieger [Kri72] verwendet wurde. Eine höhere Viskosität erzeugt einen größeren Widerstand gegen die Bewegung eines Partikels, daher bewegen sich die Partikel vorzugsweise in Richtung niedriger Viskosität.

Unser Ansatz für eine nichtlokale Erweiterung des Modells nach Phillips enthält keine neuen empirischen Parameter oder Migrationsmechanismen. Hierzu führen wir einen neuen Tensor der Deformationsraten ein, den wir über eine Taylorreihe bezüglich des Abstands vom Zentrum eines Pulverpartikels definieren. Die hieraus resultierende neue Kollisionsrate ist über ein Integral über die Oberfläche eines Teilchens definiert und enthält somit alle Kollisionen des jeweiligen Partikels mit seinen Nachbarn, wie sie durch die neue Deformationsrate definiert sind.

In den Bildern 6 und 7 sind deutlich die Unterschiede zum Modell von Phillips zu sehen. Bild 6 zeigt die Pulverdichteprofile in einem Kanal für verschiedene Verhältnisse der kollisionsinduzierten Diffusionskonstante D_c und der Diffusionskonstante D_η , die durch die Viskositätsgradienten hervorgerufen wird. Das unphysikalische Verhalten des Modells nach Phillips ist hierdurch aufgehoben. Damit konnte gezeigt werden, dass die Berücksichtigung der endlichen Ausdehnung der Partikel eine wesentliche Rolle für die Berechnung der Pulverdichte spielt.

Während im Modell von Phillips die Steigung der Pulverdichte in der Kanalmitte unabhängig vom Durchmesser der Pulverpartikel divergiert, zeigt Bild 8 deutlich die endliche Steigung der Pulverdichtevertteilung im erweiterten nichtlokalen Modell.

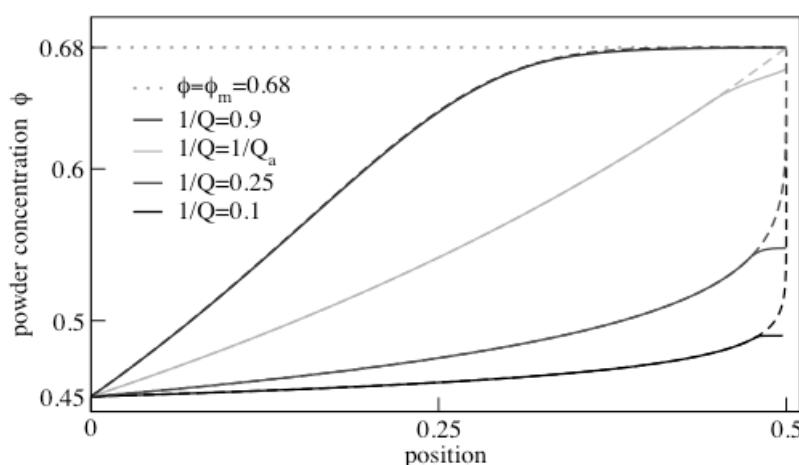


Bild 6: Pulverdichteprofile für die linke Hälfte des Kanals der Einheitsbreite für Partikelradius $a=0.02$ und verschiedene Werte für $1/Q = D_c/D_\eta$, mit abnehmenden Werten von der oberen bis zur unteren Kurve. Die gestrichelte Linie zeigt das Resultat des ursprünglichen Modells von Phillips, während die gepunktete Linie lediglich als Anhaltspunkt für die Sättigungsdichte ϕ_m dient.

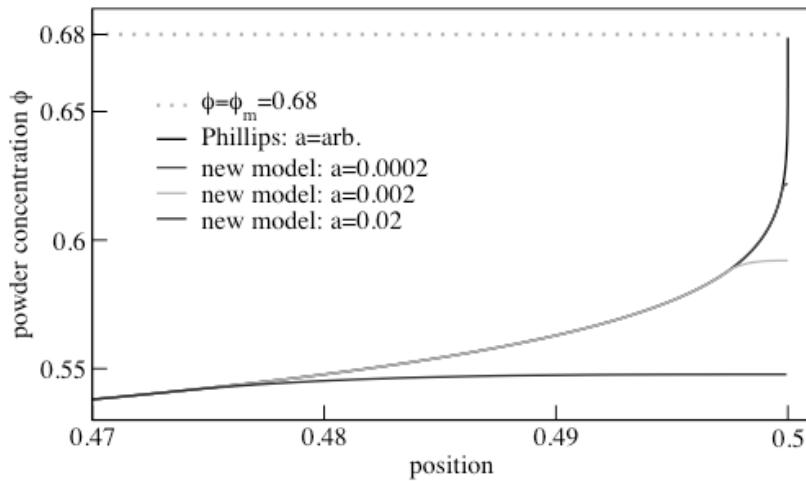


Bild 7: Pulverdichteprofile für die Hälfte des Kanals der Einheitsbreite für verschiedene Partikelradien $a=0.0002 - 0.02$ und $D_c/D_\eta = 0.25$.

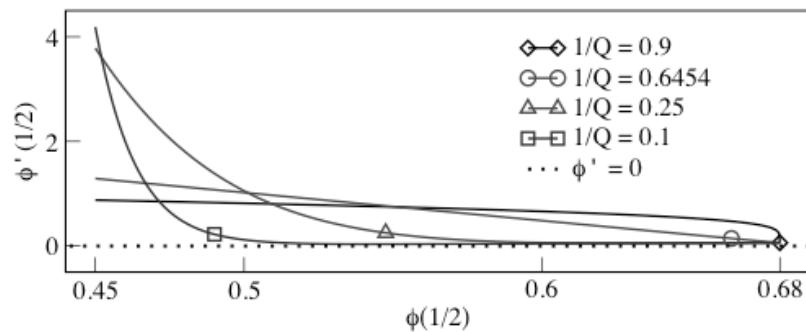


Bild 8: Ableitung der Pulverdichteverteilung aufgetragen über den Wert der Pulverdichte in der Mitte des Kanals für verschiedene Werte für $1/Q = D_c/D_\eta$.

Graphische Benutzeroberfläche

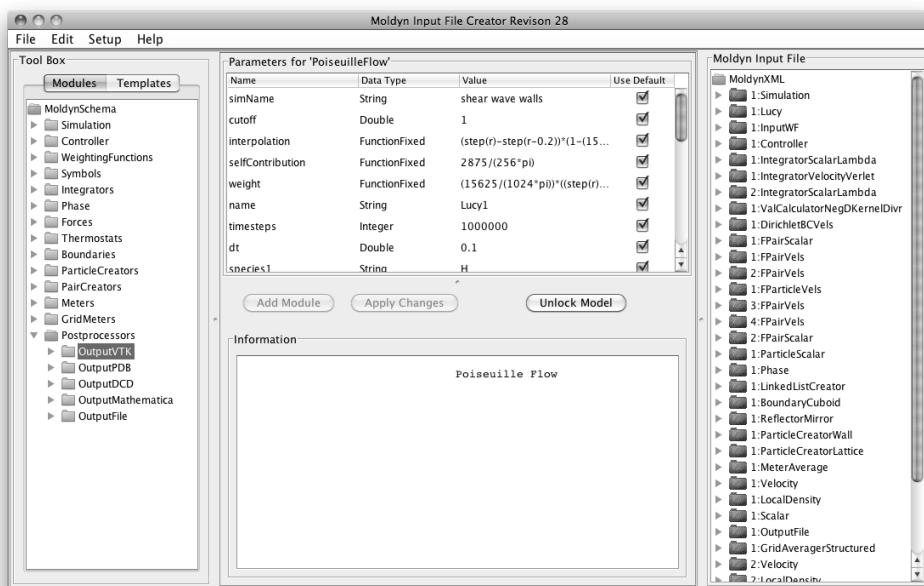


Bild 9: Das Fenster des *Moldyn* GUI, nachdem eine Poiseuilleflow-Simulation aus den Vorlagen aufgesetzt wurde.

Die graphische Benutzeroberfläche (GUI= graphical user interface) zum Simulationsprogramm *Moldyn* ist ein graphisches front-end für das im Rahmen dieses Projektes entwickelte partikelbasierte Simulationsprogramm. *Moldyn* ist ein sehr mächtiges Applikationsprogramm, das es dem Benutzer erlaubt zahlreiche verschiedene partikelbasierte Simulationsmodelle zu benutzen: Molekulardynamik (MD), Dissipative Particle Dynamics (DPD) und Smooth Particle Hydrodynamics (SPH). Der Benutzer hat die volle Kontrolle über die Simulation mittels einer XML-Eingabedatei. In dieser Datei müssen die Parameter der Simulation sowie die mathematischen Ausdrücke für die Modelle festgelegt werden, die zur Laufzeit kompiliert werden. Damit ist eine hohe Leistungsfähigkeit und Flexibilität gewährleistet. Damit wird aber auch klar, dass die Kernkomponente zur Programmsteuerung aus ebendieser XML-Eigabedatei besteht. Die für *Moldyn* erforderlichen Eingabedateien verlangen, dass der Benutzer einer strikten Syntax und Hierarchie folgt. Dies ist vor allem für ungeübte als auch teilweise für erfahrene Benutzer von *Moldyn* eine Herausforderung. Daher wurde zum Zwecke der besseren Zugänglichkeit und dem leichteren Umgang mit dem Programm das GUI als ein zusätzliches Modul erstellt. Das GUI soll dem Benutzer die Arbeit abnehmen, die durch fehlerhafte Syntax und Missachtung der hierarchischen Modulstruktur in *Moldyn* entstehen. Im Folgenden werden wir kurz den technischen Hintergrund des GUI erläutern.

Die Umgebung, die wir für die Entwicklung des *Moldyn* GUI wählten, war Java und eine Anwendungsschnittstelle (API = Application Programming Interface) Swing (ein API der Firma SUN Microsystems, jetzt Oracle) als graphisches front-end. Java wurde gewählt, da das Programm keine Geschwindigkeitseinbußen gegenüber einer kompilierten Hochsprache hat, jedoch Plattform unabhängig und leicht zu strukturieren ist.

Das Fenster des *Moldyn* GUI besteht aus einer Kopfzeile, darunter einer Menüleiste und verschiedene Sichtfenster (siehe Bild 9). Die Sichtfenster sind die Tool Box (Werkzeugkasten) links, die Parameteranzeige in der Mitte mit einer Reihe von Schaltelementen darunter und die Anzeige der *Moldyn* Eingabedatei (*Moldyn* Input File) rechts. In der Mitte unten ist ein Informationsfenster zu sehen, das die mit dem entsprechenden gewählten *Moldyn* Modul abgelegte Information angibt. Die drei Schaltelemente werden benutzt um die *Moldyn* Eingabedatei abzuändern, das auf dem *Moldyn* Eingabedateisichtfenster als eine Liste von Modulen angezeigt wird, die von der Tool Box zugefügt und im Parameterfeld geändert wurden.

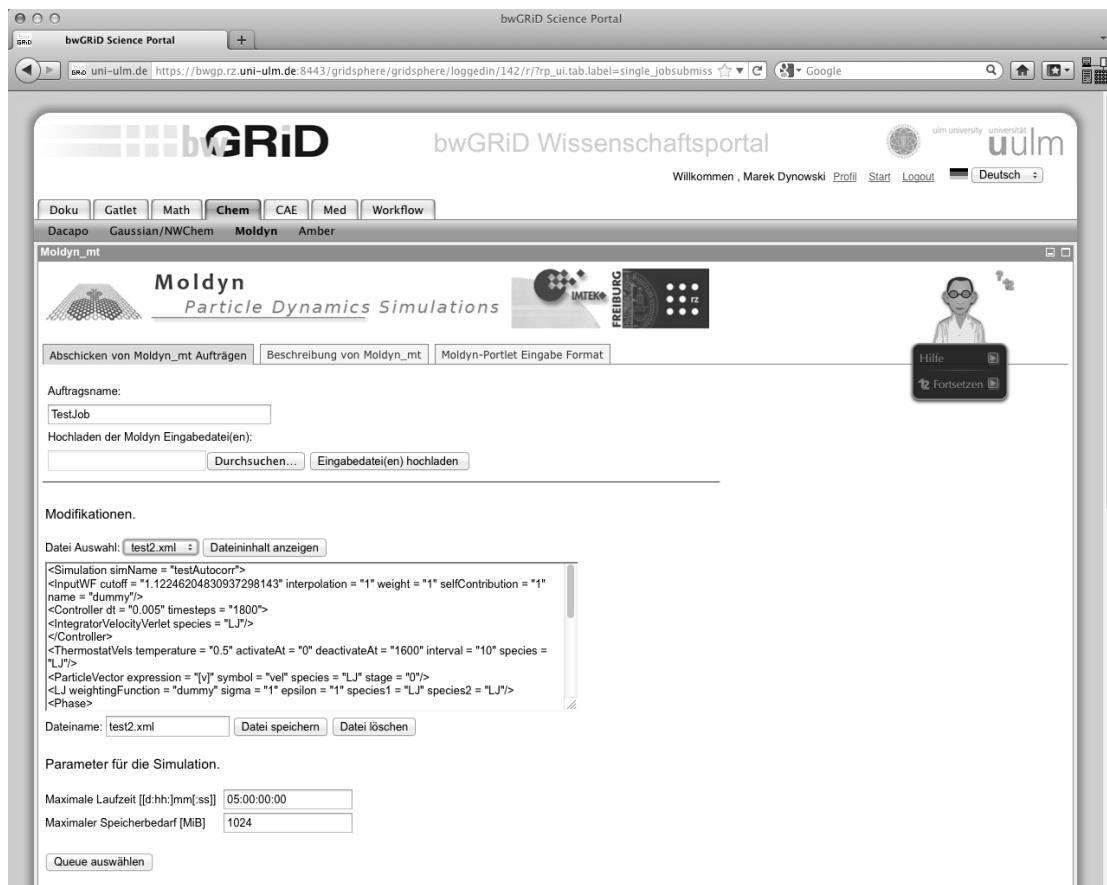


Bild 10: Screenshot des *Moldyn* Portlets für das bwGrid Portal.

Die Tool Box wiederum hat zwei verschiedene Ansichten, zum einen die Modulansicht und zum anderen die Vorlagenansicht (Templates). Diese zwei Ansichten sind das zentrale Element für das Arbeiten mit dem

Moldyn GUI und ihr Unterschied ist äußerst wichtig für den Benutzer. Die Modulansicht stellt alle Module bereit, die *Moldyn* kennt. Diese Module sind eine Erweiterung der XML-Knoten. Sie folgen der XML-Syntax aber das Simulationsprogramm benötigt eine bestimmte Hierarchie dieser Module. Die Einhaltung der Hierarchie der Module wird vom GUI insofern überwacht, als der Benutzer Schritt für Schritt durch den Aufbau einer XML-Eingabedatei geführt wird. Die sukzessive Wahl der zu benutzenden Module wird unterstützt mit der automatischen Darstellung der zum Modul benötigten Attribute, die mit Ihrem Voreinstellungswert belegt sind. Um ein Modul auszuwählen ist der „Add Module“ Schalter zu betätigen und anschließend können die Attribute entsprechend verändert werden. Die Konsistenz der Eingabe wird vom GUI überwacht. Nach Beendigung der Eingabe muss die erzeugte Eingabedatei gespeichert werden. Umgekehrt kann ebenfalls eine bestehende Eingabedatei geöffnet werden und mit Hilfe des GUI bearbeitet werden.

Außer diesem üblichen Arbeitsablauf, bei dem die Module Schritt für Schritt gewählt werden, kann auch mit vorinstallierten Vorlagen gearbeitet werden. Diese sind aus der Vorlagenansicht der Toolbox zu wählen. Nach Auswahl einer Vorlage werden die Parameter im mittleren Feld angezeigt und können nun verändert werden. Hierzu müssen allerdings die voreingestellten Attribute entsperrt werden.

Die graphische Benutzeroberfläche ist für die Benutzung durch Anwender gedacht, die sich nicht mit den Details des Simulationsprogramms beschäftigen wollen. Die Erarbeitung von Vorlagen erlaubt es ein Repertoire bereitzustellen, das verschiedenen Anforderungen genügen kann.

Im Rahmen eines Projekts am Rechenzentrum der Universität Freiburg wurde ein generelles Portal für das bwGRiD - eine dezentrale Ansammlung von Rechenknoten, die von acht Universitäten des Landes Baden-Württemberg betrieben werden - unter portal.bw-grid.de eingerichtet. In Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt A4 wurde ein *Moldyn* Portlet zum Absenden von Single Core Jobs entwickelt (siehe Bild 10). Die Benutzung des im Rahmen des TP A4 entwickelten Simulationsprogramms wird daher auf eine breitere Basis und einem großen Benutzerkreis zur Verfügung gestellt.

Eine Verbindung des Portlets und des GUI ist in Zusammenarbeit mit dem Rechenzentrum der Universität Freiburg in der Umsetzungsphase. Das in Java entwickelte GUI wird für *Moldyn* über das bwGRID portlet, über welches *Moldyn* bereits verfügbar ist, mittels „Java Web Start“ direkt im Browser aufrufbar sein. Damit wird es möglich sein, das GUI im Browserfenster zu benutzen, XML Eingabedateien für *Moldyn* zu erstellen und lokal auf dem Client Rechner zu speichern. Anschließend wird die lokal gespeicherte Eingabedatei für *Moldyn* im bwGRID portlet hochgeladen und als *Moldyn* Job abgeschickt.

Die Vorteile liegen auf der Hand: die GUI Software wird zentral verwaltet und aktualisiert, d.h. die Benutzer haben immer die aktuellste Version der GUI-Software, die zu der Version korrespondiert, die als ausführbares Programm auf dem bwGRID installiert ist. Änderungen bzw. Ergänzungen können schnell eingepflegt werden und müssen nicht mehr verteilt werden. Dies betrifft z.B. die Pflege der im GUI verfügbaren Templates, die entscheidend von der Version des ausführbaren Programms abhängen.

Mikroguss

Die Gießversuche für Aluminium Bronze wurde am Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik, des KIT Karlsruhe im Teilprojekt D1 durchgeführt. Die resultierenden Schliffbilder zeigen die vollständige Erstarrung der Legierung mit α , der hellen Phase und β , der dunklen Phase im Bild 11 (links), und der κ -Phase dazu im Bild 11 (rechts). Aufgrund der niedrigen Erstarrungsgeschwindigkeit zeigt das Schliffbild der Probe einer Muffeltemperatur von 700°C reichen dendritischen Charakter. Wohingegen die bei 1000°C Muffeltemperatur ausgewertete Probe reicher an Eisenausfällen ist, und daher sollte diese Probe eine höhere Zugfestigkeit haben. Der Maßstab der Schliffbilder beträgt 20 μm .

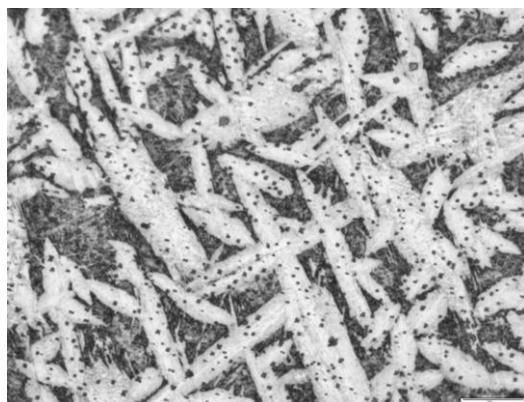


Bild 11: Schliffbilder bei Muffeltemperatur 700°C (links) und 1000°C (rechts) mit Vakuumdruckguss.

Kuplan [Kup78] behauptet die Aluminium Bronze Legierung erstarre als Einphasen β -Struktur, obwohl die obigen Schliffbilder die Erstarrung als mehrphasige Mikrostruktur zeigen, d.h. bei der Probe mit Muffeltemperatur 700°C α - und β -Phase und bei 1000°C Muffeltemperatur zusätzlich noch die κ -Phase. Die α -Phase wächst auf den β -Phasen Korngrenzen. Die Nickel-Eisen-Aluminium κ -Phase wird dann aus der β -Phase als abgerundete oder dendritische „Rosetten“ reich an Eisenausfällen abgeschieden, während bei niedrigeren Temperaturen eine lamellare Form der κ -Phase zusammen mit weiteren Ablagerung der α -Phase auf bestehenden α -Bereichen entsteht. Dies wird fortgesetzt, bis alle β -Phasen in α - und κ -Phasen umgewandelt worden sind, obwohl kleine Bereiche aus der β -Phase beibehalten werden können und in den meisten Gusszuständen gefunden werden.

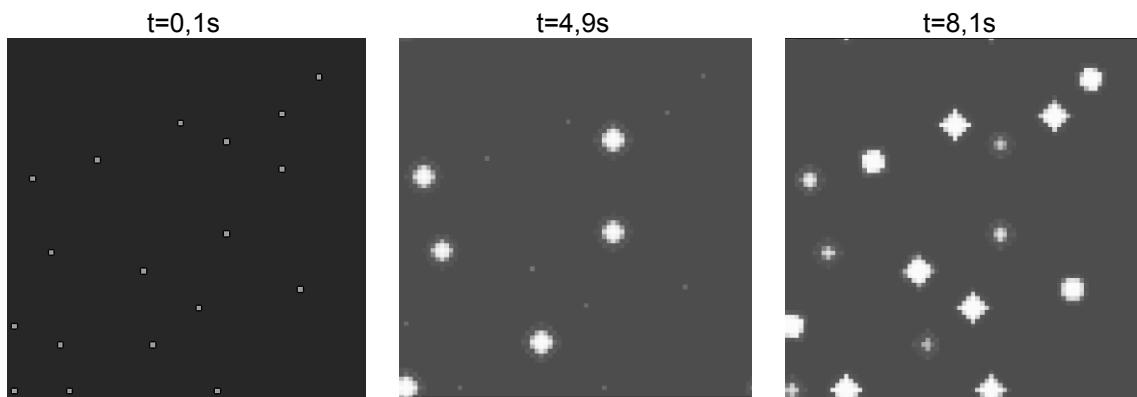


Bild 12: Erscheinungsbild der β -Phase in Simulationsergebnis bei $t = 0,1\text{s}$, α bei $4,9\text{s}$ und bei $8,1\text{s}$ mit deutlich kugelförmiger Struktur.

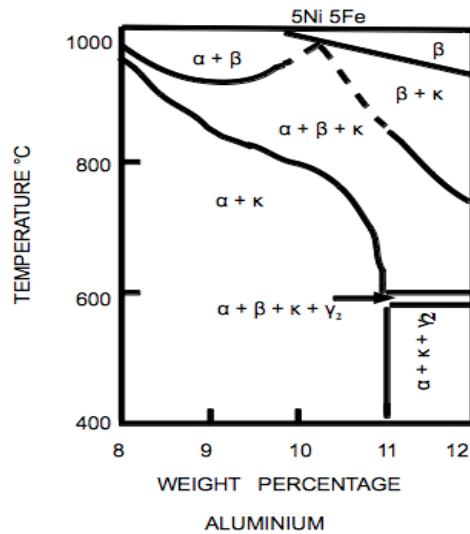


Bild 13: Senkrechter Schnitt durch das Phasendiagramm des Cu-Al-Ni-Fe-System mit 5% Fe, 5% Ni.

Bild 12 zeigt die simulierten kugelförmigen Merkmale einer gleichachsigen erstarren Legierung. Die Simulationsdomäne besteht aus 80×80 Zellen mit einer Zellgröße von $0.5\mu\text{m}$. Die Wärmeabzugsrate für die Erstarrungssimulation ist $-50\text{ J/cm}^3\text{s}$. In diesem Simulationssetup, treten zwei Phasen aus der blaugefärbten flüssigen Phase in Erscheinung, die erste als β -Phase beim ersten Zeitschritt und beim zweiten Zeitschritt die α -Phase bei $4,9\text{s}$, die im Setup so eingerichtet wurde, dass sie an dem Interface der β -Phase anfing zu wachsen. Bei $8,1\text{s}$ kann ein kugelförmiger Charakter aller Körner beobachtet werden, was das Ende der Keimbildung und die Annäherung an die bevorstehende vollständige Erstarrung anzeigt. Die Reihenfolge des Auftretens der Phasen, nämlich α , β , κ und γ_2 , lässt sich aus dem Phasendiagramm im Bild 13 verstehen. Das Phasendiagramm gibt uns einen guten Hinweis auf die Anfangstemperatur, die sogenannte ‘Temperature at the bottom’, für die Simulation.

Während der Wachstumsphase wurden folgende Beobachtungen in der Mehrphasensimulation gemacht. Nach der Entstehung der β -Phase, die so eingestellt wurde, dass sie im Volumen der Schmelze zu wachsen begann, verschwanden einige Körner dieser Phase vollständig und andere teilweise, so dass von ihnen nur das Interface übrig blieb. Wenn wir die Energiesituation in der Umgebung der Körner betrachten, können wir die Körner in zwei Gruppen unterteilen. Die erste Gruppe beinhaltet alle Körner, deren Wachstum fortschreitet. Sie liefern die latente Wärmeenergie während der Phasenumwandlung von flüssig nach fest. Die andere Gruppe kann diese Energie nicht abgeben, weil ihre Position ungünstig ist. Das heißt, es gibt zu viele Körner in ihrer Nachbarschaft, die ihre latente Energie abgeben. Daher müssen die Körner der letzteren Gruppe diese Energie aus der Umgebung aufnehmen, ihre Gibbs'sche Energie wird positiv und als Resultat verschwinden die Körner dieser Gruppe. Dieses Phänomen tritt in einem einfacheren binären Legierungssystem wie Aluminium-Kupfer mit zwei Phasen nicht auf, weil für diese Legierung das Phasendiagramm der MICRESS-Datenbank anhand von Literaturdaten verifiziert ist. Damit sind auch Probleme wie die unvollständige Erstarrung oder das Verschwinden von Körnern nicht zu beobachten.

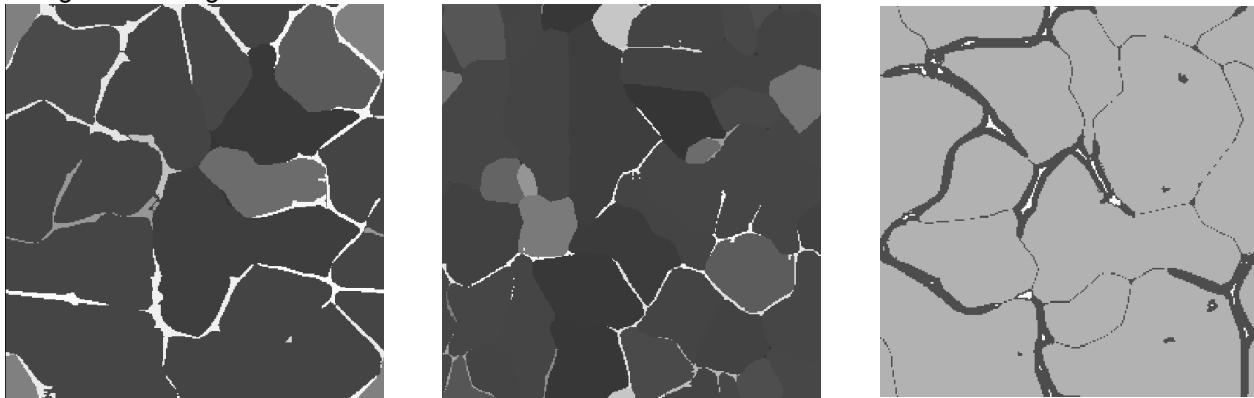


Bild 14: Simulationsergebnisse der binären AlCu-Legierung mit Abkühlrate, dT/dt (K/s). Links: -5, Mitte: -10 und Rechts: -10 (mit α und β Phasen).

Im Bild 14 sind in den beiden linken Bildern die ersten beiden Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Abkühlraten dargestellt, links -5K/s und rechts -10K/s. Die verschiedenen Graustufen kodieren verschiedene Kornnummern. Die Kornnummer ist keine physikalische Eigenschaft, sondern ermöglicht die Identifizierung der Körner in den Ergebnissen aus MICRESS. Das rechte Bild zeigt als Ergebnis eine Phasen- und Grenzflächenregion, in denen die α -Phase (FCC) weiß dargestellt ist, die β -Phase (BCC) ist orange dargestellt und die blaue Farbe steht für die flüssige Phase.

Die Wärmeabzugsrate ist vor allem verantwortlich für die Geschwindigkeit, mit der die Mikrostruktur gebildet wird. Je höher die Rate ist, desto schneller beginnt die Keimbildung und desto schneller ist das Kornwachstum und führt daher zu einer beschleunigten vollständigen Erstarrung. Mit steigender Wärmeabzugsrate dH/dt , wie in Bild 15 gezeigt (von 10 bis 250 J/cm^3s), werden die Körner völlig kugelförmig und zeigen eine zunehmende Korngröße von 1,5 bis 3,1 μm . In den Simulationsergebnissen steigt ab einer Wärmeabzugsrate von 50 J/cm^3s die Zahl der Keimbildung stark an. Der Maßstab für die Simulationsergebnisse ist 10 μm . Für das Simulationssetup ist die Eingabe der Interfacemobilität und der Oberflächenenergie als Phasenparameterwerte für die Phasen α und β erforderlich. Diese Parameter sind für die Wachstumsphase wichtig. Die Ergebnisse wurden entweder durch Variation maximal eines Parameters in jeder der beiden Phasen gleichzeitig untersucht, wie in den ersten zwei Simulationsergebnissen in Bild 16 dargestellt oder nur durch die Variation eines Parameters einer Phase für die nachfolgenden Ergebnisse beobachtet.

Das hilft uns, die Auswirkungen der Parametervariation auf die Keimbildung und das Kornwachstum besser zu verstehen. In Bild 16 sind kugelförmige mikrostrukturelle Körner im linken Bild zu beobachten. Die Verringerung der Interface Mobilität für die Phase β und die Oberflächenenergie für die Phase α auf ein Zehntel zeigt in dem nachfolgenden Ergebnis, dass eine erhöhte Keimbildung und ein erhöhter Anteil der Körner mit dendritischem Charakter zu beobachten ist. Weitere Verringerung der Interfacemobilität der β -Phase, ergibt eine noch erhöhte Keimbildung, dargestellt im vorletzten Simulationsergebnis. In dem letzten Ergebnis geht der dendritische Charakter deutlich verloren und die Körner erlangen unregelmäßige Formen, wenn die Oberflächenenergie für β auf ein Zehntel des vorherigen Wertes der Oberflächenenergie ($17e-6 J/cm^2$) reduziert wird. Daher wird deutlich, wie groß der Einfluss der Phasenparameter Oberflächenenergie und Interfacemobilität auf das Kornwachstum für Mikrostrukturentwicklung ist.

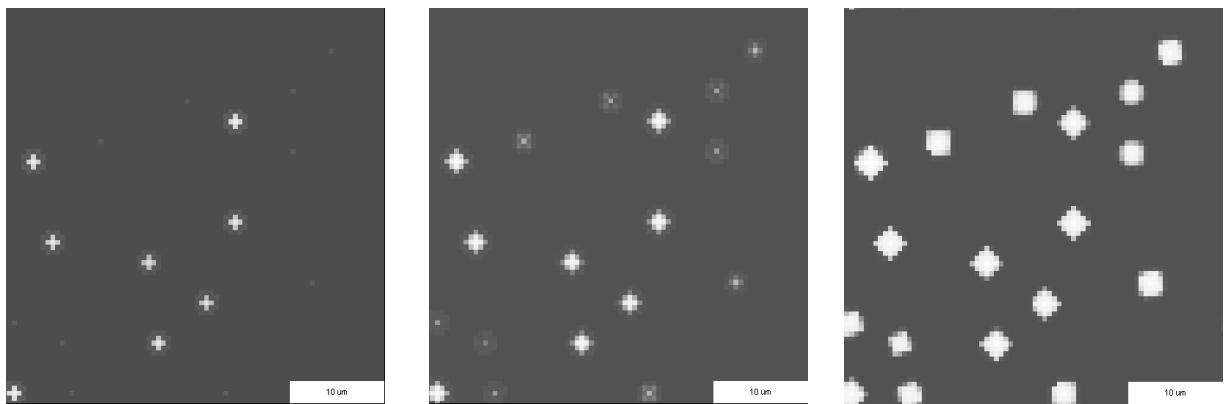


Bild 15: Verschiedene Wärmeabzugsraten, dH/dt (J/cm³s) für Zeitschritt $t=6,5$ s: links: -10, Mitte: -50 und rechts: -250.

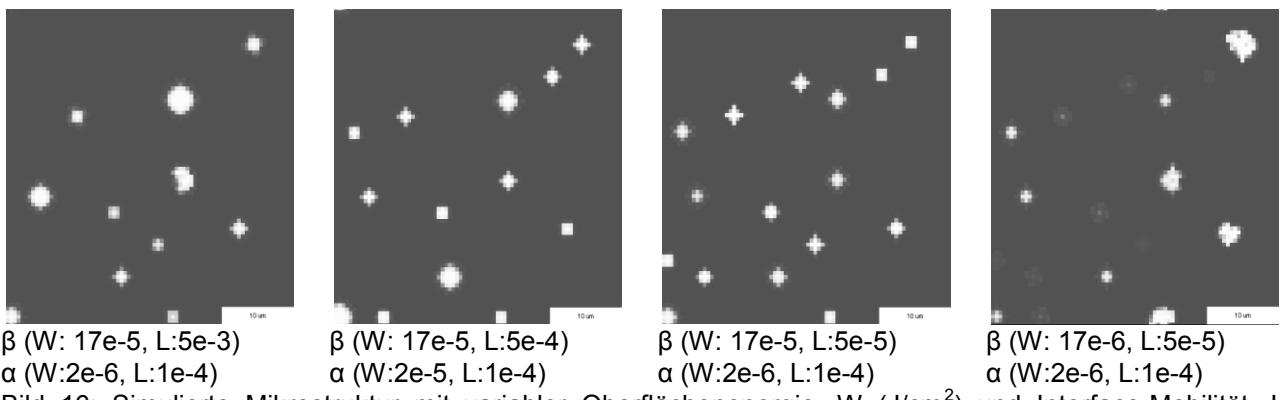


Bild 16: Simulierte Mikrostruktur mit variabler Oberflächenenergie, W (J/cm²) und Interface-Mobilität, L (cm⁴/Js) für Phasen α und β

Zusammenarbeiten mit anderen Wissenschaftlern

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs fand eine intensive Zusammenarbeit mit den abformenden Teilprojekten statt. Besonders wichtig war in diesem Zusammenhang die Verknüpfung mit dem Teilprojekt B1 „Formmassen“. Die rheologischen Daten und die Pulverpartikeleigenschaften der Feedstocks waren von zentraler Bedeutung für die Verbesserung der Modelle zur Pulverpartikelmigration. Die Prozessführung im Teilprojekt C2 und die Gefügestrukturen aus D1 waren für die Gussimulation wichtige Eingabedaten.

Die Mitarbeit im Arbeitskreis Dimensionierungskonzept diente der Überführung der Ergebnisse bezüglich des Bauteilezustandes einer ganzheitlichen Simulation zur Beurteilung zur Bauteildimensionierung. In diesem Zusammenhang war die Mitarbeit im Arbeitskreis integrierte Mikrofertigung besonders wichtig. Der zentrale Punkt der Ergebnisse aus dem Teilprojekt A4, der die Erstellung einer Benutzerschnittstelle für das Simulationsprogramm *Moldyn* zum Ziel hatte, geht direkt in das für den Arbeitskreis integrierte Mikrofertigung definierte Ziel der Zusammenführung der Kompetenzen ein und ermöglicht somit eine Weitergabe der erarbeiteten Ergebnisse und Nutzung durch Dritte.

Besonders zu betonen ist die gute Zusammenarbeit mit dem Rechenzentrum der Universität Freiburg und hier besonders mit Herrn Dr. Marek Dynowski von der Abteilung Forschung und Entwicklung, der für die Erstellung des Portlets zur Nutzung von *Moldyn* auf dem bwGRID verantwortlich ist.

Über die enge Zusammenarbeit im Rahmen des SFB499 hinaus bestand ein reger Austausch mit Experten der Partikeldynamiksimulation. Hierbei ist besonders die intensive Zusammenarbeit mit Prof. Pep Español vom Institut für Physik der Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, Spanien, hervor zu heben, der von November 2008 bis Oktober 2009 als visiting Fellow am Freiburg Institute for Advanced Studies (FRIAS) zu Gast war.

Vergleiche zu Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Der wichtigste Erfolg der im Rahmen dieses Projekts entwickelten Modelle zur Pulvermigration lässt sich an dem Vergleich mit den Anstrengungen der Arbeiten von Phillips [Phi92] messen. Im Vergleich zu diesen Arbeiten, die über lange Zeit als Stand der Forschung galten, kann die im Teilprojekt A4 entwickelte nichtlokale Erweiterung der Modelle entscheidend unphysikalisches Verhalten der Simulationsergebnisse abfan-

gen. Dies ist wiederum von entscheidender Bedeutung für den im Arbeitskreis integrierte Mikrofertigung erarbeiteten Zugang zur Nutzung der Ergebnisse über die graphische Benutzerschnittstelle.

Probleme und Schwierigkeiten

Schwierigkeiten wurden bei der Gußsimulation identifiziert. Hierbei sind die thermodynamischen und kinetischen Parameterdaten quaternärer Legierungssysteme (Bronzen), die als Eingabedaten für das verwendete Programm MICRESS dienen, dafür verantwortlich, ob die im Experiment beobachteten Phasen auch in der Simulation ermittelt werden. Besondere Probleme bereitete hier das Verschwinden der Körner der α -Phase beim Abkühlvorgang, was im Experiment aber definitiv nicht beobachtet wird. Dort wird diese Phase immer nachgewiesen.

Relevante Publikationen nichtbeteiligter Autoren

- [Hel08] Heldele, R., Entwicklung und Charakterisierung von Formmassen für das Mikropulverspritzgießen. PhD thesis, University of Freiburg (2008)
- [IWM11] Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, <http://www.simpantix.de>
- [Kri72] Krieger IM, Rheology of monodisperse lattices. *Adv Colloid Interface Sci* 3(2):111–136 (1972)
- [Kra04] Kraft, T.; Riedel, H.: Numerical Simulation of Solid State Sintering- Model and Application; *J. Europ. Ceram. Soc.* 24 (2004), pp. 345-361
- [Kup78] E. A. Kuplan, G. Rose: Microstructural characterization of cast nickel aluminium bronze, *Journal of Materials Science*, 13, 1647 – 1649 (1978)
- [Mer05] Merhi, D.; Lemaire, E.; Bossis, G.; Moukalled, F: Particle migration in a concentrated suspension flowing between rotating parallel plates: Investigation of diffusion flux coefficients; *J. Rheol* 49(6) (2005), pp. 1429-1448
- [Phi92] Phillips RJ, Armstrong RC, Brown RA, Graham AL, Abbott JR, A constitutive equation for concentrated suspensions that accounts for shear-induced particle migration. *Phys Fluids A* 4(1):30–40 (1992)
- [Rie04] Riedel, H.; Kraft , T.: Simulations in Powder Technology; in: *Continuum Scale Simulation of Engineering Materials: Fundamentals-Microstructures-Process Applications*, D. Raabe, F. Roters, F. Barlat, L.Q. Chen (eds.), Wiley-VCH, Berlin (2004), pp. 641-658

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten in Publikationsorganen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

- [Gre11] A Greiner, D Kauzlaric, JG Korvink, R Heldele, M Schulz, V Piotter, T Hanemann, O Weber, J Haußelt: Simulation of micro powder injection moulding: powder segregation and yield stress effects during form filling, *J Eur Ceram Soc*, 2011, 31 (14), 2525-2534 , <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.02.008>
- [Kau11a] D Kauzlaric, A Greiner, JG Korvink: A non-local extension of the Phillips model for shear induced particle migration, *Microsyst Technol*, 2011, 17 (2), 265-272, <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-011-1280-4>
- [Kau11b] D Kauzlaric, L Pastewka, H Meyer, R Heldele, M Schulz, O. Weber, V Piotter, J Hausselt, A Greiner, JG Korvink: Smoothed particle hydrodynamics simulation of shear-induced powder migration in injection moulding, *Philos T R Soc A*, 2011; 369 (1945), 2320-2328, <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2011.0043>
- [Kau11c] D Kauzlaric, P Espanol, A Greiner, S Succi: Three Routes to the Friction Matrix and Their Application to the Coarse-Graining of Atomic Lattices, *Macromol Theor Simul*, 2011; 20 (7): 526-540 : <http://dx.doi.org/10.1002/mats.201100014>
- [Kau11d] D Kauzlaric, JT Meier, P Espanol, S Succi, A Greiner, JG Korvink: Bottom-up coarse-graining of a simple graphene model: The blob picture, *J Chem Phys*, 2011; 134 (6): 064106. : <http://dx.doi.org/10.1063/1.3554395>
- [Cen11] Cenova, D Kauzlaric, A Greiner, JG Korvink: Constrained simulations of flow in haemodynamic devices: towards a computational assistance of magnetic resonance imaging measurements, *Philos T R Soc A*, 2011, 369 (1945), 2494-2501, <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2011.0028>
- [Kau09] D Kauzlaric, A Greiner, JG Korvink: Process simulation with particle methods: micropowder injection moulding and hot embossing, In: HJ Ritzhaupt-Kleissl, P Johander (Hrsg.): Ceramics processing in microtechnology Dunbeath: *Whittles Publishing*, 2009; 34-43.

b) Andere Veröffentlichungen

- [Pas11] R Pasricha, N Steinert, D B Ahmeti, A Greiner, J G Korvink: Simulation of solidification of Aluminium Bronze, Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB499, 11.-12- Oktober 2011, Karlsruhe
- [Cen10] Cenova, A. Greiner, D. Kauzlaric, J. G. Korvink, V. Piotter, T. Hanemann, O. Weber und J. Hausseit, PIM-Simulation mit der Smoothed Particle Hydrodynamics Methode: Herausforderungen im Mikrobereich, DKG-Symposium. 30.11.-1.12.2010, Erlangen
- [Kor10] J.G. Korvink, D. Kauzlaric, D. Weiß, J. Lienemann, A. Greiner, O. Liba & Y. Hanein: Particle dynamic methods for microsystem applications (Invited Paper), PROCEEDINGS OF THE FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING, MECHANICS AND COMPUTATION, 6-8 SEPTEMBER 2010, CAPE TOWN, SOUTH AFRICA, p. 61
- [Lie09] J Lienemann, I Cenova, D Kauzlaric, A Greiner, JG Korvink: Kopplung der Smoothed Particle Hydrodynamics-Methode mit einem Wärmetransportmodell reduzierter Ordnung für die schnelle Simulation des Mikrogussprozesses, 4. Kolloquium Mikroproduktion, 2009: 99-104.

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit Januar 2003 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufen-de Num- mer	Name, aka- demischer Grad, Dienststel- lung	engere Fachzu- gehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruni- versitären Ein- richtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstun- den	Katego- rie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerin- nen und Wissen- schaftler	1	Korvink, Prof. Dr.	Mikrosystem- technik	IMTEK	2	
	2	Greiner, Dr.	Mikrosystem- technik	IMTEK	6	
nichtwissenschaftli- che Mitarbeiterin- nen und Mitarbeiter	3	Koopmann, A.		IMTEK	1	
	4	Bach- schmidt, G.		IMTEK	1	
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerin- nen und Wissen- schaftler	5	Lienemann, J., Dr.-Ing.	Mikrosystem- technik	IMTEK	39	E13
	6	Kauzlaric, D., Dr.-Ing.	Mikrosystem- technik	IMTEK	39	E13
	7	Weiss, D., Dipl.-Ing.	Mikrosystem- technik	IMTEK	31	
	8	Pasricha, R., Dipl.-Ing.	Mikrosystem- technik	IMTEK	39	
	9	Jain, G. M.Sc.	Mikrosystem- technik	IMTEK	19.5	
	10	Cenova, I., M.Sc.	Mikrosystem- technik	IMTEK	39	
	11	Fuchs, A., Dipl.-Ing.	Mikrosystem- technik	IMTEK	19.5	
	12	Grünert, O., Dipl.-Ing.	Mikrosystem- technik	IMTEK	19.5	
nichtwissenschaftli- che Mitarbeiterin- nen und Mitarbeiter						

Aufgabenbeschreibung von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Grundausstattung für die berichtete Förderperiode

1. Prof. Jan G. Korvink
Leiter des Lehrstuhls Simulation, Leiter des Teilprojekts
2. Dr. A. Greiner
Gruppenleiter am Lehrstuhl Simulation, Leiter des Teilprojekts
3. A. Koopmann
Fremdsprachenskretärin am Lehrstuhl Simulation
4. G. Bachschmidt
Fremdsprachenskretärin am Lehrstuhl Simulation

Die unter 1) bis 4) aufgeführten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind am Lehrstuhl für Simulation des Instituts für Mikrosystemtechnik beschäftigt und wurden über Landesmittel finanziert. Die unter 1) und 2) aufgeführten Institutsmitglieder waren in ihrer Funktion als Lehrstuhl- bzw. Gruppenleiter vorwiegend mit der Koordination der Arbeiten im Teilprojekt betraut. Prof. Korvink und Dr. Greiner leiteten das Teilprojekt und waren in dieser Funktion unmittelbare Betreuer der wissenschaftlichen Mitarbeiter. Die Fremdsprachensekretärinnen Frau Koopmann und Frau Bachschmidt arbeiteten bei der verwaltungstechnischen Abwicklung des Projektes mit.

Aufgabenbeschreibung von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Ergänzungsausstattung für die berichtete Förderperiode

5. Dipl.-Ing. D. Kauzlaric
Die Bearbeitung des Teilespekts μ PIM des Teilprojektes A4 Simulation wurde hauptsächlich von Herrn Kauzlaric vorgenommen. Dazu gehörte die Implementierung von Programmcode für partikelbasierte Simulation.
6. Dr.-Ing. Jan Lienemann
Herrn Dr. Lienemann oblag die Bearbeitung des Teilespekts μ Guss. Dies umfasste ebenfalls die Implementierung von Programmcode für Partikelsimulation. Simulationen mit MICRESS und die Gefügevorhersage waren ebenfalls Teil der Aufgabe.
7. Dipl.-Ing. Dennis Weiss
Die Expertise von Herrn Weiss in Bezug auf die Programmierung wurde in einer zeitlich kurzen Mitarbeit Teilprojekt eingesetzt.
8. Dipl.-Ing. Raghav Pasricha
Nach dem Ausscheiden Herrn Dr. Lienemanns übernahm Herr Pasricha die Aufgaben im Mikroguss. Hierzu gehörten vor allem die Simulation der Gefügebildung mit MICRESS.
9. M.Sc. Gaurav Jain
Herr Jain arbeitete im Mikroguss an der Simulation der Wärmeleitung mit.
10. M.Sc. Iva Cenova
Vor ihrer Anstellung als wissenschaftliche Mitarbeiterin war Frau Cenova bereits als Studentische Hilfskraft im Projekt tätig und führte unter Anleitung von Dr. Kauzlaric Programmieraufgaben aus. Nach dem Ausscheiden Herrn Dr. Kauzlarics übernahm Frau Cenova die Aufgaben im Projektteil μ PIM. Sie führte die Simulationen zur Vorbereitung der Sintersimulation durch und leitete Hauptverantwortlich die Erstellung der graphischen Benutzeroberfläche.
11. Dipl.-Ing. Andreas Fuchs
Herr Fuchs arbeitete bereits als Studentische Hilfskraft im Bereich der μ PIM Simulation bei der Erstellung und Auswertung von Simulationen mit. Nach dem Ausscheiden von Frau Cenova

übernahm er als wissenschaftlicher Mitarbeiter die Aufgaben zur Erstellung einer graphischen Benutzeroberfläche und organisierte den Kontakt zu dem am RZ der Universität angesiedelten GridPortal Projekt.

12. Dipl.-Ing. Oliver Grünert

Auch Herr Grünert war bereits als Studentische Hilfskraft im Projekt tätig. Nach seinem Abschluss und dem Ausscheiden von Frau Cenova übernahm er die Tätigkeiten zur Simulation mit *Moldyn*.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt B1

5.1.1 Titel

Formmassen – Formmassen für 1K- und 2K-Mikro-Pulverspritzgießen

Feedstock – Feedstock development for 1C- and 2C-Micro-powder injection molding

5.1.2 Projektleitung

Hanemann, Thomas, Prof. Dr.-Ing., geb. 24.03.1963, deutsch

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT)

Postfach 3640

76021 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-22585

Telefax: 0721 / 608-22095

E-Mail: thomas.hanemann@kit.edu

Haußelt, Jürgen, Prof. Dr.-Ing., geb. 21.05.1946, deutsch

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT)

Postfach 3640

76021 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-22518

Telefax: 0721 / 608-23956

E-Mail: juergen.hausselt@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

5.2.1.1 Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Ein Schwerpunkt des Arbeitsprogramms aus der vorhergehenden Antragsphase war die Verbesserung der Abformbarkeit (AP2) durch den Einsatz oberflächenaktiver Substanzen im Binder. Die untersuchten Additive wiesen eine unterschiedliche chemische Zusammensetzung auf und konnten innerhalb einer Gruppe und in Kombination gezielt optimiert werden. Durch systematische Untersuchungen an auf TZ-3YS-E-Zirkonoxid basierten Formmassen konnte eine direkte Korrelation zwischen dem Misch- und Fließverhalten von Formmassen und der Molekularstruktur sowie Dispergatorkonzentration aufgestellt werden. In Tabelle 1 sind die drei verwendeten Dispergatortypen und deren mögliche Kombinationen gewichtet nach ihrem Potential fürs MikroPIM zusammengefasst.

Tabelle 1: Gewichtete Gegenüberstellung der unterschiedlichen Dispergatoren. Der Gewichtungswert bedeutet: 3 – sehr gut/hohes Potential/hoch; 2 – gut/Potential/mittel; 1 – mäßig/kein Potential/niedrig.

Eigenschaft	Fettsäuren (FA)	PEGAE ¹ (BRIJ)	Citrate (CIT)	FA-BRIJ	FA-CIT	BRIJ-CIT
Compoundierung	3	1	2	2	2	1
Viskosität	3	3	1	3	2	1
Fließgrenze	3	1	2	2	3	2
Grünfestigkeit	2	2	3	2	2	2
Formtreue	2	3	2	1	2	3
Entmischung	1	2	3	2	3	3

¹ PEGAE: Polyethylenglykolalkylether mit dem Handelsname Brij.

Zusätzlich wurde im Rahmen dieses AP eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, lokale Pulver-Binder-Separationen im Mikrobauteil mittels Computertomographie zu analysieren. Die gewonnenen Erkenntnisse wiesen darauf hin, dass sich entlang des Fließweges keine wesentlichen Entmischungsscheinungen ergaben, während über den Probenquerschnitt Inhomogenitäten in der Partikeldichte von bis zu 24% nachgewiesen werden konnten.

Ein weiteres zentrales Ziel der Arbeiten war es, den Einsatz von nanoskaligen Pulvern zu ermöglichen und damit eine Verbesserung der Detailtreue und Reduzierung der Oberflächenrauigkeit (AP4) zu erreichen. Unter Zuhilfenahme der Erkenntnisse aus AP2 konnten bimodale Formassen mit 60 vol% Pulveranteil hergestellt werden, die hervorragende Fließeigenschaften aufwiesen und im Spritzgießprozess zu gewünschten Geometrien verarbeitbar waren. Weiterhin zeigten diese bimodalen Systeme neben einem guten Sinterverhalten und einer vollständigen Verdichtung der Bauteile eine signifikante Reduzierung der Oberflächenrauheit um 50%.

Um eine sichere und umweltbewusste chemische Entfernung des Binders zu gewährleisten, wurde im AP3 unter anderem eine Entwicklung von partiell wasserlöslichen Bindersystemen eingeschlagen. Hierfür wurde eine neue Verfahrensmethode der Feedstockherstellung auf Basis des Reaktivcompoundierens aufgestellt. Es wurde gezeigt, dass die Kombination aus PMMA/MMA (Polymethylmethacrylat/Methylmethacrylat)-Gemisch und wasserlöslichem PEG (Polyethylenglykol) eine vielversprechende Alternative zu dem etablierten auf Polyethylen-Wachs basierten Bindersystem darstellt. Um aber defekt- und verzugsfreie Fertigteile herstellen zu können, bedurfte dieses Material einer systematischen Optimierung hinsichtlich Prozessführung und Binderzusammensetzung.

5.2.1.2 Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

AP 1: Einfluss der Feedstockzusammensetzung auf Maßhaltigkeit & Festigkeit im MicroPIM

Einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Fließ- und viskoelastischen Eigenschaften der im Pulverspritzgießen verwendeten Feedstocks stellt das verwendete Bindersystem dar. Durch die Variation der Verhältnisse niedrig- und höhermolekularer Binderbestandteile sowie die entsprechende Wahl des Dispergatortyps und -gehalts können diese Eigenschaften gezielt beeinflusst werden. Dies sollte im Rahmen dieses Arbeitspaketes genutzt werden, um die Maßhaltigkeit und Festigkeit von Mikrobauteilen zu verbessern.

Besonders Dispergatoren der Gruppe der Polyethylenglykolalkylether (PEGAE) bieten aufgrund ihrer thermomechanischen Eigenschaften die Möglichkeit für eine erhöhte Bauteilpräzision. Diese bilden Tröpfchen und Mizellen, die erst durch hohe Scherkräfte aufgebrochen werden können und dann eine Verringerung der Viskosität der Formmasse bewirken. Beim Abkühlen der Formmasse können sich erneut Mizellen bilden, die die Viskosität wieder erhöhen und nur durch erneute Scherung aufgebrochen werden können. Um diese Einflussfaktoren zu untersuchen wurden Feedstocks mit einem Bindersystem, bestehend aus einer Polyolefin- und Wachskomponente sowie verschiedenen Dispergatoren, hergestellt. Als Referenz wurde dabei ein häufig als Additiv eingesetzter Vertreter der Fettsäuren, die Stearinsäure, herangezogen und mit einem PEGAE, dem Brij72, verglichen. Der Dispergatorgehalt wurde in 5 Stufen von 0,55 bis 8,8 mg/m², bezogen auf die BET-Oberfläche des Pulvers, erhöht. Als Feststoff kam das Zirkoniumdioxid des Typs TZ-3YS-E der Firma Tosoh Corp. zum Einsatz, dessen Anteil in den Feedstocks bei 50 vol% konstant gehalten wurde. Die verwendeten Additive wurden dabei in Anlehnung an die vorhergehende Förderphase gewählt und um weitere Dispergatorkonzentrationen ergänzt. Im Falle der PEGAE wurden Untersuchungen mit verschiedenen langen Molekülketten durchgeführt, die Darstellung der Ergebnisse wurde hier aus Gründen der Übersichtlichkeit auf das Brij72 beschränkt. Bei der Aufbereitung der Formmassen zeigten sich deutliche Unterschiede im Compoundierverhalten in Abhängigkeit des Dispergatortyps (Abb. 1). Die Formmassen, die Stearinsäure als Dispergator enthalten, weisen drei typische Phasen auf: das erste Maximum beim Einfüllen der einzelnen Komponenten, eine Zunahme des Drehmoments in der Knetphase und ein kontinuierliches Absinken auf ein Plateau nach Erreichen einer homogenen Dispergierung der Partikel im Binder. Dementgegen bewirkten die Dispergatoren des Brij-Typs ein deutlich gesteigertes Anfangsdrehmoment, eine verlängerte Knetphase und einen abrupten Abfall des Drehmoments.

Als Probegeometrie für die Untersuchung der Formstabilität kam eine Mikrobiegeprobe mit 260 µm Kantenlänge und über 3,25 mm Gesamtlänge zum Einsatz. Diese Proben wurden während der thermischen Entbinderung über ein Kamerasystem beobachtet und der Einfluss des Dispergatortyps auf die mechanische Stabilität der Braunlinge qualitativ untersucht. Dabei zeigte sich deutlich eine vergrößerte Formstabilität der Biegeproben mit Dispergatoren des Brij-Typs (Abb. 2). Dies ist auf die oben erwähnten thermomechanischen Eigenschaften der PEGAE zurückzuführen, da während der thermischen Entbinderung keine Scherkräfte wirken, die eine Verringerung der Viskosität verursachen würden. Die kann zur Steigerung der Bauteilgenauigkeit für komplexe Bauteile mit verformungsanfälligen Geometrien eingesetzt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Maßhaltigkeit und mechanischen Eigenschaften sind in den entsprechenden Kapiteln des Teilprojekts C1 aufgeführt.

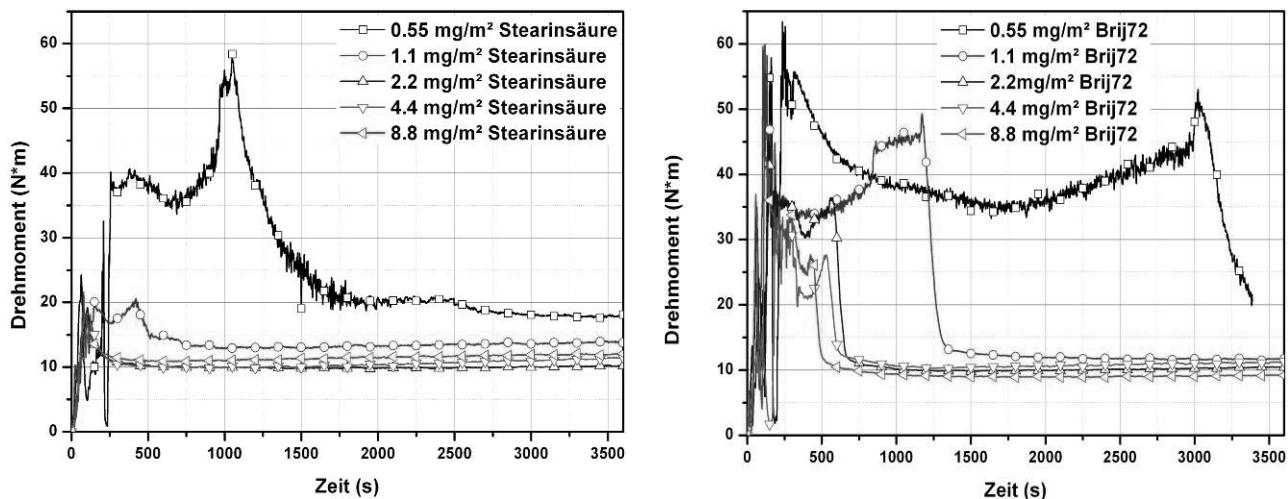
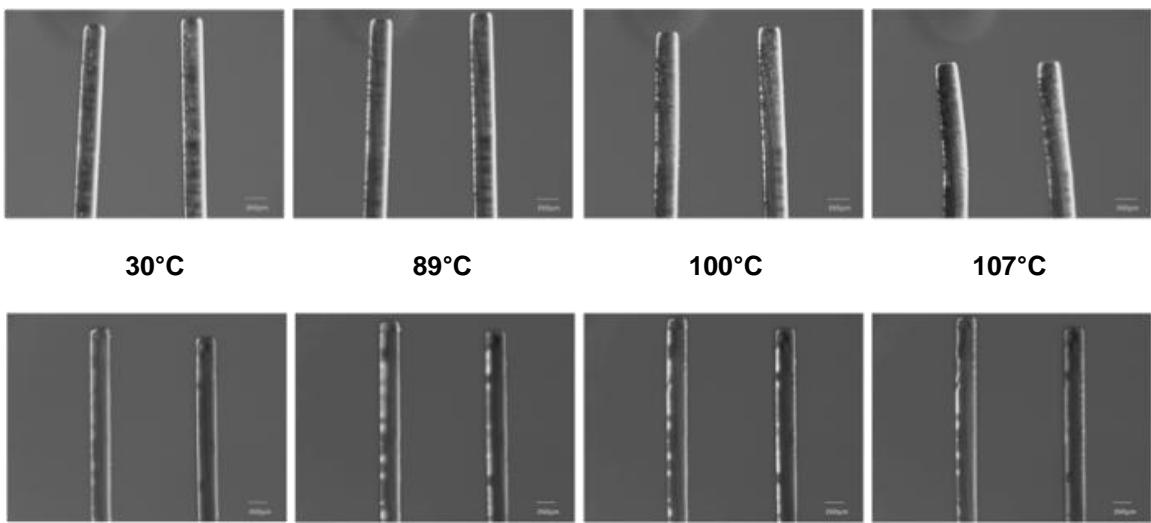


Abb.1: Drehmomentverlauf während der Feedstockcompoundierung: Stearinsäure (links) und Brij72 (rechts).

Abb. 2: Thermisches Entbinden von keramischen μ -Biegeproben: Stearinsäure (obere Reihe) und Brij72 als Dispergator (untere Reihe).

AP 3: Alternative wasserlösliche Bindersysteme für das 2C-MicroPIM & für das MicroPIM

Die heutzutage meist verwendeten Bindersysteme basierend auf Polyacetal oder Wachs haben den großen Nachteil, dass sie einen relativ aufwendigen und umweltbelastenden Entbinderungsschritt mit entweder katalytischen Methoden oder Lösungsmittelextraktion mittels toxischen Alkanen benötigen. Gerade diese Erkenntnisse aus den vorherigen SFB-Phasen sowie der immer steigende Wunsch aus der Industrie, den Herstellprozess möglichst einfacher und kostengünstiger zu gestalten, haben gezeigt, dass eine Neuentwicklung von polaren, teilwasserlöslichen Binderkomponenten wichtig ist.

Im Bericht der letzten Förderphase wurde eine neue Syntheseroute basierend auf dem Prinzip des Reaktivcompoundierens dargestellt, mit der die ersten $ZrO_2/PMMA/PEG$ -Formmassen hergestellt wurden. Die anschließenden systematischen Untersuchungen haben aber gezeigt, dass der Schritt der thermisch induzierten Polymerisation sich als kritisch erwiesen hat, was zu kaum reproduzierbaren Ergebnissen hinsichtlich der Homogenität, Fließeigenschaften und Spritzgießfähigkeit geführt hat. Vergleicht man die Soll- und Ist-Werte des Feststoffanteils (TZ-3YS-E) einer Füllgradstudie, stellt man große Abweichungen fest, wobei mit dem ansteigendem Füllgrad die realen Werte systematisch um den Faktor 1,35 zunehmen (Abb. 3), was die Kontrolle des Prozessierens erschweren kann. Als Ursache kann das Abdampfen des Monomers MMA während der Compoundierung benannt werden.

Um die auf PMMA/PEG basierten Formmassen mit einer konstanten Qualität und hoher Prozesssicherheit herstellen zu können, wurde auf eine andere, gut bewährte Compoundermethode mittels eines Messkneters zurückgegriffen. Hierfür wurden drei unterschiedlichen Sorten der kommerziell erhältlichen PMMAs ausgewählt, wobei alle drei eine ähnliche Molekulargewichtsverteilung ($2 \cdot 10^4$ - $5 \cdot 10^5$ g/mol) sowie Dichte aufweisen und sich nur in ihrer Ausgangsform unterscheiden: 3 mm große Granulatkörper von Degussa, feine Perlen von Quinn Acryl Plastics und kantig, unregelmäßig geformtes PMMA von Aldrich. Als niedermolekulare Binderkomponente wurde PEG 4000 ($M_w \sim 3700$ - 4400 g/mol) von Carl Roth GmbH gewählt. Um die Pulverparti-

kel homogen in der Bindermatrix zu verteilen, wurden 4,4 mg/m² Stearinsäure von Carl Roth GmbH als oberflächenaktive Substanz beigemischt. Abbildung 4 zeigt die Drehmomentverläufe von Feedstocksystmen mit 50 vol% Zirkonoxid gemessen bei 160°C in Abhängigkeit der drei verschiedenen PMMA-Sorten. Aufgrund der ähnlichen chemischen Eigenschaften des Back-Bone-Polymers weisen alle Feedstocks eine kurze Knetzone auf, was für ein schnelles Benetzen der Pulverpartikel mit dem Binder und daraus folgendes Homogenisieren der Mischung spricht. Der Grund, dass die Knetkurve der auf PMMA-Degussa basierten Formmasse um etwa 5 Minuten nach rechts verschoben ist, liegt daran, dass das Granulat vor dem Befüllen der Kammer vorgeschrmolzen wurde, um hohe Drehmomente zu vermeiden und so die Compoundierung der Mischung zu vereinfachen. Alle Feedstocks haben sich als spritzgießtauglich erwiesen, das anschließende thermische Entbindern und Sintern der Grünlinge führte zu defektfreien und bis zu 99,7% dichten Fertigbauteilen (die detaillierten Ergebnisse werden im Teilprojekt C1 präsentiert und diskutiert). Tabelle 2 gibt einen kurzen Überblick über die Eigenschaften und Potentiale der verwendeten Bindersysteme bestehend aus PMMA, PEG4000 und Stearinsäure.

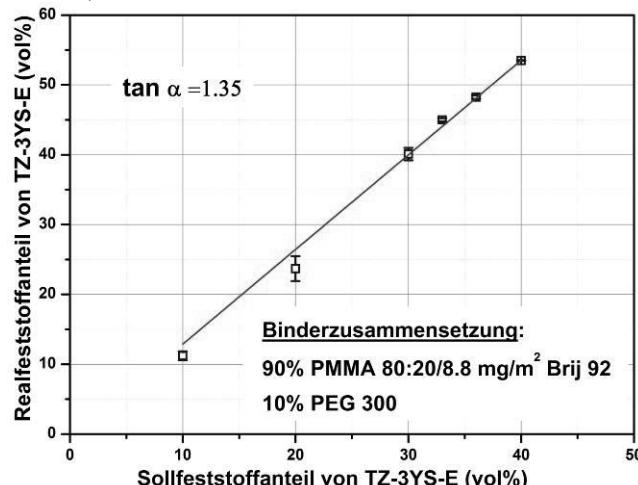


Abb. 3: Vergleich der Soll- und Ist-Werte des Pulveranteils einer Füllgradstudie. Die Abkürzung PMMA 80:20 steht für eine Mischung aus 80% handelsüblichem Plexit55, 20% MMA und 10% (bezogen auf die Gesamteinwaage) Phenanthren.

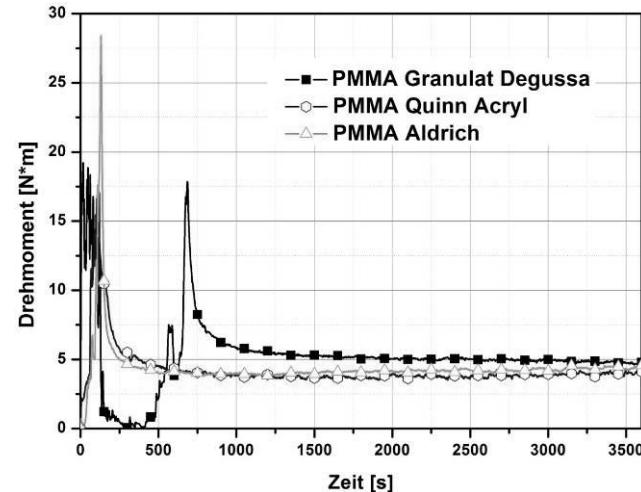


Abb.4: Einfluss verschiedener PMMA-Sorten auf das Knetverhalten von Formmassen mit 50 vol% TZ-3YS-E, der Binder besteht aus 50 vol% PEG 4000 und 50 vol% PMMA mit 4,4 mg/m² Stearinsäure als Dispergator.

Tabelle 2: Gewichtete Gegenüberstellung von unterschiedlichen PMMAs. Der Gewichtungswert bedeutet: 3 – sehr gut/hoch; 2 – gut/mittel; 1 – mäßig/niedrig.

Eigenschaften	Granulat Degussa	Quinn Acryl	Aldrich
Compoundierung/ Labor	2	3	3
Compoundierung/ Industrie	1	3	3
μ-SG	2	2	2
Homogenität	1	2	2
Grünfestigkeit	3	3	3
Formtreue/ Stabilität/ Verfärbung	3	3	2
Dichte	3	3	3

Wie in der letzten Antragsphase beschlossen wurde, sollte eine weitere Binderalternative bestehend aus Polyvinylalkohol (PVA) und Polyvinylbutyral (PVB) auf ihre Tauglichkeit für das MikroPIM untersucht werden. Bereits die ersten Voruntersuchungen hinsichtlich der Löslichkeit der Basiskomponente im Wasser haben gezeigt, dass das kommerziell erhältliche PVA, welches in einer relativ hochmolekularen Form vorliegt, wenig wasserlöslich ist und eher zum Aufquellen neigt, was zu starken Deformationen der Bauteile während des chemischen Entbindens führen kann. Dahingegen zeigte das in vorherigen Experimenten verwendete Polyethylenglykol PEG 4000 exzellente Eigenschaften bezüglich der Löslichkeit im Wasser und in allen untersuchten PVB-Polymeren. Deshalb wurde die Kombination aus PVB/PEG für weitere Versuche ausgewählt, wobei vier unterschiedliche PVB-Mowital®-Typen von Kuraray Europe GmbH hierfür getestet wurden. Die eingesetzten PVBs unterscheiden sich vor allem in ihrer mittleren Molekulargewichtsverteilung und der damit verbundenen Löslichkeitsviskosität, so nimmt der M_w -Wert von PVB B 30 H zu PVB B 60 H um den Faktor 2 zu. Die Abkürzungen „H“ und „HH“ stehen für den Acetalisierungsgrad des Polymers, welcher direkt

mit dem Restgehalt an Polyvinylalkohol korreliert: Je geringer der Rest-PVA-Gehalt („HH“), desto wasserbeständiger das PVB.

Für die Untersuchungen des Compoundierverhaltens der neuen Feedstocks wurde der Einfluss zwei verschiedener Ansatzberechnungen betrachtet: Der gewünschte Pulveranteil wird in vol% bezogen auf die Gesamteinwaage festgelegt. Das restliche Volumen verteilt sich nun 1:1 auf die beiden zwei Hauptbinderkomponenten PVB und PEG. Die Dispergatormenge wird auf die Gesamtoberfläche des eingewogenen Pulvers, in Einheiten von mg/m^2 berechnet und im Falle des Rezeptes I von der PEG-Konzentration, im Falle des Rezeptes II von dem PVB-Anteil abgezogen.

In den ersten Voruntersuchungen ist der Einfluss der Binderzusammensetzung auf das Mischverhalten betrachtet worden. Die Formmassen waren mit dem Rezept I hergestellt und beinhalteten 50 vol% Pulveranteil. Abbildung 5 zeigt das Enddrehmoment nach den Knetexperimenten als Funktion des PVB-Typs. Mit den länger werdenden Molekülen des Back-Bone-Polymers nimmt das Enddrehmoment deutlich zu, wobei durch die Zugabe von PEG eine Drehmomentreduktion um den Faktor $(3,0 \pm 0,1)$ in allen vier Fällen erzielt werden konnte. Es deutet darauf hin, dass eine bessere Plastifizierung und Homogenisierung der Feedstocksysteme erreicht wurde, und macht die Formmassen fließfähig für das Spritzgießen. Die Drehmomentmessungen liefern eine indirekte Information über die Formmassenviskosität, sodass die niedrigen Werte eine Möglichkeit für höhere Pulverfüllgrade geben. Daher wurden die nächsten Untersuchungen lediglich auf die PVB B 30 H basierte Systeme fokussiert. Um die kritische Pulvermenge in den ZrO_2 -Binder-Mischungen zu bestimmen, wurde eine Füllgradstudie durchgeführt (Abb. 6), wobei eine typische Zunahme des Drehmoments mit dem ansteigenden Pulveranteil zu sehen war. Die Erfahrung mit den TZ-3YS-E-Formmassen aus den vorherigen Förderphasen hat gezeigt, dass ein Feedstock eine ausreichende Homogenität für das MikroPIM besitzt, wenn das Enddrehmoment unter 20 Nm liegt. So zeigen die mit dem Rezept I hergestellten Formmassen einen unruhigen Knetverlauf mit einem kritischen Füllgrad von 52,5 vol%. Dahingegen weisen die Feedstocksysteme basierend auf Rezept II wesentlich glattere Kurven auf, wobei die Knetzone bei allen Formmassen drastisch reduziert und ein kritischer Füllgrad bis zu 56 vol% erreicht werden konnte.

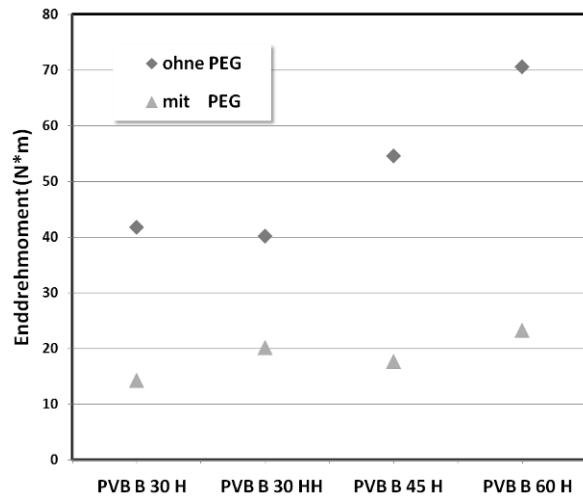


Abb.5: Einfluss der Bindermischung auf das Enddrehmoment während des Compoundierens. Die betrachteten Feedstocksysteme waren mit dem Rezept I hergestellt und beinhalteten 50 vol% TZ-3YS-E und $4,4 \text{ mg}/\text{m}^2$ Stearinsäure.

Um die Fließeigenschaften der Formmassen der unterschiedlichen Compoundierrezepte besser miteinander vergleichen zu können, wurden sie rheologisch untersucht. Abbildung 7 zeigt die Viskosität als Funktion der Scherrate, gemessen bei 160°C am Beispiel der PVB/PEG basierten Formmassen mit einem Pulveranteil von 50 vol% ZrO_2 und einer Stearinsäurekonzentration von $4,4 \text{ mg}/\text{m}^2$. Alle Formmassen weisen den gewünschten, strukturviskosen Verlauf auf, wobei aus der Zugabe von PEG 4000 eine Reduktion der Viskosität um eine Größenordnung resultiert. Verwendet man das Rezept II, erreicht man eine zusätzliche Abnahme um den Faktor zwei, was wiederum höhere Füllgrade mit diesem Bindersystem möglich macht. Die Scherviskosität der mit dem Rezept II produzierten Formmassen bei einem Pulveranteil von 55 vol%, einer Tem-

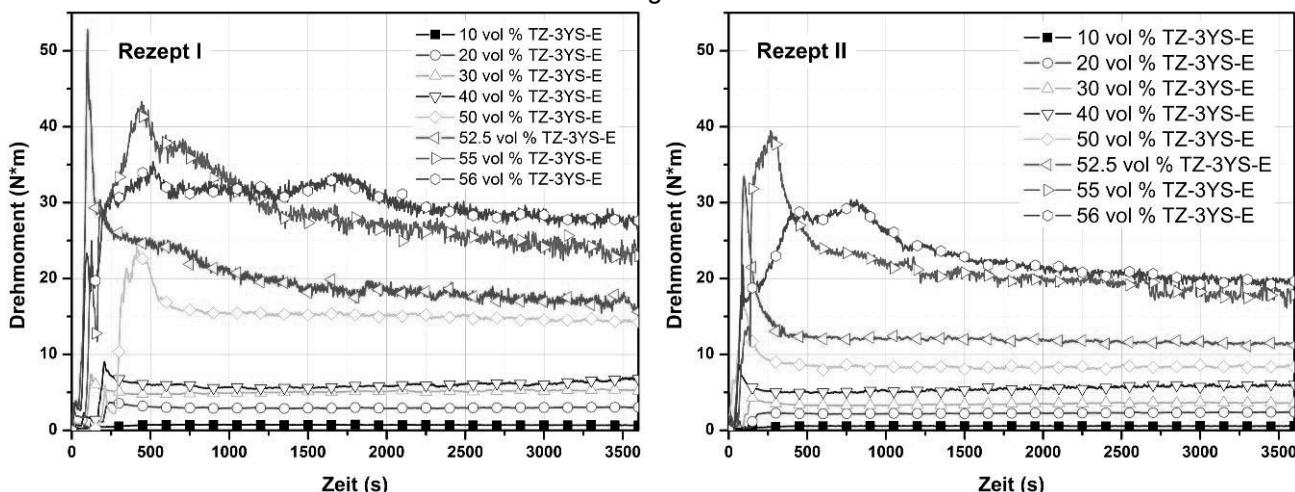


Abb.6: Die Füllgradstudien der ZrO_2 -Formmassen basiert auf PVB B 30 H und PEG 4000, die mit dem Rezept I (links) und II (rechts) bei 125°C hergestellt wurden.

Um die Fließeigenschaften der Formmassen der unterschiedlichen Compoundierrezepte besser miteinander vergleichen zu können, wurden sie rheologisch untersucht. Abbildung 7 zeigt die Viskosität als Funktion der Scherrate, gemessen bei 160°C am Beispiel der PVB/PEG basierten Formmassen mit einem Pulveranteil von 50 vol% ZrO_2 und einer Stearinsäurekonzentration von $4,4 \text{ mg}/\text{m}^2$. Alle Formmassen weisen den gewünschten, strukturviskosen Verlauf auf, wobei aus der Zugabe von PEG 4000 eine Reduktion der Viskosität um eine Größenordnung resultiert. Verwendet man das Rezept II, erreicht man eine zusätzliche Abnahme um den Faktor zwei, was wiederum höhere Füllgrade mit diesem Bindersystem möglich macht. Die Scherviskosität der mit dem Rezept II produzierten Formmassen bei einem Pulveranteil von 55 vol%, einer Tem-

peratur von 160°C und einer Scherrate von 100 1/s ist in der Abbildung 8 in Abhängigkeit der Dispergatorkonzentration zusammengefasst. Auffällig ist, dass die Viskosität im Bereich zwischen 3,3 und 4,4 mg/m² des Dispergatoranteils einen konstanten Wert ausweist. Dies deckt sich recht gut mit den experimentell ermittelten, optimalen Fettsäurenkonzentrationen für das unpolare GoMikro-Bindersystem, von denen in der letzten Förderphase (AP2) berichtet wurden. Dies verdeutlicht die Wirkung von Dispergatoren noch einmal und verifiziert die Aussage, dass der für eine ausreichende Homogenisierung einer Formmasse benötigte Dispergatoranteil lediglich auf die spezifische Gesamtoberfläche des eingesetzten Pulvers unabhängig von der Art des Bindersystems ermittelt werden soll. Die anschließenden Spritzgießexperimente haben gezeigt, dass die mit dem Rezept I compoundierten Feedstocks bis zu 50 vol% Zirkonoxid zu gewünschten Geometrien reproduzierbar prozessiert werden konnten. Verwendete man das Rezept II, so konnten höhere Füllgrade um 5 vol% realisiert werden. Nähere Informationen dazu finden sich im Bericht vom TP C1.

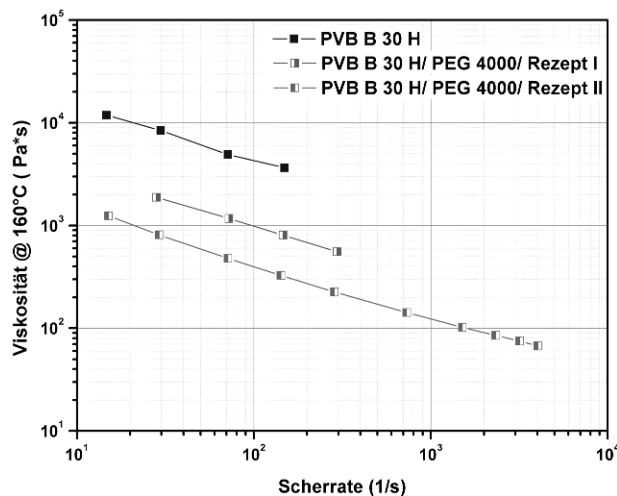


Abb. 7: Einfluss des Compoundierrezeptes auf die Viskosität der mit 50 vol% TZ-3YS-E gefüllten Formmassen.

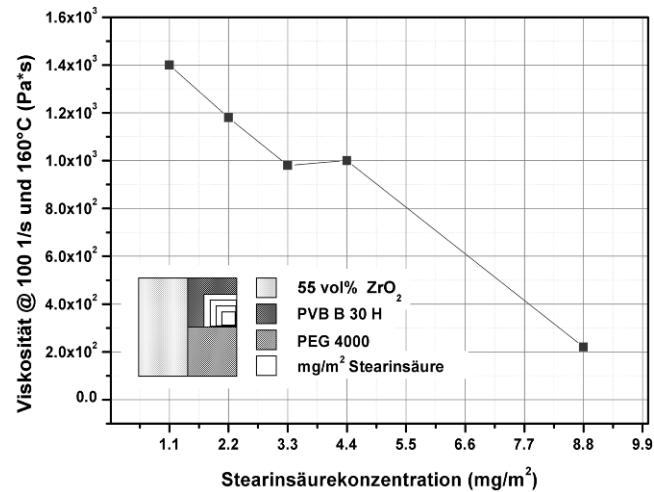


Abb. 8: Einfluss der Dispergatorkonzentration auf das Fließverhalten der mit 55 vol% TZ-3YS-E gefüllten Formmassen.

Tabelle 3 fasst die Eigenschaften der neu entwickelten, polaren, teilwasserlöslichen Bindersysteme vor allem hinsichtlich der Compoundierung, Spritzgießfähigkeit und der erreichten Dichten der fertigen Produkte zusammen und vergleicht diese mit denen der etablierten PE/Wachs basierten „GoMikro“-Kombination.

Tabelle 3: Gewichtete Gegenüberstellung der unterschiedlichen Bindersysteme. Der Gewichtungswert bedeutet: 3 – sehr gut/hoch; 2 – gut/mittel; 1 – mäßig/niedrig.

Eigenschaften	PE/Wachs	PMMA/PEG	PVB/PEG
Compoundierung/ Labor	3	3	3
Compoundierung/ Industrie	3	2	3
μ -SG	2-3	2	2-3
Homogenität	1-2	1	2-3
Grünfestigkeit	3	3	3
Formtreue/ Stabilität/ Verfärbung	3	2	3
Dichte	2-3	3	3

Aus der letzten Förderphase ist bekannt, dass sich die Wechselwirkungen zwischen Pulver und Binder durch die Variation der Dispergatormolekülen gezielt beeinflussen lassen. In den aktuellen Arbeiten sollen diese Erkenntnisse vertieft werden, um z.B. den verarbeitbaren Pulverfüllgrad mit Hilfe von kleinen Molekülen zu steigern und somit die Präzision von Mikrobauteilen zu erhöhen. Abbildung 9 zeigt exemplarisch die Knetverläufe mit 50 vol% ZrO₂ für verschiedene Additive, wobei ausgehend von den oben beschriebenen Ergebnissen bezüglich der optimalen Dispergatorkonzentration die beigemischte Menge auf das Optimum des entsprechenden Dispergatortyps aus der dritten Antragsphase festgelegt wurde. Während alle mit Fettsäuren stabilisierten Systeme hinsichtlich ihrer Grundviskosität vergleichbar sind und sich mit den Ergebnissen des „GoMikro“-Binders decken, führt der Einsatz des linearen Brij 72- oder dem verzweigten Acetyltriethylcitrat-Molekül (ATEC) zu einer drastischen Verschlechterung der Formmassenqualität. Eine Erklärung für dieses Verhalten lässt sich wieder auf der molekularen Ebene finden. Brij 72 und ATEC haben

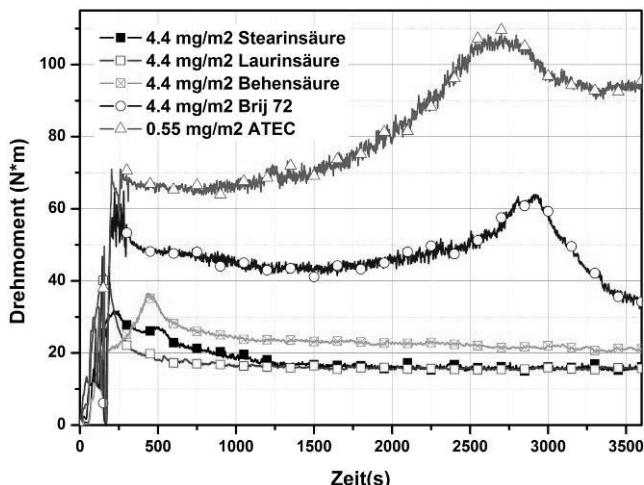


Abb. 9: Drehmomentverlauf von Formmassen unterschiedlicher Dispergatorsysteme. Der Pulverfüllgrad lag bei 50 vol% TZ-3YS-E.

wurden neben dem TZ-3YS-E-Tosoh-Pulver auch andere Pulversorten wie Al_2O_3 (TM-DAR, UFX DBM, CT 3000 SG und CT 3000 SDP) oder 17-4PH-Stahlpulver (Osprey <4, Osprey<9, Carpenter<22) untersucht. Nähere Informationen zu den Pulvern finden sich in den Ergebnisberichten des TP C1 oder C5. Die Optimierung des Füllgrades zeigte, dass die Herstellung von homogenen Formmassen bis zu 58 vol% für Aluminiumoxid bzw. bis zu 65 vol% für Stahlpulver problemlos machbar ist, was für eine sehr flexible Anpassung der Formmasseneigenschaften nach Bedürfnissen hinsichtlich des Pulverfüllgrades oder der Kombination unterschiedlicher Bindersysteme spricht.

AP 2: Erforschung von Entmischungsvorgängen im MicroMIM

In den letzten Arbeiten von TP B1 wurde das Potential der Computer-Tomographie zur Detektion von lokalen Partikeldichten in Mikrobauteilen aufgezeigt. Die gewonnenen Erkenntnisse über Entmischungsphänomene sollen nun vertieft werden. Im Vordergrund der Untersuchungen stehen vor allem der Einfluss der Binder- und somit Formmasseneigenschaften sowie Spritzgießparameter auf das Entmischungsverhalten.

Die Homogenität einer Formmasse ist ein wesentliches Qualitätskriterium und kann a priori die Separationseffekte zwischen Pulver und Binder reduzieren. Um den Dispergiergrad der Partikel in der Kunststoff-Matrix sowie den Einfluss von Entmischungen auf das Fließprofil während des Einspritzvorgangs experimentell sichtbar zu machen, wurde ein mit Tracern versetzter Mikrobiegabalken hergestellt und bei der Firma GE Sensing & Inspection Technologies GmbH röntgenographisch untersucht. Ein 3D-Modell der verwendeten Probengeometrie und deren Maße sind im Bericht der letzten Förderphase zu finden. Als Formmasse kam ein PVB-PEG-Bindersystem gefüllt mit 50 vol% Silizium (GRADE AX 05 von H.C. Starck) zum Einsatz, wobei das Pulver zusätzlich mit 1wt% 17-4PH-Stahlpartikeln von Osprey als Tracer dotiert wurde. Die Kombination der beiden Pulverarten hat den Vorteil, dass sie eine ähnliche Partikelgrößenverteilung mit d_{50} -Wert von 3 μm aufweisen, was die möglichen sterischen Separationseffekte von Partikeln ausschließt. Zusätzlich führen die deutlichen Dichteunterschiede dieser Materialien zu den gewünschten Kontrasten in den Röntgenaufnahmen. Abbildung 10 zeigt ein Radiogramm der Mikrobiegeprobe mit Angussystem und integrierter Bruchkante (links) und einen mittigen Längsschnitt des dazugehörigen Tomogramms (rechts). Da die Röntgenstrahlung durch die Silizium- und Stahlpartikel unterschiedlich stark geschwächt wird, kann jedem Grauwert des Bildes eine Dichte zugewiesen werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die höher absorbierenden Stahlpartikel (dunkel im Radiogramm und hell im Tomogramm) durch den Einspritzvorgang im Bauteil orientiert vorliegen, insbesondere aber beim Übergang vom Anguss zur eigentlichen Probengeometrie, was auf die Erhöhung der Fließgeschwindigkeit durch die Querschnittsverengung an dieser Position zurückzuführen

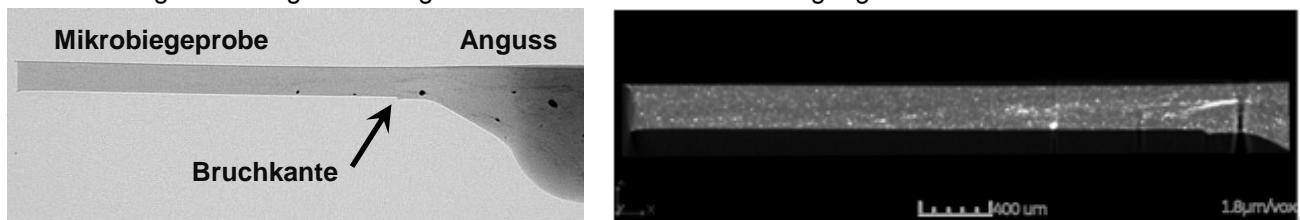


Abb. 10: Radiogramm (links) und Tomogramm (rechts) einer mit Stahltracern versetzten Silizium-Mikrobiegeprobe mit Angussystem in der Seitenansicht.

mehrere polare Hydroxyl-, Ether- bzw. Carboxylgruppen, die nicht nur als Interface zwischen Pulveroberfläche und Binder agieren können, sondern auch untereinander oder nur mit dem polaren Bindermolekülen wechselwirken. Jeder von diesen polaren Anteilen kann über Wasserstoffbrücken- bzw. van-der-Waals-Wechselwirkungen zu einer festelastischen Netzwerkstruktur beitragen. Die Folge ist eine hohe Formmassenviskosität, die sich in einer ausgeprägten Knetphase manifestiert. Die Vermutung liegt nah, dass durch die Zugabe von Brij 72 und ATEC der Zusammenhalt der aggregierten Primärpartikel in einer polaren Bindermatrix stark erhöht wird. Diese können erst durch höhere Scherkräfte aufgebrochen werden, wofür auch der viel spätere Einbruch des Drehmoments spricht.

Aufgrund der Fragestellungen im Bereich des 2K-Spritzgießens (TP C5) und um die Variabilität des neu entwickelten Bindersystems zu überprüfen,

ist. Das rekonstruierte 3D-Tomogramm des Mikrobiegebalkens selbst zeigt neben den beim Abformen entstandenen Defekten wie Überspritzungen an den Kanten des Bauteils auch die einzelnen Tracer-Partikel und deren Anordnung in der Geometrie (Abb. 11, links). Die Verteilung der Stahlpartikel im Gesamtvolumen wird noch deutlicher, wenn die Tracer mit Hilfe der Grauwerteinstufung von der Si-Bindermatrix isoliert werden. Auch in der dreidimensionalen Sicht werden einige Beobachtungen aus dem Radiogramm bestätigt: Die hochabsorbierenden Partikel sammeln sich beim Übergang „Anguss-Probe“ in der Mitte des Querschnitts, zum Probenende kommt es aber zu einer wesentlich gleichmäßigeren Verteilung aufgrund der Abnahme der Scherkräfte. Die ähnlichen Partikelgrößen des Siliziums legen die Vermutung nah, dass diese Beobachtungen auf das Hauptpulver übertragbar sind.

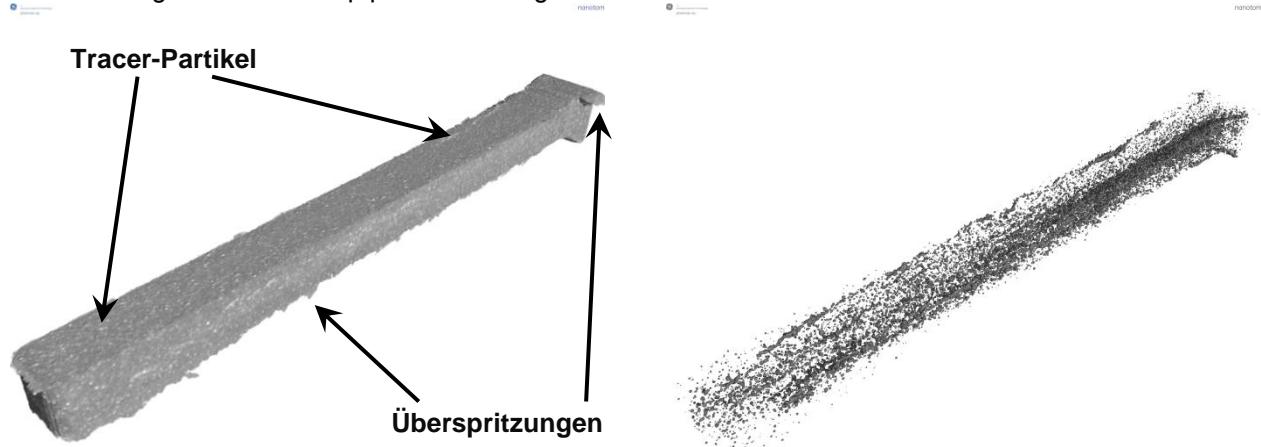


Abb. 11: Rekonstruiertes 3D-Tomogramm (links) und mit Hilfe der Grauwerteinstufung isolierte Tracerverteilung (rechts) der untersuchten Mikrobiegeprobe.

In den weiteren Versuchen sollte der Einfluss der Abformparameter insbesondere der Einspritzgeschwindigkeit auf die Dichteinhomogenitäten untersucht werden. Hierfür wurde ein hochgefüllter Feedstock auf Basis von einem groben Carpenterpulver und einem PE-Paraffin-Binder verwendet. Um Dichteunterschiede in dem Gesamtprobenvolumen lokal und präzise detektieren zu können, sind eine hohe Auflösung und Bildqualität notwendig. Aus diesem Grund wurden alle weiterführenden Versuche an der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble durchgeführt. Die Eigenschaften der verwendeten Materialien und CT-Parameter sind in Tabelle 4 aufgeführt. Abbildungen 12 und 13 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der digitalen Bildanalyse und statistische Auswertung der CT-Datensätze. Die Fließrichtung der Formmasse ist mit dem „Abstand von der Bruchkante“ gekennzeichnet und entspricht der positiven Richtung der z-Achse. Die genaue Position der Bruchkante in der Probengeometrie kann beispielsweise in Abb. 10, links ersehen werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die lokale Flächendichte der x-y-Schnittebenen senkrecht zur Fließrichtung über die Gesamtlänge der Probe nur geringfügig um ca. ± 3 vol% variiert, wenn die Formmasse in die Kavität langsam eingespritzt wurde (Abb. 12, oben). Neben der Partikeldichteverteilung, die das Verzugsverhalten der Proben während des Entbinden- und Sinterprozesses stark beeinflussen können, ist gerade die Qualität der Formfüllung insbesondere für die Mikropräzisionsbauteile entscheidend. Die Originalaufnahmen der Probenquerschnitte weisen darauf hin, dass in den Ecken der Probengeometrie gefolgt von den Randbereichen die Formfüllung nicht gegeben ist, was sich auch in der starken Streuung der Werte (siehe den Fehlerband in Abb. 12, oben) widerspiegelt. Diese Beobachtungen können auf das schnelle Abkühlen der Masse an den kalten Kavitätswänden bedingt durch das langsame Einspritzen zurückgeführt werden. Dagegen zeigt der mit 500 mm/s abgeformten Mikrobiegebalken eine sukzessive Zunahme in der mittleren Partikeldichte zum Ende des Fließweges um etwa 6 vol% (Abb. 13, oben), wobei hier ein vollständiges Ausfüllen des Kavitätsbereichs mit dem Feedstock erreicht wurde. Betrachtet man nun die Gradientenbilder der Dichten (Abb. 12 und 13, unten), kann eine deutliche Korrelation zu den Abformparametern

Tabelle 4: Materialzusammensetzung der untersuchten Formmassen und CT-Parameter.

Binderzusammensetzung	Polyethylen-Wachs-Stearinsäure	PVB B 30 H-PEG 4000-Stearinsäure
Pulver (Partikelgrößen)	63 vol% Carpenter-Stahl (3-60 μ m)	63 vol% Carpenter-Stahl (1-12 μ m)
Strahlparameter	Monochromatisch 27 keV	
Belichtungszeit	2s	1s
Voxel-Auflösung	0,75 μ m	0,38 μ m
Winkelinkrement	1200 Projektionen $\pm 0,15^\circ$	1800 Projektionen $\pm 0,1^\circ$

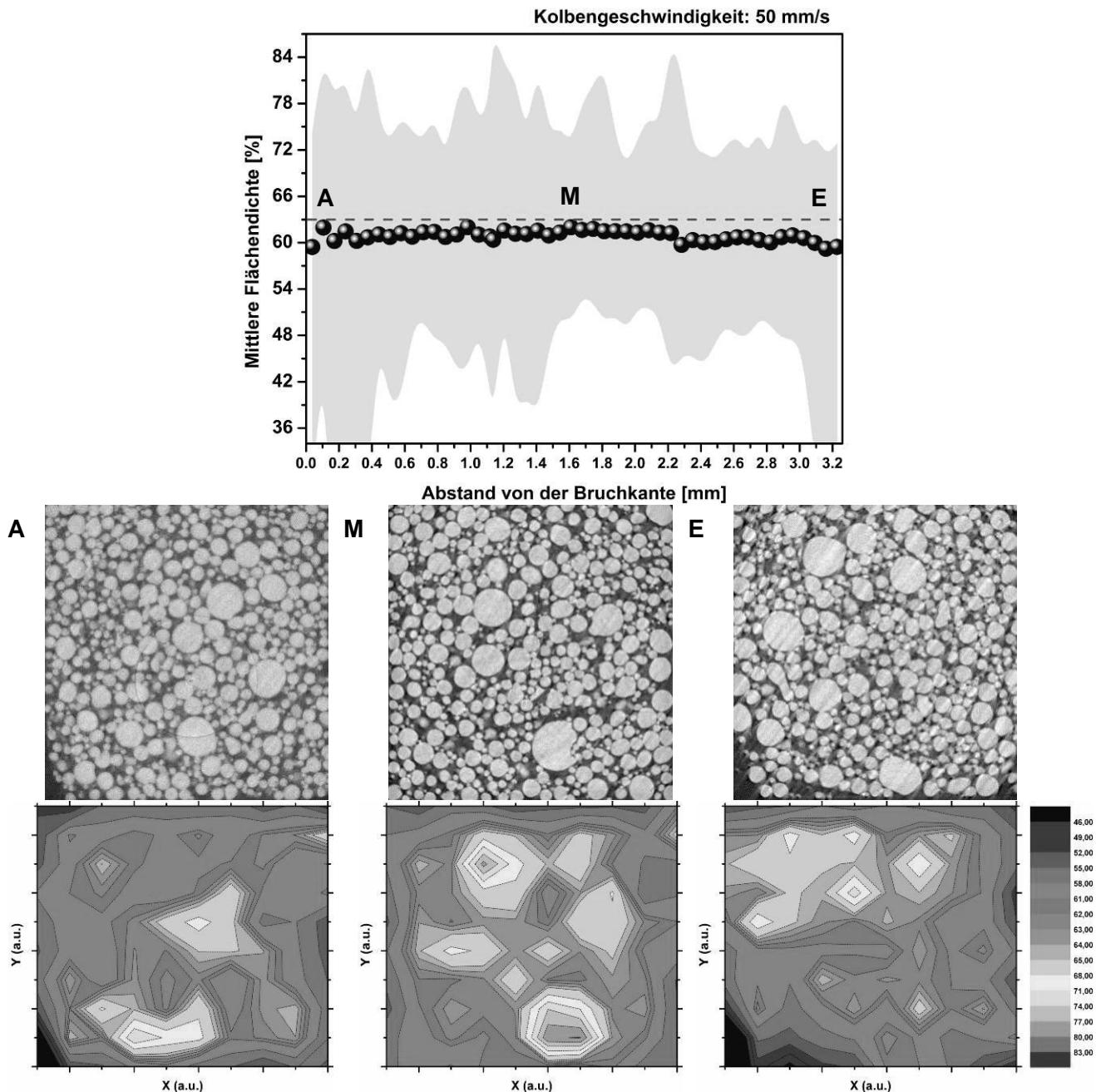


Abb. 12: Auswertung einer mit 50 mm/s spritzgegossenen Mikrobiegprobe: Lokale Flächendichte in Fließrichtung als Mittelwert über die 67,5 μm dicken y-x-Ebenenstapeln (oben). Originalaufnahmen der Probenquerschnitte als Graustufenbild (mitte). Gradientenverläufe der partikeldichte an entsprechenden Position des Tomogramms (unten). Die Buchstaben „A“, „M“ und „E“ bezeichnen die Position in der Probe ausgehend von der Bruchkante: Anfang, Mitte und Ende.

gefunden werden: Während im Falle eines langsamen Prozessierens die höchsten Dichten in der Mitte des Mikrobiegebalkens zu finden sind, führt das Spritzgießen mit einer Kolbengeschwindigkeit von 500 mm/s zu einer wesentlich gleichmäßigen Verteilung der Pulverpartikel in der Kunststoff-Matrix.

Interessant ist natürlich auch die Frage, welchen Einfluss die Formmassenzusammensetzung und insbesondere die Bindereigenschaften auf die Separationen haben. Für dieses Experiment wurde ein auf dem neu entwickelten Bindersystem basierender Stahl-Feedstock hergestellt und zu der oben beschriebenen Probengeometrie abgeformt. Da diesmal ein wesentlich feineres Pulver betrachtet wurde, musste die Voxel-Kantenlänge des Detektors auf 0,38 μm reduziert werden. Die weiteren Details zu den Materialiencharakteristika und Versuchseinstellungen findet man in Tabelle 4, rechts. Abbildung 14 zeigt eine Gegenüberstellung der Flächendichteprofile quer zur Fließrichtung von zwei mit verschiedenen Binderkonstellationen hergestellten Mikrobiegproben. Für das Darstellen des linken Gradientenbildes wurden die Daten verwendet, die in der letzten Förderphase mit einer Probe derselben Geometrie, aber einer anderen Binderzusammensetzung („GoMikro“) generiert wurden. Sofort fallen signifikante Unterschiede zwischen den beiden Plots auf:

Das linke Diagramm zeigt einen für das PE-Wachs-System typischen Verlauf (siehe die Diskussion oben), bei dem in der Probenmitte eine hohe und an den Randbereichen, speziell den Ecken des Querschnittes, die geringste Dichte detektiert wird. Dabei ergeben sich massive Entmischungen zwischen 20 bis 30 vol%. Im Gegensatz dazu zeichnet sich die alternative Binderzusammensetzung durch eine erheblich einheitlichere Distribution des Stahlpulvers sowohl im Querschnitt als auch im ganzen Bauteilvolumen aus, wobei die Konzentrationsunterschiede von maximal 5-7 vol% aufzufinden sind. Diese Beobachtungen weisen darauf hin, dass diese Kombination aufgrund der Präsenz der stark polaren Hydroxyl-, Acetyl- und Butyralgruppen in der chemischen Struktur zum einem besser ausgeprägten Netzwerk zwischen Pulver und thermoplastischen Molekülen beiträgt und somit ein großes Potential zum Minimieren der Entmischungseffekte in sich birgt.

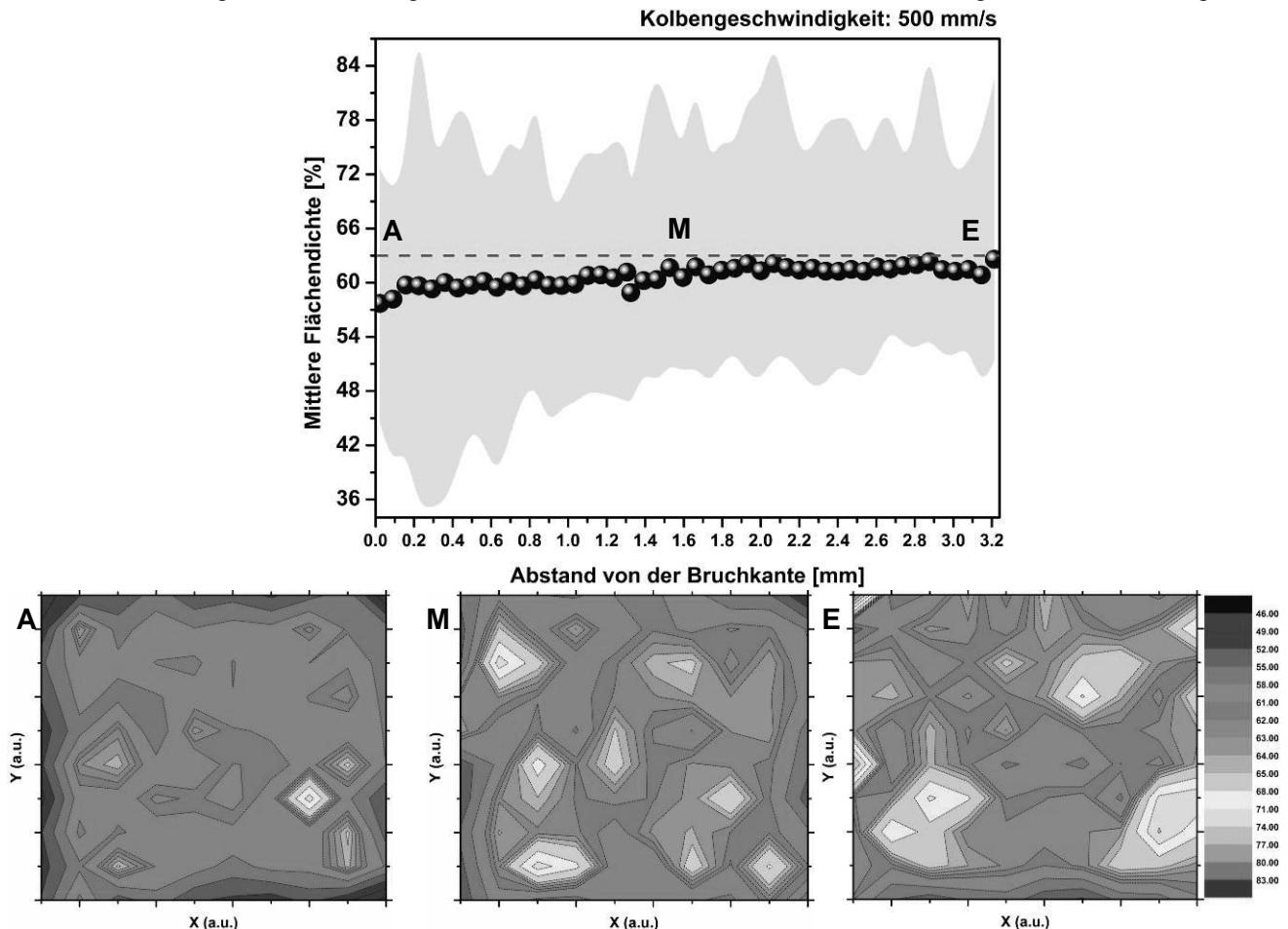


Abb. 13: Auswertung einer mit 500 mm/s spritzgegossenen Mikrobiegprobe: Lokale Flächendichte in Fließrichtung als Mittelwert über die 67,5 µm dicken y-x-Ebenenstapeln (oben). Gradientenverläufe der Partikel-dichte an entsprechenden Position des Tomogramms (unten). Die Buchstaben „A“, „M“ und „E“ bezeichnen die Position in der Probe ausgehend von der Bruchkante: Anfang, Mitte und Ende.

AP 4: Formmassenherstellung und Charakterisierung (auf Anfrage anderer TP innerhalb des SFB)

Neben der Herstellung der Formmassen für die im Projektbereich C1 vorgesehenen Abformexperimente mit den etablierten und wasserlöslichen Bindersystemen sowie für die in den CT-Untersuchungen eingesetzten Probekörper stellte das TP B1 Feedstocks für die tribologischen Modelluntersuchungen bezüglich des Formeinsatzverschleißes (D3) und für die geplanten Demonstrator-Komponenten zur Verfügung.

5.2.1.3 Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits angesprochen wurde, hat sich die Methode des Reaktivcompoundierens für die Herstellung von umweltfreundlichen Bindersystemen als ungeeignet herausgestellt. Der Grund dafür war die Nichtreproduzierbarkeit der Feedstockqualität. Um diese Aussage treffen zu können, waren aber Produktion und Charakterisierung von sehr vielen Proben notwendig, was sich als zeitaufwendig erwiesen hat. Ferner war eine der wichtigsten Herausforderungen in den berichteten Forschungsarbeiten im Bereich der Formmassenentwicklung, eine geeignete Binder-Konstellation hinsichtlich der Aufbereitung,

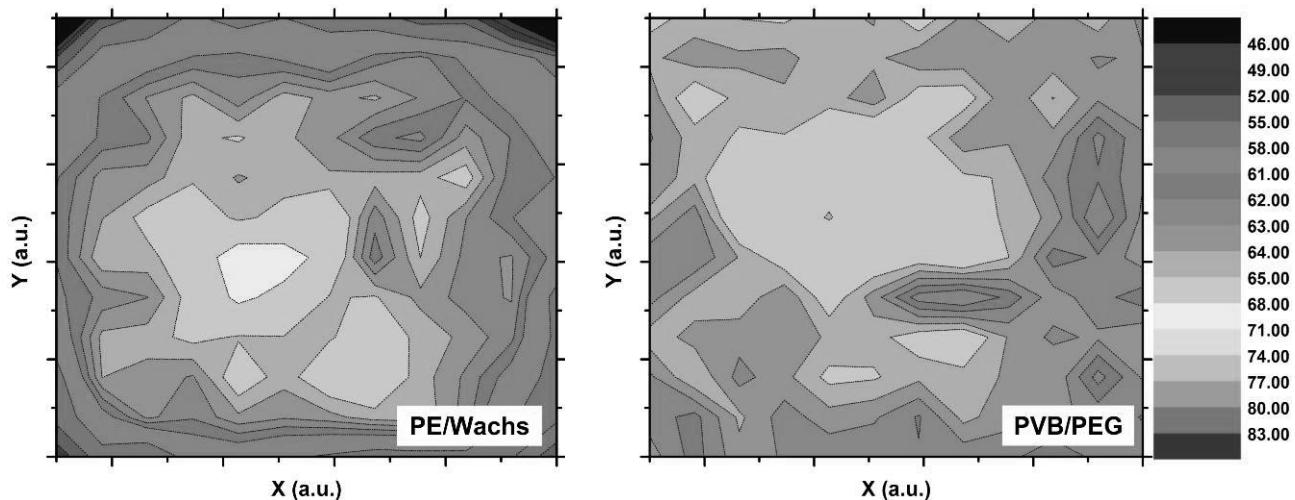


Abb. 14: Dichteprofil quer zur Fließrichtung einer Mikrobiegeprobe hergestellt mit einem unpolaren, wachs-basierten GoMikro-System (links) und einer polaren, teilwasserlöslichen PVB B 30 H/PEG 4000- Binderkonstellation (rechts).

Feedstockhomogenität, Anpassung des im Spritzgießprozess verarbeitbaren Füllgrades, Grünfestigkeit sowie Herstellung von defekt- und verzugsfreien Endprodukten durch eine schnelles Entbinden- und Sinterverfahren zu finden. Deswegen wurde ein ausführliches Materialscreening vorgenommen, das dazu geführt hat, dass z.B. das ursprünglich vorgesehene PVA mit PEG ersetzt bzw. das Compoundierrezept auf die gewünschten Bauteilanforderungen modifiziert wurde. Eine weitere Herausforderung stellt die Art der Visualisierung der lokalen Entmischungen dar: Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, war eine große Anzahl an Proben und Experimenten an der Synchrotronquelle notwendig. Berücksichtigt man zusätzlich die zeitintensive Auswertung der einzelnen Ebenenstapel der enorm großen CT-Datensätzen, so bestand im Bereich des AP2 ein erheblicher finanzieller und zeitlicher Aufwand.

5.2.1.4 Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Das Teilprojekt B1 arbeitete mit zahlreichen anderen Teilprojekten aus dem Sonderforschungsbereich zusammen. Eine besonders enge Kooperation und Informationsaustausch erfolgte mit dem TP C1, von dem TP B1 Anforderungen an innovative Feedstocks hinsichtlich Abformbarkeit, Grünfestigkeit, Entbinderungs- und Sinterverhalten sowie Eigenschaften des fertigen Bauteils erhielt. TP B1 hingegen entwickelte und fertigte Formmassen zur Untersuchung von Entmischungsphänomenen und Defektausheilung durch Kantenverrundung. Weiterhin liefen gemeinsame Untersuchungen zur Minimierung der Problematik der Pulver-Binder-Separationen mit Hilfe der Computertomographie und digitalen Bildbearbeitung, wobei die Ergebnisse zu Pulverdichteveilungen in Abhängigkeit von Abformparametern und eingesetztem Bindersystem an TP A4 (Simulation Mikro-PIM und Mikroguss) geliefert wurden. Mit TP C5 fand ein genereller Erfahrungsaustausch in Sachen Materialauswahl für das 2K-Spritzgiessen statt. Das TP D3 untersuchte das tribologische Verhalten der neu entwickelten Formmassen im Hinblick auf Formeinsatzverschleiß beim Mikropulverspritzgießen.

5.2.1.5 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Aufgrund des Fortschritts des MikroPIM hin zum Mehrkomponenten-Spritzgießen sind die Anforderungen an die Eigenschaften eines Bindersystems enorm gestiegen. Neben der grundsätzlichen Aufgabe, Pulverpartikel homogen und möglichst dicht in einer Kavität zu packen und so die Form des Grünlings bis zum Beginn des Sintervorgangs zusammenzuhalten, muss nun ein Bindermaterial auch Voraussetzungen vor allem hinsichtlich Umweltverträglichkeit sowie geringer Material- und Prozesskosten erfüllen. Durch den Einsatz von wasserlöslichen und teilweise biologisch abbaubaren Komponenten kann die Umweltbelastung verringert und die erforderliche Prozesstechnik vereinfacht werden. In den letzten Jahren wurden sowohl in der Forschung als auch in der Industrie diverse alternative Binder entwickelt, wobei als die niedermolekulare Basiskomponente meist Polyethylen-Glykol zum Einsatz kam. In der Literatur finden sich zwar einige Arbeitsgruppen, die sich mit PEG und PMMA in verschiedenen Materialgewichten als Bindermaterial beschäftigen, aber es handelt sich dabei größtenteils um die auf dem 316L-Stahlpulver basierten Formmassen. Insofern haben die Erfahrungen, die man im TP B1 mit dem Zirkonoxid (TZ-3YS-E Tosoh) und auch den verschiedenen 17-

4 PH-Stahlpulvern gemacht hat, einen großen Nutzen für den PIM-Bereich. Das Polyvinylbutural (PVB) wurde lange Zeit als Kandidat für das Gerüstpolymer ausgeschlossen, da seine relativ hohe Viskosität und damit verbundene hohe Verarbeitungstemperaturen (190-200°C) in der Kombination mit Polyethylen-Glykol zu einem potentiellen Problem der thermischen Zersetzung von PEG führen sollten. In den oben berichteten Untersuchungen konnte dieses Problem nicht festgestellt werden, im Gegenteil hat sich die PVB-PEG-Konstellation sowohl bezüglich der Formmassenhomogenität und hohen Füllgrade als auch der Minimierung der Entmischungerscheinungen während des Spritzgießprozesses als vielversprechend erwiesen. In der Literatur konnten keine Hinweise auf eine ausführliche Untersuchung dieser Binderkombination für den Einsatz im MikroPIM gefunden werden, was die durchgeführten Arbeiten im TP B1 einzigartig macht. Ein weiteres zentrales Thema ist die Detektion von Defekten und Inhomogenitäten in Mikrobauteilen. Bereits in der letzten Antragsphase wurde über die Arbeiten anderer Forschungsgruppen, die unterschiedliche Ansätze wie Elektronenmikroskopie, Laser-Doppler Velocimetrie oder NMR-Spektroskopie verfolgen, ausführlich berichtet. Aber erst durch den Einsatz von der Computer-Tomographie kann eine lokale und dreidimensionale Dichteinformation über die Probe hinweg gewonnen werden. Zurzeit gibt es viele Forschungsgruppen, die diesen Ansatz nutzen, um lokale Dichtegradienten in PIM-Bauteilen visuell zu machen. Da aber die Synchrotron-CT ein teures Verfahren darstellt, werden hierfür meist die Standard-Röhren-Geräte verwendet. Aufgrund einer durch die nicht monochromatische Strahlung bedingten deutlich niedrigeren Auflösung ist deswegen eine detaillierte qualitative Analyse der CT-Aufnahmen nicht oder nur begrenzt möglich.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Publikationen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung

- [1] Thomas Hanemann, Kirsten Honnef, Tobias Müller, Oxana Weber: New methacrylate-based feedstock systems for micro powder injection moulding; *Microsystem Technologies* 17-3 (2011) S.451-457.
- [2] Oxana Weber, Alexander Rack, Claudia Redenbach, Michael Schulz, Oliver Wirjadi: Micropowder injection molding: investigation of powder-binder separation using synchrotron-based microtomography and 3D image analysis; *Journal of Materials Science* 46-10 (2011) S.3568-3573.
- [3] David Kauzlaric, Lars Pastewka, Hagen Meyer, Richard Heldele, Michael Schulz, Oxana Weber, Volker Piotter, Jürgen Hausselt, Andreas Greiner, Jan G. Korvink: Smoothed particle hydrodynamics simulation of shear-induced powder migration in injection moulding; *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369-1944 (2011) S.2320-2328.
- [4] Andreas Greiner, David Kauzlaric, Jan G. Korvink, Richard Heldele, Michael Schulz, Volker Piotter, Thomas Hanemann, Oxana Weber, Jürgen Haußelt: Simulation of micro powder injection moulding: Powder segregation and yield stress effects during form filling; *Journal of the European Ceramic Society* 31-14 (2011) S.2525-2534.
- [5] Thomas Hanemann, Richard Heldele: Fatty Acid Surfactant Structure–Feedstock Flow Properties: Correlation for High-Pressure Ceramic Injection Molding; *International Journal of Applied Ceramic Technology* (2011) S.1-9, online verfügbar, doi: 10.1111/j.1744-7402.2011.02612.x.
- [6] Thomas Hanemann, Richard Heldele, Tobias Mueller, Juergen Hausselt: Influence of Stearic Acid Concentration on the Processing of ZrO₂-Containing Feedstocks Suitable for Micropowder Injection Molding; *International Journal of Applied Ceramic Technology* 8-4 (2011) S.865-872.
- [7] Andreas Ruh, Thomas Hanemann, Richard Heldele, Volker Piotter, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Juergen Hausselt: Development of Two-Component Micropowder Injection Molding (2C MicroPIM): Characteristics of Applicable Materials; *International Journal of Applied Ceramic Technology* 8-1 (2011) S.194-202.
- [8] Volker Piotter, Thomas Hanemann, Richard Heldele, Marcus Müller, Tobias Müller, Klaus Plewa, Andreas Ruh: Metal and ceramic parts fabricated by microminiature powder injection molding; *International Journal of Powder Metallurgy* 46-2 (2010) S.21-28.
- [9] Thomas Hanemann, Richard Heldele: Modern alchemy: ceramic feedstock optimization by surfactant screening; *Ceramic Forum International: cfi / Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft* 87-4 (2010) S.E38-E40.
- [10] Thomas Hanemann, Kirsten Honnef: Process chain development for the realization of zirconia microparts using composite reaction molding; *Ceramics International* 35- (2009) S.269-275.
- [11] Thomas Hanemann, Kirsten Honnef: Rheological investigations on the flow behavior of polymer-microsized iron powder composites; *Polymer Composites* 30-8 (2009) S.1114-1118.
- [12] Thomas Hanemann: Flow behavior of unsaturated polyester resin—Microsized 17-4PH stainless steel powder—Feedstocks; *Polymer Composites* 30-12 (2009) S.1873-1878.

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit Januar 2000 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	lau-fende Num mer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fach-zugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstun- den (beratend: B)	Katego-rie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1.	Hanemann, T. Prof. Dr.-Ing., GL, AL	MST, MPE	IAM-WPT	4B 2	
	2.	Haußelt, J. Prof. Dr.-Ing., IL	WRT	IAM-WPT	2B	
	3.	Schulz, M. Dr.-Ing., CT	MPE	IAM-WPT	2B	
	4.	Schlabach, S. Dr.	MPE	IAM-WPT	1B 1	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	5.	Holzer, P.		IAM-WPT	10	
	6.	Vouriot, R.		IAM-WPT	2	
	7.	Offermann, M.		IAM-WPT	1	
	8.	Odemer; C.		IAM-WPT	1	
	9.	Geckle, U.		IAM-WPT	1	
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	10.	Weber, O. Dipl.-Ing.	MPE, WV	IAM-WPT	39	EG13
	11.	N.N.	WER, CIW	IAM-WPT		SH
	12.	N.N.	WER, PH	IAM-WPT		SH
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter						

Kürzel	Beschreibung
AL	Abteilungsleiter
CIW	Chemie, Chemie-Ingenieur-Wesen
CT	Computer-Tomographie
GL	Gruppenleiter
IAM-WPT	Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik
IL	Institutsleiter
MPE	Material und Prozessentwicklung
MST	Werkstoffe der Mikrosystemtechnik, Chemie von Festkörper-Fluid-Grenzflächen
PH	Physik
WER	wiss. Hilfskraft
WRT	Werkstoffe, Werkstoffprozesstechnik
WV	Werkstoffe und Verfahren

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

1. Prof. Dr.-Ing. T. Hanemann führt die Mitarbeiter 3.-6., 9.-12. der Abteilung IAM-WPT/MPE. Zusätzlich obliegt ihm die wissenschaftliche Federführung des Teilprojektes innerhalb der Abteilung IAM-WPT/MPE, in die organisatorisch auch die TP C1, C2 und C5 integriert sind. Er verknüpft das Teilprojekt B1 mit dem von ihm ebenfalls geleiteten Teilprojekt C1.
2. Prof. Dr. J. Haußelt obliegt die wissenschaftliche Federführung des Teilprojektes zusammen mit Prof. Dr. Hanemann. Er gewährleistet das reibungslose Ineinandergreifen aller antragsrelevanten Arbeiten an seinem Institut. Dies betrifft in diesem Falle insbesondere die Zusammenarbeit mit den Teilprojekten A3, C1, C2 und C5.
3. Dr. M. Schulz steht dem Teilprojekt B1 im Arbeitspaket AP2 „Erforschung von Entmischungsvorgängen im MikroMIM“ beratend zur Verfügung.
4. Dr. S. Schlabach unterstützt das Teilprojekt B1 bei der Bestimmung der Dichten an Grünkörpern mittels Helium-Pyknometrie und steht in diesem Bereich beratend zur Verfügung.
5. P. Holzer ist für die Abformung der unterschiedlichen Bauteilgeometrien mit den neu entwickelten Feedstocksystmen an den Spritzgießmaschinen vom Typ Mikrosystem50 von Wittmann-Battenfeld (Schließkraft 50 kN) verantwortlich.
6. R. Vouriot führt die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen der Pulver und Feedstocks durch.
7. M. Offermann führt die Messungen zur Pulvercharakterisierung (Pulverpartikelgröße, BET-Oberfläche) durch und ist für die Analyse der Porosität an den Grünkörpern mittels Quecksilber Porosimetrie zuständig.
8. C. Odemer ist für die röntgenographischen Untersuchungen der verwendenden keramischen oder metallischen Pulver verantwortlich. Zusätzlich führt sie die Struktur- und Gefügeanalyse der fertigen Komponenten durch.
9. U. Geckle führt die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen der spritzgegossenen und gesinterten Proben insbesondere im Hinblick auf Oberflächendefekte durch.

Die unter 1. bis 9. aufgeführten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind im Institut für Angewandte Materialien IAM-WPT beschäftigt und werden über Bundes- bzw. Landesmittel finanziert. Die Tätigkeit der unter 1.-2. aufgeführten Institutsmitglieder umfasst vor allem die Koordination des Projektes und Arbeiten zur Aufrechterhaltung der experimentellen Einrichtungen. Die Mitarbeiter 3. bis 9. unterstützen die Person 10 bei technischen Fragestellungen vor Ort und tragen entscheidend zum Erfolg des Teilprojekts bei.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

10. Dipl.-Ing. O. Weber (wissenschaftliche Mitarbeiterin, TVöD EG 13 (BAT IIa)) ist als Teilprojektbearbeiterin für die Planung, Koordination und Durchführung der vorgesehenen Forschungsarbeiten des TP B1 zuständig. Hierzu zählen die Betreuung aller geplanten Versuche in den oben beschriebenen Arbeitspaketen 1-4, die Auswertung und die wissenschaftliche Interpretation der Ergebnisse, sowie das dazugehörige Berichtswesen. Des Weiteren obliegt ihr das direkte Zusammenwirken mit den Bearbeitern der anderen Teilprojekte des SFB und der Bericht über den Fortgang der Arbeiten auf Seminaren, Arbeitskreissitzungen sowie nationalen und internationalen Fachtagungen.

11. N.N. (studentische Hilfskraft, Fachgebiete Chemie, Chemie-Ingenieur-Wesen und Werkstoffwissenschaften): Die studentische Hilfskraft unterstützt den wissenschaftlichen Mitarbeiter 10 bei Routinearbeiten im Bereich der Herstellung und Charakterisierung keramischer oder metallischer Formmassen. Dies umfasst unter anderem die folgenden Aufgaben wie die Versuchsvorbereitung, -durchführung und -auswertung sowie die Dokumentation der Ergebnisse.
12. N.N. (studentische Hilfskraft, Fachgebiete Physik und Werkstoffwissenschaften): Die studentische Hilfskraft unterstützt den wissenschaftlichen Mitarbeiter 10 im Arbeitspaket AP2 „Erforschung von Entmischungsvorgängen im MikroMIM“ bei der quantitativen Auswertung der dreidimensionalen CT-Aufnahmen mit Hilfe der digitalen Bildanalyse. Hinzu kommt die statistische Evaluierung der errechneten Daten (Partikeldichten – und Partikelgrößenverteilungen lokal in den μ -Bauteilen).

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt B4

5.1.1 Titel

Mikrofunkenerosion – Wirtschaftliche und prozesssichere Strukturierung mittels Funkenerosion

Micro-EDM – Economic and reliable manufacturing of micro-molds using EDM (Electro-discharge machining)

5.1.2 Projektleitung

Schulze, Volker, Prof. Dr.-Ing. habil., geb. 20.04.1965, deutsch

Institut für Produktionstechnik (wbk)

Karlsruher Institut für Technologie

Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-42440

Telefax: 0721 / 608-45004

E-Mail: volker.schulze@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

5.2.1.1 Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Der Bereich B des SFB 499 beschäftigt sich mit der Arbeitsvorbereitung, d.h. mit der Formeinsatzherstellung für die urformenden Fertigungsverfahren. Das Teilprojekt B4 widmet sich dabei der Mikrofunkenerosion, der durch ihre spezifischen Verfahrenscharakteristika eine besondere Bedeutung zukommt, um filigrane Strukturen sowie Kavitäten in harte und damit verschleißfeste Materialen einbringen zu können.

In der 3. Förderphase fanden vorwiegend Untersuchungen zum Mikrobahnerosionsprozess statt. Es wurde ein grundlegendes Prozessverständnis über den Einfluss der Prozessparameter auf den Elektrodenverschleiß, die Bearbeitungszeit und die Oberflächenrauheit bei der Bearbeitung von X38CrMoV5-1 und von TSF44 geschaffen. Die zudem erarbeitete Gegenüberstellung von Voll- zu Kapillarelektroden ergab, dass sich Kapillarelektroden bei dieser Prozessvariante lediglich für tiefe Kavitäten mit hohen Aspektverhältnissen eignen. Da der Fokus auf der Bahn- und nicht der Bohrbearbeitung lag, wurden alle weiteren Untersuchungen zur Mikrobahnerosion mit Vollelektroden durchgeführt. Zudem wurden unterschiedliche Werkzeugdurchmesser von 0,1 bis 2 mm getestet und der positive Einfluss von kleinen Elektrodendurchmessern auf die Oberflächengüte bei gleichen Erosionsparametern nachgewiesen. Die weitere Miniaturisierung der Werkzeugelektroden wurde über das WEDG-Verfahren (Wire Electric Discharge Grinding) vorangetrieben. Hier wurde eine Elektrode mit einem Durchmesser von 17 µm hergestellt und erfolgreich im Bahnerosionsprozess eingesetzt. Zudem wurden kleinste Formelektroden über alternative Fertigungsverfahren gefertigt und diese für die mikrofunkenerosive Senkbearbeitung verwendet. So wurde eine laserablatierte zahnradförmige Elektrode mit einem Kopfkreisdurchmesser von 500 µm als Kavität in ein Werkstück eingebracht. Zudem wurde der mehrachsige Senkprozess untersucht, um komplexe Formeinsatzgeometrien herzustellen, wie beispielsweise schneckenförmige Strukturen, die beim Demonstrator der 3. Förderphase zum Einsatz kamen. Darauf aufbauend wurde eine 4-Achs-Simultanbearbeitung realisiert, um einer einfachen schneckenförmigen Geometrie eine Konizität zu verleihen.

Die Ergebnisse der vorhergehenden Förderperiode haben vor allem das Potential aufgezeigt, dass sich bei der Mikrobahnerosion durch die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Anpassung der z-Zustellung eine deutliche Verkürzung der Bearbeitungszeit erzielen lässt. Da es sich bei der Bahnerosion um die flexibelste Prozessvariante der Mikrofunkenerosion handelt, wurde der Fokus der Untersuchungen für die letzte Förderphase hierauf gelegt. So wurde zum Ziel gesetzt, die Bearbeitungszeiten zu senken und die Prozesssicherheit bei der Herstellung von Kavitäten durch eine integrierte Messtechnik zu verbessern.

5.2.1.2 Ergebnisse

5.2.1.2.1 High-Speed-Mikrobahnerosion

Da die Bahnerosion ein NC-gesteuerter Prozess ist, bei dem eine Kavität Ebene für Ebene in die Tiefe gearbeitet wird, sind die Bearbeitungszeiten nicht nur von den klassischen Erosionsparametern sondern auch stark von der Vorschubgeschwindigkeit der Elektrode in lateraler Richtung abhängig. Daher wurde in diesem Forschungsprojekt die Dynamisierung des Bahnerosionsprozesses untersucht, ohne dabei das Bearbeitungsergebnis negativ zu beeinflussen. Dabei wurden unterschiedliche Ebenenabstände bzw. z-Zustellungen zwischen den einzelnen Bearbeitungsebenen bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten getestet. Die optimierten Vorschubgeschwindigkeiten bezogen auf die Ebenenabstände sind bei der Bearbeitung von Freiformflächen (Kapitel 5.2.1.2) von Bedeutung, da sich hier die Ebenenabstände auf die Oberflächenrauheit von schrägen Wänden auswirken.

Als Werkzeug für die Versuchsreihen wurde eine Stabelektrode aus WC-6Co mit einem Durchmesser von 300 µm verwendet. Um möglichst geradlinige aber dennoch flächige Strukturen für die Geschwindigkeits-Tests zu gewährleisten, wurde als Testgeometrie eine Nut mit nebeneinanderliegenden Elektrodenbahnen gewählt, die in einer Ebene im pendelnden Modus abgefahrene wurden. Abbildung 1 (links) zeigt die Probengeometrie und deren Abmaße. Diese Geometrie wurde für jeden Parametersatz in einer Tiefe von 50 µm in den Stahl 30CrMo6 eingebracht. Die verwendeten Erosionsparameter für die untersuchten Bearbeitungsstrategien „Schruppen“ und „Schlichten“ sind der Abbildung 1 (rechts) zu entnehmen.

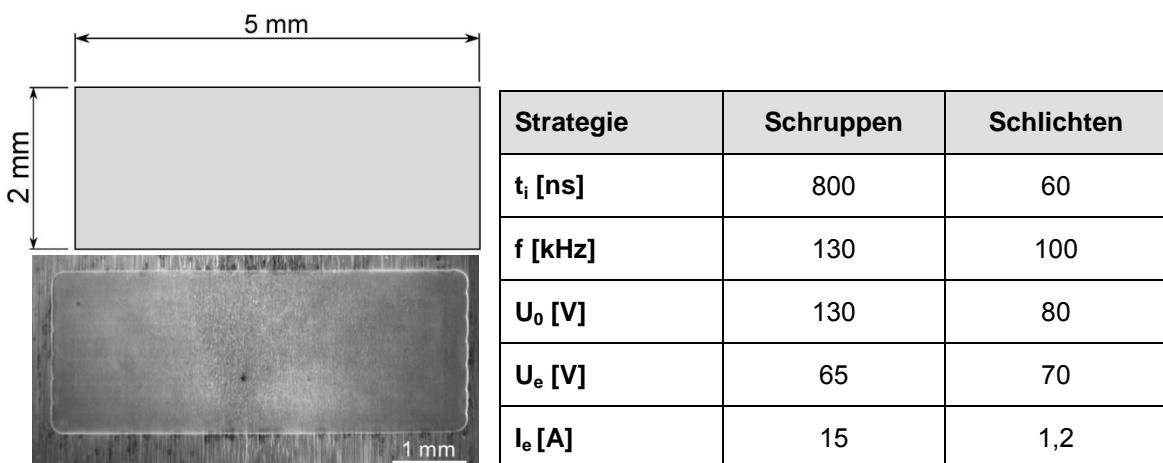


Abbildung 1: Probengeometrie Erosionsgeschwindigkeit

In einer ersten Versuchsreihe wurde untersucht, wie sich verschiedene Überlappungen der Elektrodenbahn auf die Oberflächenrauheit der gefertigten Kavität auswirken. Dazu wurde die Testkavität mit Bahnüberlappungen von 30 % bis 70 % gefertigt und anschließend die Oberflächenrauheit mit einem optisch-konfokalen Messsystem bestimmt. Die sich ergebenden Oberflächengüten sind im nachfolgenden Diagramm aufgeführt (Abbildung 2).

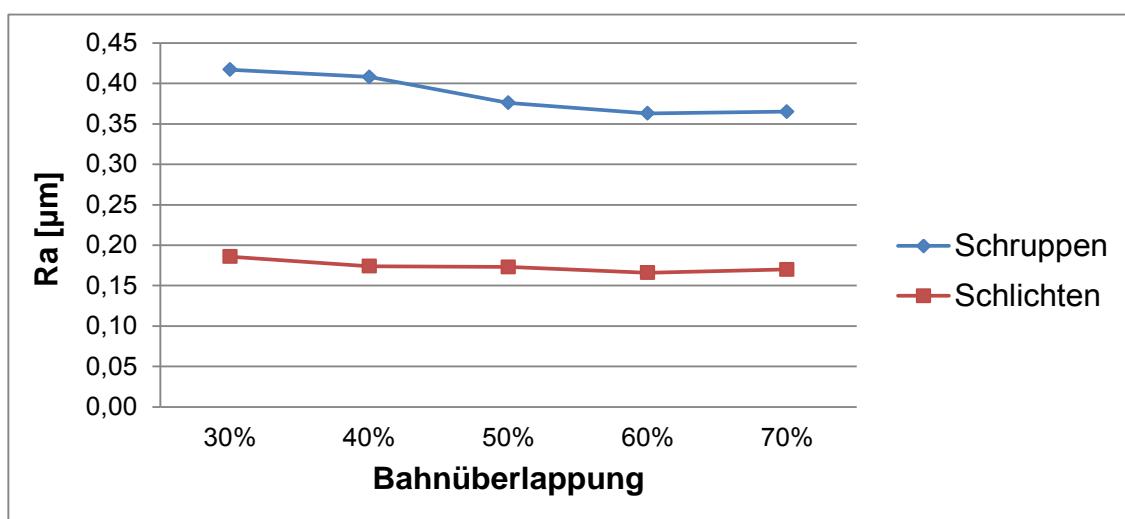


Abbildung 2: Oberflächenrauheit bei Variation der Bahnüberlappung

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Bahnüberlappung keinen merklichen Einfluss auf die Oberflächenrauheit bei der Schlichtbearbeitung hat. Bei der Schrubbearbeitung hingegen ist eine eindeutige Tendenz ersichtlich. Hier ist schon eine deutliche Steigerung der Oberflächengüte bei einer Überlappung von 50 % zu verzeichnen. Das lässt darauf schließen, dass es bei höheren Entladeenergien vorteilhaft ist, jede zu bearbeitende Stelle der Kavität doppelt anzufahren, um entstandene Rauheitsspitzen nachträglich zu glätten. Die Oberflächenrauheit erreicht dann ein Minimum bei einer Überlappung von 60 % und steigt dann nicht mehr merklich an. Für die weiteren Untersuchungen zur Optimierung der Abtragsrate wurde mit einer Bahnüberlappung von 60 % gearbeitet, da hier eine um $0,0036 \text{ mm}^3/\text{s}$ höhere Abtragsrate als bei einer Überlappung von 70 % bei nahezu gleicher Oberflächengüte erreicht wurde.

Um die Geschwindigkeitsprofile für die Schrubbearbeitung zu untersuchen, wurde die Vorschubgeschwindigkeit zwischen 1,5 mm/s und 8 mm/s variiert und jeder dieser Geschwindigkeiten in unabhängigen Versuchsreihen eine z-Zustellungen zwischen 0,3 μm und 2 μm überlagert. Das Diagramm in Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Abtragsraten für ansteigende Vorschubgeschwindigkeiten (v_f) der Elektrode und unterschiedliche z-Zustellungen.

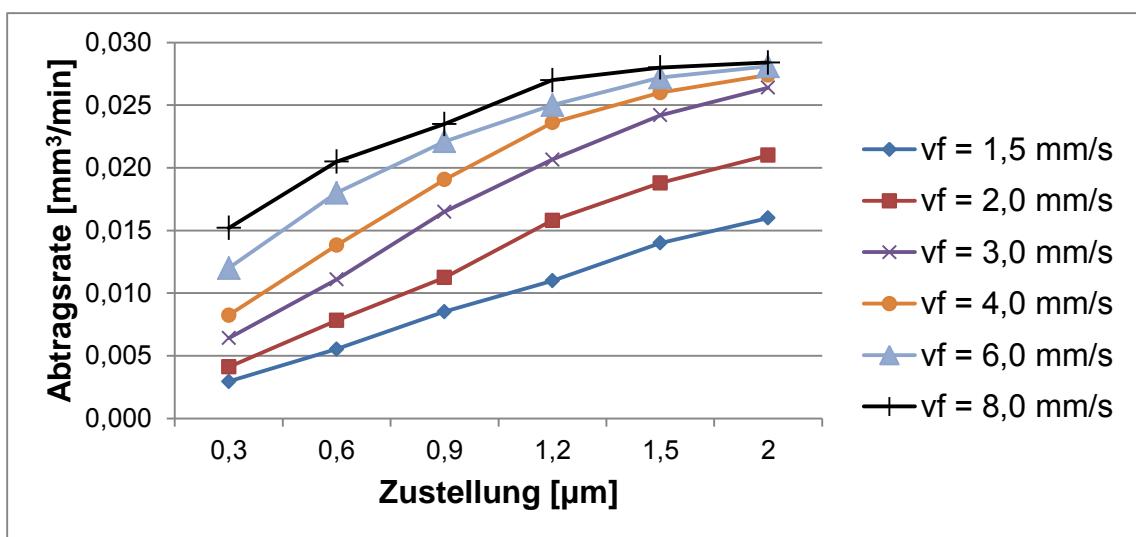


Abbildung 3: Abtragsrate bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit und z-Zustellung bei der Schrubbearbeitung

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass sich bei der Schrubbearbeitung im unteren Geschwindigkeitsbereich bis 2 mm/s ein nahezu linearer Anstieg bei größer werdenden Ebenenabständen bzw. z-Zustellungen einstellt. Besonders bei der kleinsten Vorschubgeschwindigkeit zeichnet sich deutlich ab, dass durch eine Verdopplung der Zustellung eine Verdopplung des volumetrischen Abtrags realisiert werden kann. Hier findet also bei allen Zustellungen ein kontinuierlicher Erosionsprozess statt, bei dem die Vorschubregelung der Maschine minimal in den Prozess eingreifen muss. Dieser lineare Zusammenhang ist ebenfalls bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 3 mm/s und 4 mm/s bis zu einer z-Zustellung von 1,2 μm zu erkennen. Ab diesem Zeitpunkt wird der Erosionsprozess aufgrund von häufig auftretenden Kurzschlüssen verzögert. Ein regelungsbedingter Elektrodenrückzug ist hier die Folge. Besonders stark wirkt sich dieser Effekt bei größer werdenden Vorschubgeschwindigkeiten aus. Bei 6 mm/s und 8 mm/s ist über ansteigende z-Zustellungen eine degressive Zunahme der Abtragsrate zu verzeichnen. Diese nähert sich in beiden Fällen asymptotisch einem Wert von $0,028 \text{ mm}^3/\text{min}$.

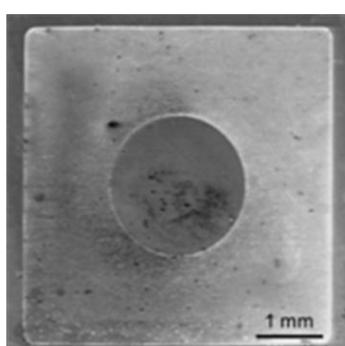


Abbildung 4: Testgeometrie

Als Bewertungskriterium für das Fertigungsergebnis wurden die Oberflächengüte der gefertigten Taschen und die geometrische Genauigkeit der in Abbildung 4 dargestellten Struktur herangezogen. Bei der Testgeometrie handelte es sich um eine quadratische Tasche mit 4,5 mm Kantenlänge und einer kreisförmigen Inselstruktur mit einem Durchmesser von 2 mm. Die Testgeometrie wurde mit allen Vorschubgeschwindigkeiten bei einer z-Zustellung von 1,5 μm hergestellt. Die Ergebnisse der Untersuchungen haben gezeigt, dass die Vorschubgeschwindigkeit in dem untersuchten Bereich keinen Einfluss auf die Geometriegenauigkeit hat. So wurde bei der Schrubbearbeitung an den Längenmaßen eine maximale Abweichung von 6,2 μm und am Durchmesser der Inselstruktur 3,4 μm ermittelt. Bei der Messung der Oberflächengüte hingegen hat sich gezeigt, dass die Vorschubgeschwindigkeit keinen merklichen Einfluss hat, aber sich eine leichte Verbesserung der Oberflächengüte bei ansteigenden z-Zustellungen

ergibt. So lag die Oberflächengüte bei einer Zustellung von $0,3 \mu\text{m}$ im Bereich von $R_a = 0,54 \mu\text{m}$ bis $R_a = 0,61 \mu\text{m}$ und bei der Zustellung von $2 \mu\text{m}$ zwischen $R_a = 0,49 \mu\text{m}$ bis $R_a = 0,57 \mu\text{m}$. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich durch eine größere Zustellung der Funkenspalt zwischen Elektrode und Werkstück verkleinert und sich somit die Kapazität des Funkenspalts und damit die nötige Entladeenergie verringert. Die entsprechenden Ergebnisse für die Schlichtbearbeitung sind in Abbildung 5 dargestellt. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass sich aufgrund der niedrigeren Entladeenergien deutlich früher eine negative Beeinflussung des linearen Anstiegs der Abtragsrate bei größer werdenden z-Zustellungen einstellt. So kann lediglich bei $1,5 \text{ mm/s}$ und 2 mm/s bis zu einer Zustellung von $0,9 \mu\text{m}$ von einer nahezu linearen Steigerung der Abtragsrate ausgegangen werden. Es ist auffällig, dass bei der kleinsten Zustellung von $0,3 \mu\text{m}$ die Abtragsraten bei den Geschwindigkeiten von 3 mm/s auf 6 mm/s und von 4 mm/s auf 8 mm/s nicht verdoppeln, wie es noch bei der Schrubbearbeitung der Fall war. Das bedeutet, dass bei den beiden schnellsten Vorschubgeschwindigkeiten schon bei der kleinsten Zustellung vermehrt Kurzschlüsse aufgetreten sind und somit ein kein sauberer Erosionsprozess stattfand. Zudem ist ersichtlich, dass bei allen Vorschubgeschwindigkeiten die Steigerung der Abtragsrate ab der Zustellung von $1,2 \mu\text{m}$ nahezu stagniert. Ab diesem Punkt erhöht sich der volumetrische Abtrag in allen Geschwindigkeitsprofilen um lediglich $0,005 \text{ mm}^3/\text{min}$.

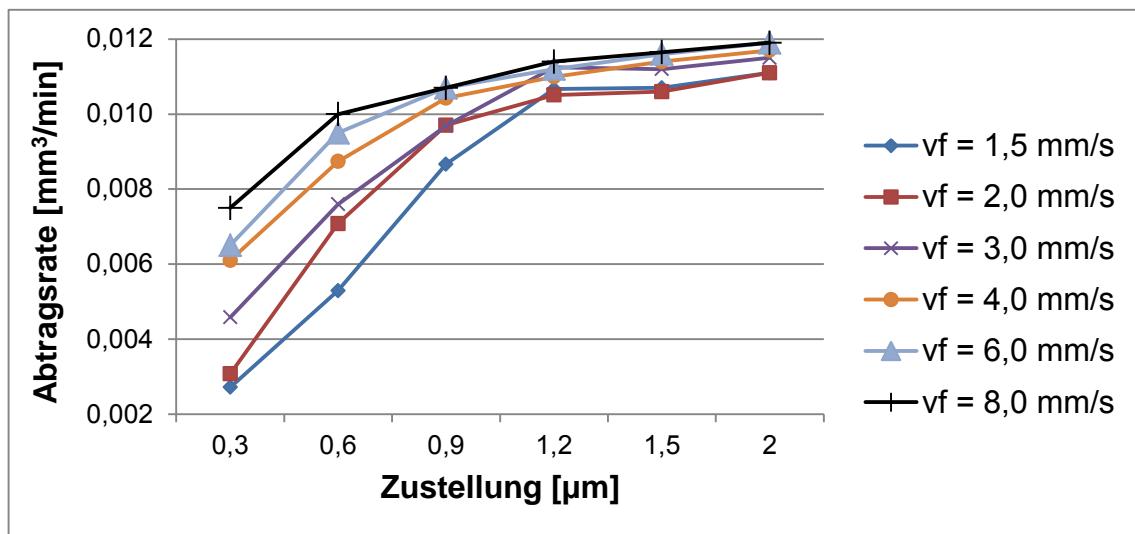


Abbildung 5: Abtragsrate bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit und z-Zustellung bei der Schlichtbearbeitung

Die Fertigungsgenauigkeit bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten unterlag, wie auch schon bei der Schrubbearbeitung, einer rein stochastischen Verteilung. So wurde bei der Fertigung der Testgeometrie aus Abbildung 4 eine maximale Längenabweichung von $6,1 \mu\text{m}$ und eine maximale Abweichung des Durchmessers der Inselstruktur von $1,3 \mu\text{m}$ ermittelt. Das Ergebnis der Messung der Oberflächenrauheit ist von dem Verlauf her äquivalent zu dem der Schrubbearbeitung. Auch hier ist kein Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit zu erkennen. Bei ansteigenden z-Zustellungen ist dagegen eine leichte Verbesserung der Oberflächengüte zu vermerken. Hier verbessert sich die Oberflächenrauheit ausgehend von $R_a = 0,183 \mu\text{m}$ bis $R_a = 0,205 \mu\text{m}$ bei einer z-Zustellung von $0,3 \mu\text{m}$ bis zu einer Oberflächengüte zwischen $R_a = 0,172 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,184 \mu\text{m}$ bei der Zustellung von $2 \mu\text{m}$.

Zur Untersuchung des Skaleneffektes, der sich durch unterschiedliche Elektrodendurchmesser ergibt, wurden ausgewählte Versuchsreihen mit Elektrodendurchmessern von $50 \mu\text{m}$ und 1 mm durchgeführt. Bei der Verwendung einer 1 mm Elektrode konnte bei der Schrubbearbeitung die maximale Abtragsleistung auf $0,048 \text{ mm}^3/\text{min}$ erhöht werden. Allerdings war dieser Wert bei einem Vorschub von 8 mm/s schon bei einer Zustellung von $0,9 \mu\text{m}$ erreicht und konnte durch größere Zustellungen nicht mehr gesteigert werden. Bei der Schlichtbearbeitung hingegen konnte durch den größeren Elektrodendurchmesser keine Erhöhung der maximalen Abtragsleistung erzielt werden. Hier war schon bei der Elektrode mit einem Durchmesser von $300 \mu\text{m}$ mit $0,012 \text{ mm}^3/\text{min}$ ein absolutes Maximum der Abtragsrate erreicht. Zur Untersuchung der Abtragsleistung einer Elektrode mit einem Durchmesser von $50 \mu\text{m}$ konnte nur die Schlichtbearbeitung untersucht werden, da die Entladungsenergie im Schrubbmodus zu groß für diese Größenordnung von Elektroden ist. Dies äußerte sich in einem unkontrollierbaren Elektrodenverschleiß. Somit konnten keine belastbaren Fertigungsergebnisse erzielt werden. Bei der Schlichtbearbeitung konnten die Abtragsraten in den linearen Bereichen der Geschwindigkeitsprofile einer $300 \mu\text{m}$ Elektrode näherungsweise entsprechend des Durchmesserunterschieds herabgeskaliert werden. Es bildete sich hier bei allen Graphen ein nahezu linearer Verlauf aus, wobei eine maximale Abtragsrate von $0,0104 \text{ mm}^3/\text{min}$ bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 8 mm/s und einer Zustellung von $2 \mu\text{m}$ erreicht wurde.

In einer abschließenden Untersuchung wurde Graphit als alternatives Elektrodenmaterial untersucht. Verwendet wurden Stabelektroden mit einem Durchmesser von 300 µm. Insgesamt wurde die Abtragrate wurde diesen Elektrodenwerkstoff positiv beeinflusst. So konnten im Schruppmodus bei kleinen Zustellungen (1,5 µm) 0,018 mm³/min und bei großen Zustellungen (2 µm) 0,031 mm³/min erreicht werden. Die Oberflächengüte von $R_a = 0,43 \mu\text{m}$ lag dabei im Bereich derer, die mit Hartmetallektroden erzielt wurde. Bei der Schlichtbearbeitung wurde lediglich bei großen Zustellungen eine Verkürzung der Abtragrate (0,0124 mm³/min) im Vergleich zur Verwendung von Hartmetallektroden erzielt. Die Oberflächengüte von $R_a = 0,186 \mu\text{m}$ lag hier ebenfalls in der gleichen Größenordnung wie die Werte bei der Verwendung von Hartmetall als Elektrodenmaterial.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Abtragrate bei jeder Energie durch höhere Vorschubgeschwindigkeiten bis zu einer bestimmten Sättigungsgrenze gesteigert werden kann. Begünstigt wird die Senkung der Prozesszeiten ebenfalls durch eine Zunahme der z-Zustellungen bzw. der Abstände der Bearbeitungsebenen. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass durch eine Zunahme der z-Zustellungen eine Verbesserung der Oberflächengüte an planen Flächen herbeigeführt werden konnte. Basierend auf diesen Ergebnissen ist in Abschnitt 5.2.1.2.2 beschrieben, wie sich die unterschiedlichen z-Zustellungen auf die Oberflächengüte an variierenden Wandwinkelschrägen bei der Fertigung von Freiformflächen auswirken.

5.2.1.2.2 3D- und Freiformflächenstrukturierung

Ziel dieser Untersuchungen war es, für die Herstellung einer Freiformfläche die optimalen Zustellungen zu ermitteln, damit die Oberflächenrauheit eine durchgängig hohe Qualität aufweist. Da sich die Wandwinkel bei der Herstellung einer Freiformfläche ständig ändern, wurde das zu betrachtende Winkelspektrum von 0° bis 90° in 5 Segmente unterteilt. Die Abbildung 6 (oben) zeigt eine Testgeometrie mit einer Wandwinkelschräge von 45°. Diese Geometrie wurde für die Winkel 15°, 30°, 45°, 60° und 75° jeweils bei den Zustellungen 0,3 µm, 0,6 µm, 0,9 µm, 1,2 µm, 1,5 µm und 2 µm mit den Entladenergien aus Kapitel 5.2.1.2.1 hergestellt und anschließend die Oberflächengüte bestimmt. Basierend auf den Ergebnissen wurde dann eine Zuordnungsvorschrift aus Wandwinkelschräge der zu fertigenden Geometrie und dem optimalen z-Zustellwert abgeleitet. Im Gesamtkontext der Arbeiten kann dann in Kombination mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.2.1.2.1 die zugehörige Vorschubgeschwindigkeit für die Elektrode abgeleitet werden.

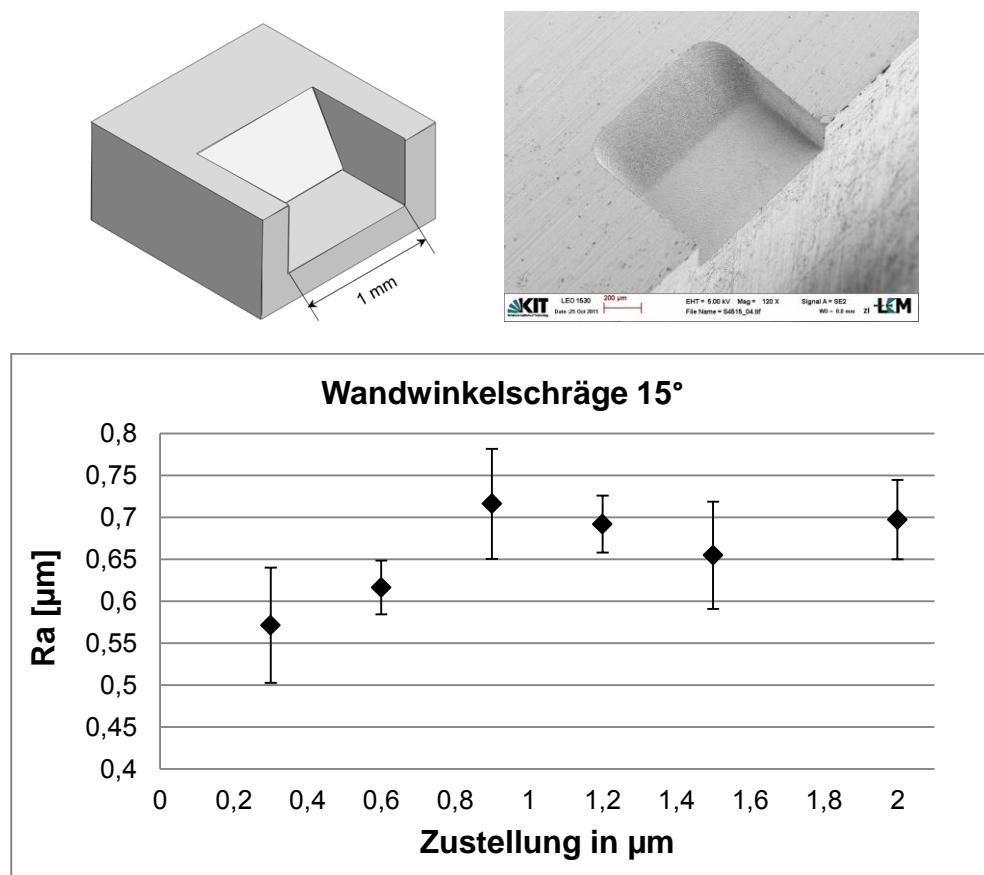


Abbildung 6: Testgeometrie zur Ermittlung der optimalen z-Zustellung in Abhängigkeit der Wandwinkelschräge (oben); Diagramm der Oberflächenrauheit von 15°-Schrägen bei verschiedenen z-Zustellungen (unten)

In dem Diagramm in Abbildung 6 (unten) ist exemplarisch der Verlauf der Oberflächenrauheit bei größer werdenden z-Zustellungen bei einer Wandwinkelschräge von 15° dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich die Oberflächenrauheit ausgehend von einem Wert von $R_a = 0,554 \mu\text{m}$ bei zunehmenden z-Zustellungen verschlechtert. Somit ist für kleine Winkel eine kleine Zustellung optimal. Basierend auf den Untersuchungen von Winkelschrägen bis zu 75° wurden für die Schlicht- und die Schruppbearbeitung Formeln abgeleitet, um auf die optimale z-Zustellung in Abhängigkeit der Winkelschräge zu schließen. Die Abbildung 7 zeigt die Diagramme für die Schlicht- und Schruppbearbeitung sowie die approximierten Formeln für die Berechnung optimaler z-Zustellungen.

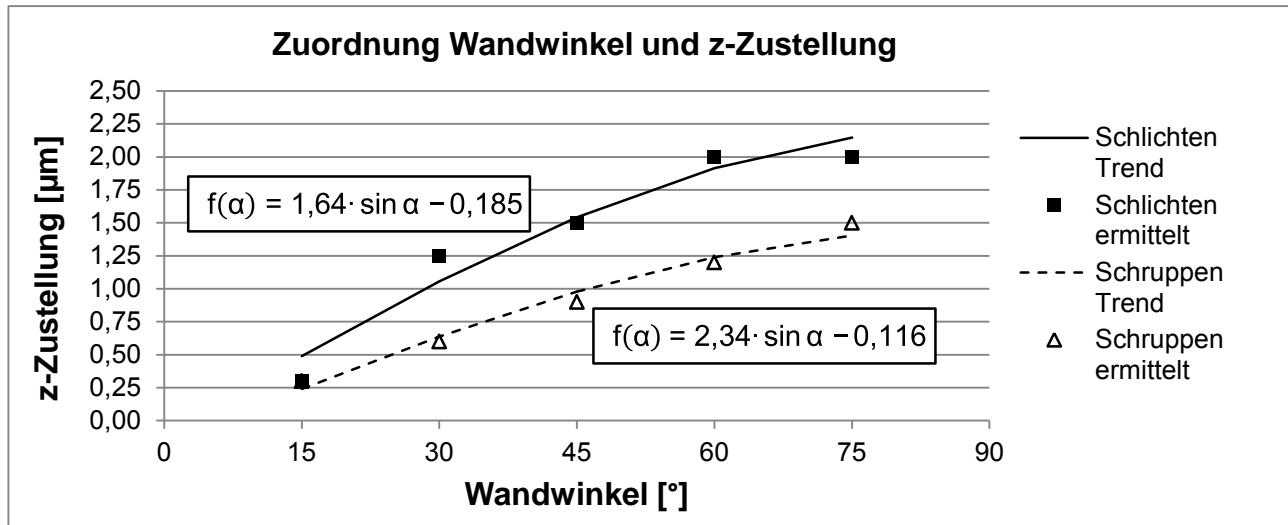


Abbildung 7: Zuordnung optimaler Zustelltiefen bei unterschiedlichen Wandwinkelschrägen

Wie in den Diagrammen ersichtlich, eignen sich für die Fertigung von größeren Wandwinkeln größere Zustellwerte. In den planaren Versuchen zur Vorschubgeschwindigkeit, ergaben größere Zustellwerte auch gleichzeitig eine Verbesserung der Oberflächenrauheit. Dies ist bei der Herstellung von Wandwinkelschrägen nicht der Fall. In den Untersuchungen verschlechterte sich die Oberflächenqualität von $R_a = 0,57 \mu\text{m}$ bei einer z-Zustellung von $0,3 \mu\text{m}$ (15°) bis $R_a = 1,22 \mu\text{m}$ bei einer z-Zustellung von $2 \mu\text{m}$ (75°). Der Grund hierfür ist der steiler werdende Wandwinkel. Je größer der Wandwinkel ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem lateralen Funkenüberschlag an der Umfangsseite der Elektrode mit einem größeren Funkenspalt und damit einer höheren Entladeenergie kommt. REM-Aufnahmen haben gezeigt, dass die Oberflächen bei einem Wandwinkel von 75° deutlich zerklüfteter und kraterbehafteter sind als die bei 15° . Um die Ergebnisse der Untersuchungen zu den optimierten Zustelltiefen in Abhängigkeit der Wandwinkel zu validieren, wurde eine Halbkugeloberfläche im Schlichtmodus gefertigt. Bei der Herstellung wurde die Gesamttiefe der Halbkugel in unterschiedliche Tiefensegmente aufgeteilt, für die die jeweils optimale Zustellung gemäß der in Abbildung 7 dargestellten Formel berechnet wurde. In Abbildung 8 sind die Tiefensegmente und ein Schnitt durch die Halbkugel dargestellt.

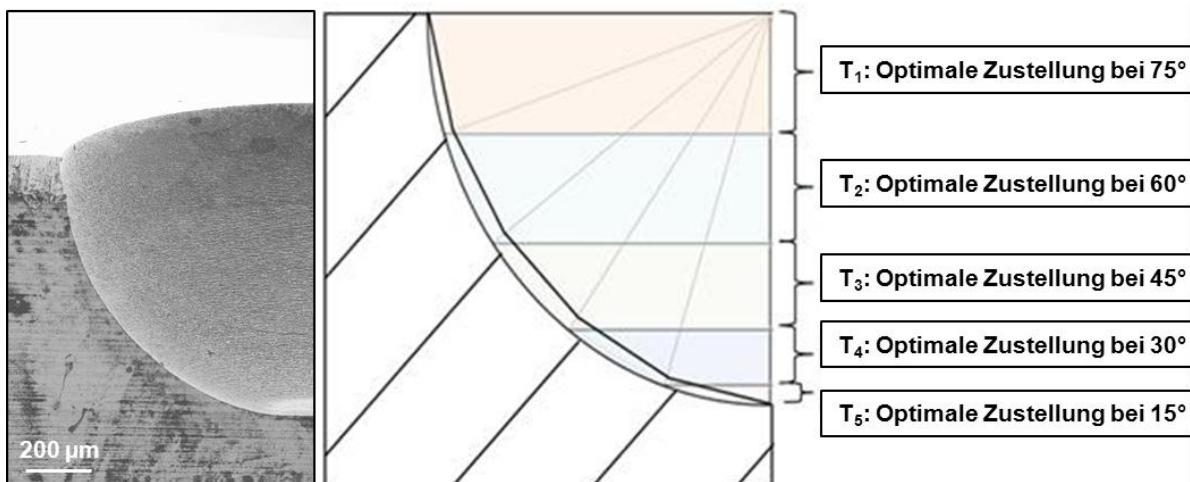


Abbildung 8: Gefertigte Halbkugel (Schlichten) zur Validierung der Ergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle (Abbildung 9) sind die Ergebnisse der Oberflächenrauheitsmessung an der Innenwand der Halbkugel dargestellt. Diese Validierung hat gezeigt, dass sich durch die Optimierung der Zustelltiefen die jeweilige Oberflächenrauheit der angenäherten Wandwinkelschrägen reproduzierbar verbessern lässt. Durch eine durchgängige Datenbasis kann jetzt auch die Oberflächenrauheit gezielt eingestellt werden. Es kann zwar nicht an jeder Stelle das Optimum von $R_a = 0,52 \mu\text{m}$ erreicht werden, aber es ist möglich, die Zustellungen für flache Winkel so einzustellen, dass sich die Oberflächenrauheit der von großen Zustellungen und steilen Wandwinkeln anpasst, um so eine homogene Oberflächengüte über die gesamte Bauteiloberfläche herzustellen.

Wandwinkel [$^{\circ}$] (Segment)	Errechnete z-Zustellung [μm]	konstante Winkel- schräge; R_a [μm]	Halbkugelsegment; R_a [μm]
15 (T5)	2,15	0,57	0,52
30 (T4)	1,91	0,62	0,65
45 (T3)	1,54	0,86	0,84
60 (T2)	1,06	1,07	1,09
75 (T1)	0,49	1,16	1,13

Abbildung 9: Oberflächenrauheit in Halbkugel als Ergebnis der Validierung

5.2.1.2.3 Prozessübergreifende Abtragregelung (In-line-QS)

Der Bahnerosionsprozess ist, wie auch alle anderen Prozessvarianten der Erosion, stark elektrodenverschleißbehaftet. Der prozessbedingte Elektrodenverschleiß wird bei dieser Prozessvariante durch eine kontinuierliche Nachführung des Werkzeugs realisiert. Die korrekten Parameter für die Verschleißkompensation beruhen auf Erfahrungswissen und können sich durch veränderte Prozessbedingungen während der Bearbeitung ändern. So haben die fortschreitende Bearbeitungstiefe, die Spülung des Funkenspalts durch das Dielektrikum und eine variierende Bahnüberlappung einen Einfluss auf das Ausmaß des Elektrodenverschleißes. Gewöhnlich nimmt der relative Werkzeugverschleiß mit steigender Bearbeitungstiefe zu, so dass die gewünschte Tiefe bei der Fertigung, trotz taktiler Kontrolle im Prozess, nicht immer erreicht wird. Hinzu kommt, dass jede Abtragebene entweder von außen nach innen oder von innen nach außen abgetragen wird. Je nach Bearbeitungsstrategie kommt es bei einer ungenauen Verschleißkompensation daher zur Ausprägung einer konvexen oder konkaven Oberfläche des erzeugten Grundes einer Kavität, da von einer Bahn zur nächsten die Elektrode entweder zu viel oder zu wenig zugestellt wird. Diese Gestaltabweichung wird im folgenden als global bezeichnet. Eine weitere Variante der negativen Beeinflussung des Bearbeitungsergebnisses ist die regionale Geometrieabweichung. Hierbei wird während der letzten Bearbeitungsebenen die Elektrode zu viel oder zu wenig zugestellt und hinterlässt eine Riefenstruktur an der Oberfläche der Kavität. In der nachfolgenden Abbildung 10 sind die beiden Varianten der Geometrieabweichung dargestellt.

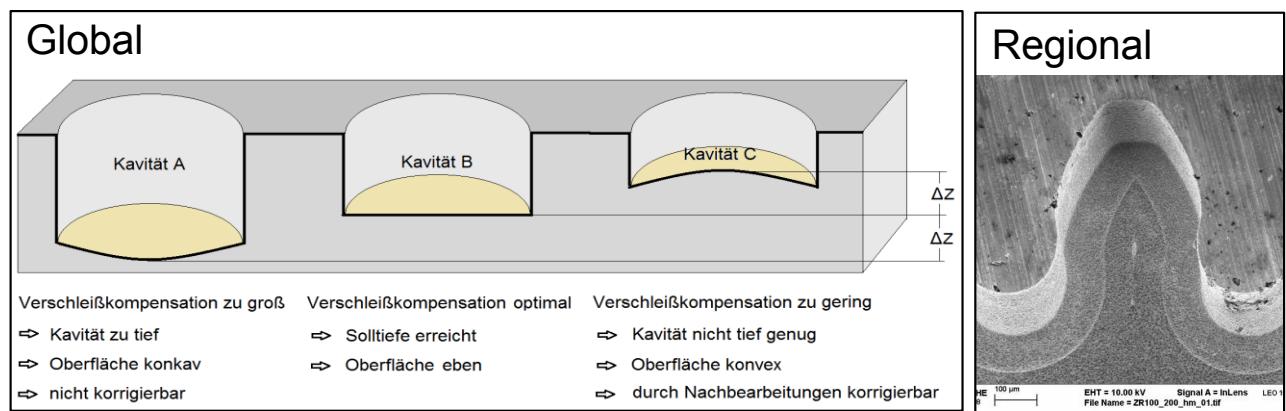


Abbildung 10: Globale (links) und regionale (rechts) Geometrieabweichung

Um diesen beiden Fehlerausprägungen entgegen zu wirken, wurde eine prozessübergreifende Abtragregelung für die Mikrobahnerosion entwickelt. Grundlage hierfür war die Implementierung eines Messsystems in die Mikrofunkenerosionsanlage, um das Werkstück ohne Umspannprozesse bearbeiten und messen zu

können. Hierfür wurde ein konfokaler Weißlichtsensor ausgewählt, mit dessen Hilfe die exakte Bestimmung einer auftretenden Geometrieabweichung möglich ist. Der Sensor basiert auf dem Prinzip der chromatischen Abstandsmessung. Das Wellenlängenspektrum von 400-800 nm (weißes Licht) wird auf der Werkstückoberfläche durch einen Messkopf mit einer stark wellenlängenabhängigen Brennweite fokussiert. So werden die unterschiedlichen Wellenlängen des weißen Lichtes verschieden stark gebrochen. Abhängig davon, welche Wellenlänge von der Werkstückoberfläche reflektiert wird, detektiert das Spektrometer ein Maximum der Intensität. Basierend auf den ermittelten Daten können dann die Tiefenabstände der einzelnen Messpunkte relativ zueinander ermittelt und ausgewertet werden.

Nach einer ersten Bearbeitung einer Kavität erfolgt der Messprozess. Da der Spotdurchmesser des Sensors lediglich einen Durchmesser von 5 μm aufweist, ist das Abtasten einer Gesamtstruktur sehr zeitintensiv. Um Nebenzeiten einzusparen, wurden deshalb zwei unterschiedliche Messstrategien für die beiden Arten der Geometrieabweichung entwickelt. Um die globale Abweichung zu erfassen, ist ein einfacher linienförmiger Scan quer über eine Kavität ausreichend, da die Bearbeitungsbahnen der Elektrode je Ebene stets von außen nach innen oder von innen nach außen verläuft. Dadurch ist gewährleistet, dass der höchste und der niedrigste Punkt des Bodens einer Kavität erfasst wird. In Abbildung 11 (links) ist dieser anhand einer einfachen kreisförmigen Kavität dargestellt. Basierend auf diesem ersten Messschritt kann dann die Nachbearbeitung der Tiefe der Kavität erfolgen. Die Tiefenabweichung einer Kavität kann bis zu 10 μm betragen. Das überschüssige Material muss daher nach Vorbild der Grundbearbeitung ebenfalls in mehreren Schichten abgetragen werden. Um einen ersten Nachbearbeitungsprozess auslegen zu können, wird die maximale Abweichung von der Solltiefe aus den Messdaten ermittelt und basierend auf der Grundbearbeitung ein neuer NC-Code erzeugt, ausgehend von der gemessenen Isttiefe der Kavität bis hin zum Sollwert. Zum Festlegen der Höhenniveaus der einzelnen Bearbeitungsebenen, wird die Dicke der abzutragenden Schicht durch den Wert der Zustellung zwischen den Schichten aus dem NC-Code der Grundbearbeitung geteilt und die erste Bearbeitungsebene auf das gemessene Höhenniveau der Isttiefe gelegt. Durch eine iterative Ausführung dieser Mess- und Nachbearbeitungsroutine kann die Kavität auf Solltiefe gebracht werden.

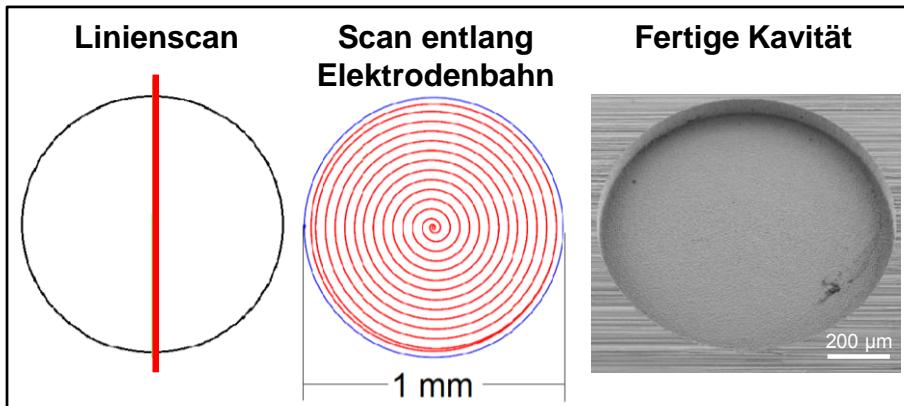


Abbildung 11: Linienförmiger Scan (links); Scan entlang den Elektrodenbahnen (Mitte); Fertige Kavität (rechts)

Für die Korrektur der lokalen Geometrieabweichung, ist die Taschentiefe durch die vorgelagerte Nachbearbeitung schon näherungsweise dem Sollmaß entsprechend. Um die jetzt noch vorhandene lokale Geometrieabweichung, die in der Größenordnung von 1-3 μm liegt, muss jeder Punkt bzw. jedes Höhenniveau des Bodens der Kavität erfasst werden. Hierzu wurde eine spezielle Messstrategie entwickelt, bei der die Bahn des Messflecks der der Elektrode bei der Bearbeitung entspricht. Diese Vorgehensweise ist legitim, da bei dem Mikrobahnerosionsprozess die Erosion immer nur an der Stirnseite der Elektrode stattfindet und durch die Rotation der Verschleiß homogen an dieser verläuft. Somit kann die Elektrode an der Stirnseite als plan vorausgesetzt werden. Einer möglichen Geometrieabweichung hervorgerufen durch eine entstehende Verrundung an der Kante der Elektrode wird durch eine entsprechende Überlappung der Elektrodenbahnen vorgebeugt. Aus diesen Gründen kann eine gefertigte Elektrodenbahn in der Breite als eben vorausgesetzt werden. Durch diese Strategie ist sichergestellt, dass jedes z-Niveau des Bodens der Kavität erfasst wird, wenn der Fokus entlang der Bahn des TCP (Tool Center Point) der Elektrode geführt wird. Dadurch kann die Nebenzeiten des Prozesses enorm gesenkt werden. Beispielsweise beträgt die Messzeit für eine Zahnrädkavität mit einem Kopfkreisdurchmesser von 3 mm lediglich 47 s gegenüber dem Komplettscan mit einer Messzeit von ca. 3 h. In Abbildung 12 ist exemplarisch eine Abtastprofile entlang der Elektrodenbahn der kreisförmigen Kavität dargestellt. Bei dieser ist ein deutlicher Anstieg des Profils zu erkennen, was auf eine konvexe Bauteiloberfläche schließen lässt. Diese wurde durch die Bearbeitungsstrategie, in der die Bearbeitungsbahnen der Elektrode von außen nach innen verliefen, und einer Unterkompensation des Elektrodenverschleißes verursacht.

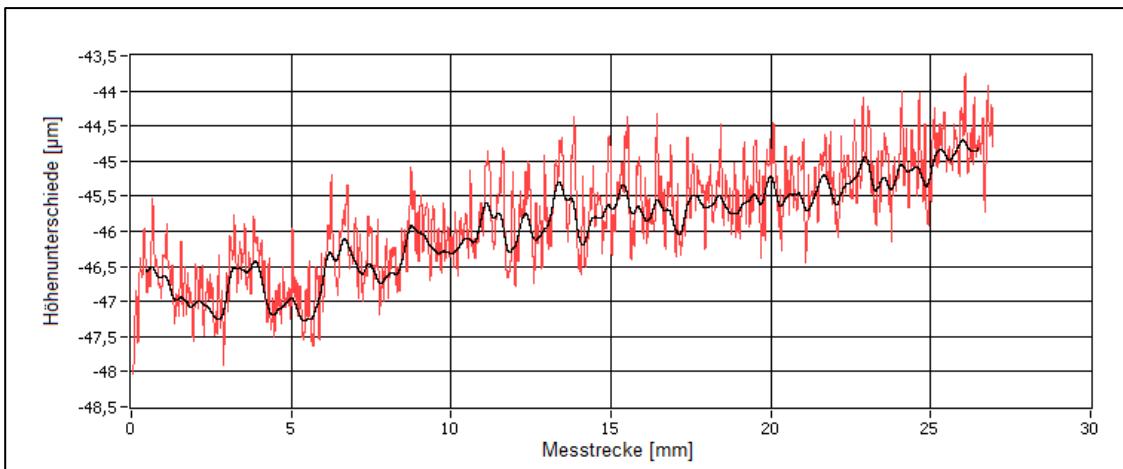


Abbildung 12: Abtastprofil entlang der Elektrodenbahn einer konvexen Bauteiloberfläche

In einem anschließenden Schritt werden die aufgenommenen Daten mit einer Tiefpass-Filterung nach Gauß geglättet. Höhenausreißer werden somit ausgeblendet und der Verlauf des Filtersignals bzw. des Welligkeitsprofils entspricht einem mittleren Höhenverlauf entlang der Bearbeitungsbahn. Der Wert W_t , also die Differenz aus höchstem und niedrigstem Punkt im gefilterten Welligkeitsprofil charakterisiert den mittleren Höhenunterschied innerhalb der Kavität und ist damit auch ein Maß für die Ebenheit des Taschenbodens. Basierend auf diesen Messdaten kann der NC-Code für die Nachbearbeitung abgeleitet werden. Als Startebene wird hierbei der Maximalwert des Welligkeitsprofils unter Berücksichtigung des Funkenspalts genutzt. Basierend auf dem ursprünglichen NC-Code wird dann die Bearbeitung für die Beseitigung der lokalen Geometrieabweichung bzw. der Welligkeit abgeleitet. Wichtig hierbei ist, dass die Bearbeitung ohne Verschleißkompensation abläuft, da durch das Glätten des Welligkeitsprofils keine genaue Aussage über das Abtragvolumen und somit den Elektrodenverschleiß getroffen werden kann. Durch ein iteratives Durchlaufen von Mess- und Abtragprozess wird sich dann schrittweise der ebenen Oberfläche auf Solltiefe angenähert. Dieser zweistufige Mess- und Nachbearbeitungsprozess auf Solltiefe und Ebenheit wurde mit der optischen Programmieroberfläche LabView2008 softwaretechnisch umgesetzt, so dass der gesamte Prozess automatisiert und ohne manuelle Eingriffe des Bedieners ablaufen kann. Abbildung 13 zeigt den Ablaufplan der prozessübergreifenden Abtragregelung.

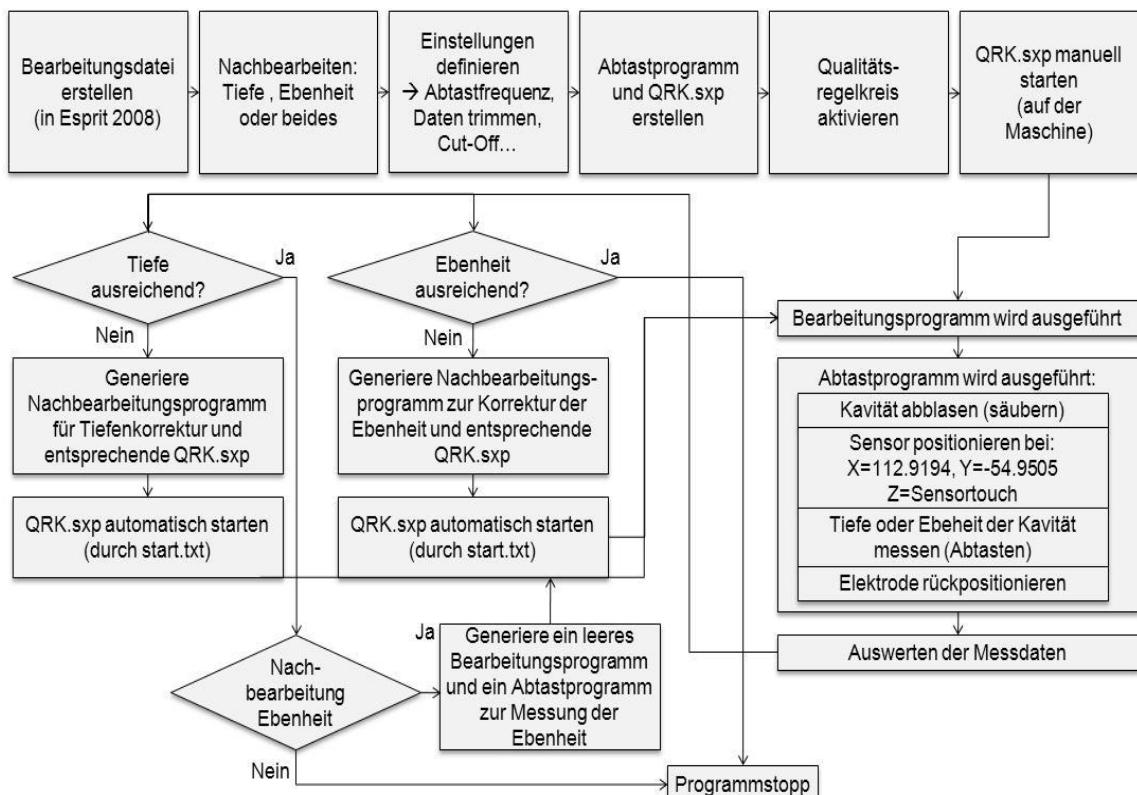


Abbildung 13: Ablaufplan der prozessübergreifenden Abtragregelung

Um die Leistungsfähigkeit der prozessübergreifenden Abtragregelung zu validieren, wurde eine Testgeometrie definiert, die unterschiedliche Geometriedetails, Bahnüberlappungen und Elektrodenumkehrpunkte beinhaltet. Diese Eigenschaften können eine Variation des Verschleißverhaltens der Elektrode hervorrufen. Zur Herstellung der Testkavität aus 30CrMo6 wurde eine Elektrode mit einem Durchmesser von 100 µm aus WC-6Co verwendet. Zur Simulation eines Worst-Case-Szenarios wurde beim ersten Bearbeitungszyklus keine Verschleißkompensation vorgenommen, so dass zu Beginn des Regelungsprozesses eine große Abweichung zwischen Ist- und Solltiefe der Kavität vorlag. Der Tabelle in Abbildung 14 ist zu entnehmen, dass nach dem ersten Fertigungsschritt bzw. der Grundbearbeitung lediglich eine Tiefe von 73 µm anstelle der geforderten 100 µm erreicht wurde. Der vorgegebenen Solltiefe wurde sich dann innerhalb von fünf Fertigungsschritten angenähert. Die Messwerte der Tiefe zeigen, dass die Tiefe asymptotisch dem Sollwert nähert. Dadurch und durch den Wegfall der Verschleißkompensation bei der Nacharbeit der Ebenheit, kann ausgeschlossen werden, dass die gewünschte Tiefe der Kavität überschritten wird.

Bearbeitungsschritt	Isttiefe der Kavität [µm]	Ebenheit (Wt) des Bodens [µm]
Nach der Grundbearbeitung	72,934	1,49553
Nach 1. Nachbearbeitung	84,229	2,22
Nach 2. Nachbearbeitung	93,306	1,831
Nach 3. Nachbearbeitung	96,944	1,798
Nach 4. Nachbearbeitung	97,915	1,489
Nach 5. Nachbearbeitung	98,235	0,9574

Abbildung 14: Isttiefe und Ebenheit des Bodens der Kavität nach verschiedenen Nachbearbeitungsschritten

Nach dem insgesamt fünften Prozessschritt wurde eines der zu Beginn definierten Abbruchkriterien erreicht und eine Bauteiltiefe von über 98 µm und eine Oberflächenwelligkeit unter 1 µm erzielt, was im Bereich der Oberflächenrauheit des Verfahrens liegt. An den Messwerten der Ebenheit ist ersichtlich, dass hier die Abweichung immer im Bereich von 1,5 µm bis 2 µm lag. Erst bei dem fünften und damit letzten Bearbeitungsschritt wird diese geglättet. Die Abbildung 15 zeigt die Oberfläche der erodierten Testkavität. Es ist erkennbar, dass die Oberfläche der Struktur plan ist und keinerlei Riefen entlang der Elektrodenbahnen aufweist.

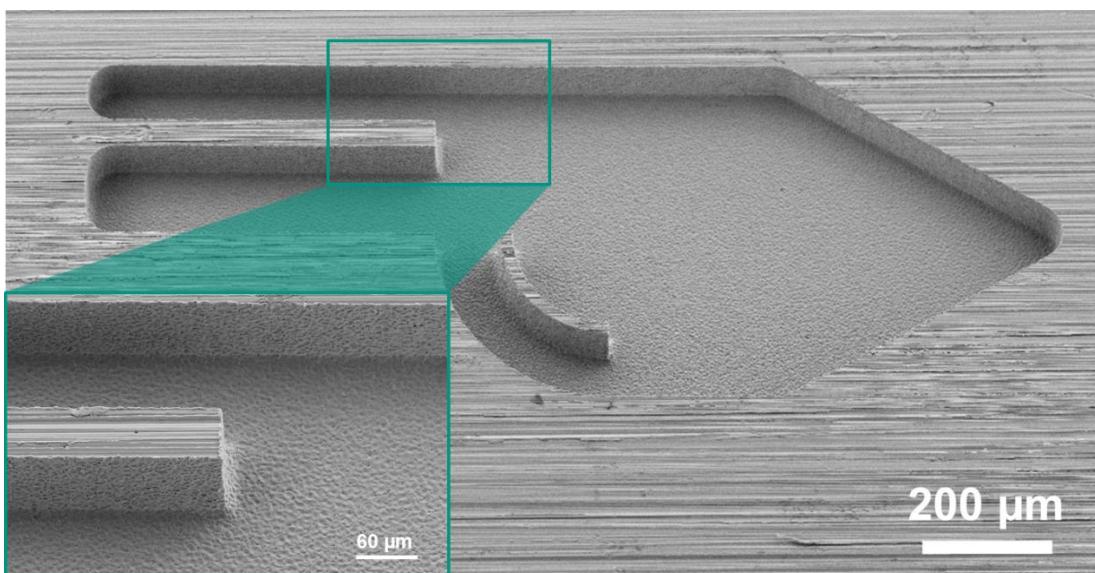


Abbildung 15: gefertigte Testgeometrie

5.2.1.2.4 Ablaufplan 3D-Strukturierung

Begleitend zu den Untersuchungen des Erodierprozesses und der Formeinsatzfertigung wurde ein allgemeiner Ablaufplan (Abbildung 16) zur Herstellung von Kavitäten definiert. Ausgangspunkt hierbei ist immer eine fertigungsgerechte technische Zeichnung oder ein 3D-Datenmodell des Bauteils. Darauf basierend wird die Auswahl des Werkstückmaterials getroffen, sofern nicht vom Konstrukteur vorgegeben, sowie die Abmaße des Rohlings. Prozessbedingt muss eine Mindestleitfähigkeit von $0,1 \text{ S/cm}^2$ gewährleistet sein. Parallel dazu muss basierend auf den Geometriedetails die Prozessvariante der Mikrofunkenerosion festgelegt werden.

An die Rohtearauswahl schließt sich dann die Werkzeugauswahl an. Gemäß den kleinsten Geometriedetails der zu fertigenden Kavität wird die Größe, die Gestalt und das Material der Werkzeugelektrode definiert, genauso wie die Anzahl der benötigten Senkelektroden für den Fall des Einsatzes dieser Prozessvariante. Daraus anschließend erfolgt die Wahl des Spannsystems. Hier muss auch festgelegt werden, ob die gesamte Bearbeitung in einer Einspannung bzw. in einer Spannposition durchgeführt werden kann. Dieser Schritt ist besonders bei der Bearbeitung von komplexen 3D-Bauteilen von Bedeutung, um Geometrieabweichungen zu minimieren. Können die Schritte der Werkzeug- und Spannsystemauswahl nicht erfolgreich durchgeführt werden, dann muss eine Iterationsschleife bis zum Beginn des Planungsprozesses ausgeführt werden.

Im nächsten Schritt werden basierend auf den Spannmitteln und den Umspannprozessen entsprechende Einmessstrategien festgelegt und gegebenenfalls entsprechende Geometriedetails zum Einmessen schon für die anschließende Bearbeitung vorgesehen. Sollte dieser Schritt nicht möglich sein, müssen die Spannmittelauswahl oder die Spannstrategien überarbeitet werden.

Daran anschließend erfolgt die Parameterfindung für den Erodierprozess. Hierbei werden Testkavitäten mit variierenden Prozessparametern gefertigt und diese im Anschuss das Prozessergebnis begutachtet. Darauf aufbauend erfolgt die Programmierung des NC-Codes entsprechend der vorgegebenen Geometrie, den festgelegten Werkzeugen, Spannmitteln und Einmessstrategien sowie den erarbeiteten Prozessparametern. Abschließend kann dann die Herstellung des Formeinsatzes erfolgen, der darauf folgend an die nachgelagerte Qualitätssicherung übergeben wird.

Diese allgemeine Vorgehensweise wurde während der Fertigung von Formeinsätzen dokumentiert und durch die wiederholte Anwendung validiert. Um diese Prozesskette in den Gesamtkontext des Sonderforschungsbereichs zu bringen, wurde sie mit denen anderer Verfahren im ZIM (Zentrum für Integrierte Mikrofertigung) zusammengeführt. Zudem wurden die während den Fertigungsprozessen erarbeiteten Bauteilgeometrien und Parameter dem innerhalb des Sonderforschungsbereichs entstandenen Strukturkatalog zugeführt.

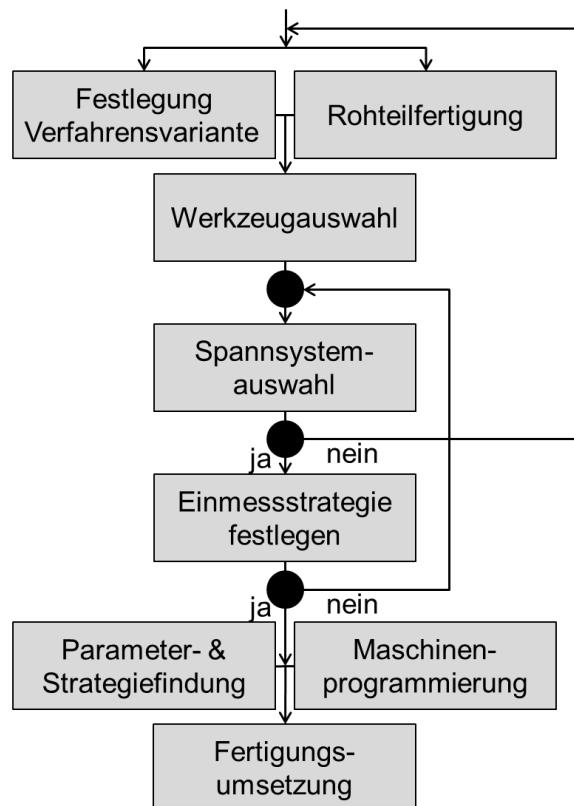


Abbildung 16: Allgemeine Vorgehensweise zur Herstellung von Formeinsätzen mittels Mikrofunkenerosion

Die allgemeine Vorgehensweise wurde bei der Fertigung eines 3D-Demonstratorbauteils eingesetzt und die Ergebnisse aus den Kapiteln 5.2.1.2.1 und 5.2.1.2.2 angewandt. Bei dem Bauteil handelt es sich um eine 5-Seiten-Bahnbearbeitung eines quaderförmigen Grundkörpers, der mittels WEDG-Verfahren (Wire Electrical Discharge Grinding) und Drahterosion vorstrukturiert wurde. Die Kegelbohrungen an den Außenflächen weisen einen oberen Durchmesser von 600 µm und einen inneren von 350 µm auf.

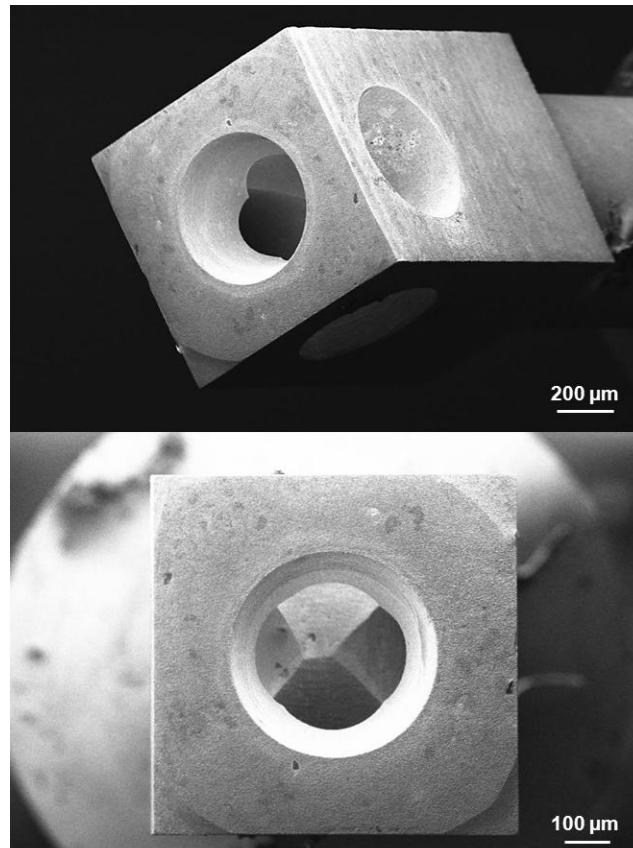


Abbildung 17: 3D-Demonstratorbauteil

Ein weiteres Beispiel einer sequenziellen Prozesskette zur Fertigung eines Formeinsatzes ist die Form für das Laufrad der Mikroturbine, die in dieser Phase des Sonderforschungsbereichs als Demonstrator diente. Wie in Abbildung 18 dargestellt wurden Angussbohrungen mit einem Durchmesser von 200 µm in einer kreisförmigen Anordnung am Anschluss an eine Fräsbearbeitung erodiert.

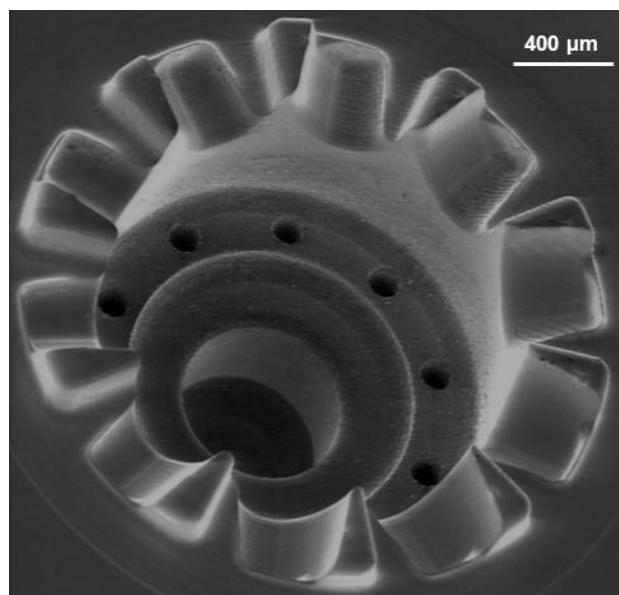


Abbildung 18: Formeinsatz Verfahrenskombination Mikrofräsen und Mikroerodieren

5.2.1.3 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Sowohl national als auch international wird auf dem Gebiet der Mikrofunkenerosion geforscht, um die Abtragrate zu steigern, eine bessere Oberflächenrauheit zu erzeugen und die Präzision der Bauteile zu erhöhen.

Untersuchungen zur Steigerung der Abtragrate und Verbesserung der Oberflächengüte sind vorwiegend im Bereich der Senkerosion angesiedelt. Hier werden beispielsweise unterschiedliche Elektrodenmaterialien sowie -beschichtungen [Cur-03, Uhl-08], alternative Dielektrika [Kao-07, Pec-08] und hochdynamische Elektrodenvorschubsysteme [Ton-08, Yu-09] erforscht. Es ist nicht bekannt, dass auf dem speziellen Gebiet der Mikrobahnerosion an optimalen Prozessparameterpaarungen aus z-Zustelltiefe und lateraler Vorschubgeschwindigkeit gearbeitet wird. Es existieren allerdings Ansätze die verschleißbedingte Geometrieabweichung zu minimieren. Forschungsseitig wird hier die Entwicklung von Algorithmen zur Generierung des NC-Codes [Cha-05, Raj-00] und modellbasierte Kompensationsstrategien für der Elektrodenverschleiß im Prozess [Ble-02, Ble-04] vorangetrieben. Der Ansatz, den auftretenden Verschleiß während eines Bearbeitungszyklus zu detektieren und durch eine automatisierte Nacharbeit zu eliminieren, ist aber neuartig und wurde bis dato noch nicht untersucht.

Literatur

- [Cha-05] Chang, Y.-F., Rong-Chi, H.: Parametric curve machining of a CNC milling EDM, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, 2005, p. 941–948
- [Ble-02] Bleys, P., Kruth, J. P., Lauwers, B., Zryd, A., Delpretti, R., Tricarico, C.: Real-time Tool Wear Compensation in Milling EDM, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 51, Issue 1, 2002, p. 157-160
- [Ble-04] Bleys, P., Kruth, J. P., Lauwers, B.: Sensing and compensation of tool wear in milling EDM, Journal of Materials Processing Technology 149, 2004, p. 139–146
- [Raj-00] Rajurkar, K.P., Yu, Z. Y: 3D Micro-EDM Using CAD/CAM Original Research Article, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 49, Issue 1, 2000, Pages 127-130
- [Pec-08] Pecas, P., Henriques, E.: Electrical discharge machining using simple and powder-mixed dielectric: The effect of the electrode area in the surface roughness and topography, journal of materials processing technology 200, 2008, p. 250–258
- [Kao-07] Kao, C. C., Tao, J., Shih, A. J.: Near dry electrical discharge machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, 2007, p. 2273–2281
- [Ton-08] Tonga, H., Lib, Y., Wanga, Y., Yub, D.: Servo scanning 3D micro-EDM based on macro/micro-dual-feed spindle, International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, 2008, p. 858–869
- [Uhl-08] Uhlmann, E.; Roehner, M.: Investigations on reduction of tool electrode wear in micro-EDM using novel electrode materials, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 1, 2008, p. 92-95
- [Cur-03] Curodeau, A.: Molds surface finishing with new EDM process in air with thermoplastic composite electrodes, Journal of Materials ProcessingTechnology 149, 2004, p. 278–283
- [Yu-09] Yu, Z.Y., Zhang, Y., Li, J., Luan, J., Zhao, F., Guo, D.: High aspect ratio micro-hole drilling aided with ultrasonic vibration and planetary movement of electrode by micro-EDM, CIRP Annals - Manufacturing Technology 58, 2009, p. 213–216

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

Publikationen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung

- [1] Schulze, V.; Weber, P.; Ruhs, C.: Increase of process reliability in the micro-machining processes EDM-milling and laser ablation using on-machine sensors, Journal of Materials Processing Technology, Micro-Manufacturing Processes, Volume 212, Issue 3, March 2012, Elsevier, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.09.014, Pages 625-632, 2012
- [2] Schulze, V.; Weber, P.; Ruhs, C.: Optical and acoustical process control in hybrid micromachining using a picosecond pulsed UV-laser and micro EDM-milling, 4M 2011, 8-10 November 2011, Stuttgart, Germany, Research Publishing, 4M Association, Band , Proceedings of the 8th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture, ISBN 978-981-07-0319-6, S. 83 – 86, 2011

- [3] Schulze, V.; Deuchert, M.; Ruhs, C.; Weber, P.; Weingärtner, R.: Fertigungstechnologien zur Erzeugung hochgenauer Mikrostrukturen und Oberflächen, Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, 11. - 12. Oktober 2011, Karlsruhe, Germany, Verlag KIT Scientific Reports, Band , Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, ISBN ISBN 978-3-86644-747-9, S. 65 – 74, 2011
- [4] Schulze, V.; Weber, P.; Deuchert, M.; Haupt, S.; Ruhs, C.; Kienzler, A.: Limits and challenges of manufacturing micro moulds, International Journal of Nanomanufacturing, Jahrgang 2010, Heft/Band Vol. 6, No.1/2/3/4, Verlag Inderscience Publishers, DOI 10.1504/IJNM.2010.034782, S. pp. 176 – 189, 2010
- [5] Schulze, V.; Ruhs, C.: On-machine measurement for the micro-EDM-milling process using a confocal white-light sensor, 10th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, 31st May to 4th June 2010, Delft, Netherlands, Band , Conference Proceedings, volume 2, S. 37-40, 2010
- [6] Schulze, V.; Deuchert, M.; Kienzler, A.; Ruhs, C.; Weber, P.: Prozessübergreifende Betrachtung abtragender Verfahren zur Mikroformenherstellung, 4. Kolloquium Mikroproduktion, 28.-29.10.2009, Bremen, Deutschland, Verlag BIAS-Verlag, Herausgeber/Veranstalter F. Vollertsen, S. Büttgenbach, O. Kraft, W. Michaeli, Band , 4. Kolloquium Mikroproduktion, Bremen, ISBN 978-3-933762-32-0, S. 125-131, 2009
- [7] Schulze, V.; Weber, P.; Ruhs, C.: Implementation of on-machine measurements using confocal white-light sensors for micro Electrical Discharge Machining and micro laser ablation, 4M/ICOMM 2009 Conference, 23-25 September 2009, Karlsruhe, Deutschland, Band 4M/ICOMM 2009 - The Global Conference on Micro Manufacture, S. 179-182, 2009

Andere Publikationen

- [8] Schulze, V., Ruhs, C.: Prozessübergreifende Abtragregelung für die Mikrobahn-erosion durch die Nutzung konfokaler Weißlichtsensorik, Jahrbuch 2012 Optik und Mikromechanik, Status: *eingereicht*
- [9] Schulze, V.; Ruhs, C.: Abtragregelung der Mikroerosion maximiert die Genauigkeit, MM Maschinenmarkt, Jahrgang 2011, Heft/Band Ausgabe 36, Verlag Vogel Business Media, S. 116-119, 2011

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit 01.01.2003 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1	Schulze, V. Prof. Dr.-Ing. habil	Maschinenbau	wbk	4	
	2	Pabst, R. Dr.-Ing.	Maschinenbau	wbk	5	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	3	Heinz, M.		wbk	10	
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	4	Ruhs, C., Dipl.-Ing.	Maschinenbau	wbk	39,5	E 13
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	5	Philipps, R.		wbk	19,75	E 9
	6	N. N.		wbk	19,25	SH

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

- 1 Prof. Dr.-Ing. habil. V. Schulze ist Institutsleiter des Instituts für Produktionstechnik (wbk). Ihm oblag die Leitung und Überwachung des Teilprojektes. Er vertrat das Teilprojekt auf den Mitgliederversammlungen des Sonderforschungsbereiches und pflegte Kontakte zu den anderen Teilprojektleitern zur Förderung der Zusammenarbeit innerhalb des Sonderforschungsbereiches.
- 2 Dipl.-Ing. R. Pabst unterstützte das Teilprojekt im Bereich der Anwendung von CAD/CAM-Systemen.
- 3 M. Heinz unterstützte das Teilprojekt B4 aufgrund seiner langjährigen Erfahrung auf dem Gebiet der Messtechnik.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

- 6 Dipl.-Ing. C. Ruhs (Wissenschaftlicher Mitarbeiter, TVL 13) war verantwortlich für die Betreuung des Vorhabens. Er war zuständig für Planung, Koordination und Durchführung der Forschungsarbeiten sowie für die Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten des Sonderforschungsbereichs. Insbesondere war er zuständig für die Konzeption der Erodierversuche. Des Weiteren war der wissenschaftliche Mitarbeiter betraut mit der Interpretation der Versuchsergebnisse und verantwortlich für die Einarbeitung der Ergebnisse in die weitere Versuchsplanung. Ferner war er verantwortlich für die Dokumentation.
- 7 Die studentische Hilfskraft unterstützte den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Versuche. Insbesondere war sie zuständig für die Durchführung zeitaufwendiger Messungen. Des Weiteren unterstützte sie den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei konstruktiven Aufgaben, wie z.B. der Konstruktion von Vorrichtungen sowie bei der Erstellung von Dokumentationsunterlagen
- 8 R. Philipps (Techniker, TVL 9) unterstützte als Techniker den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Durchführung der Erodierversuche. Ihm oblagen dabei insbesondere die Betreuung der am Institut vorhandenen Mikroerodiermaschine sowie die Durchführung von Erodierversuchen.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt B5

5.1.1 Titel

Optimierte Formeinsätze – Optimierung der Eigenschaften von Mikroformeinsätzen durch mechanische und chemische Behandlungen

Optimized Moulds – Optimization of Micro-moulds by mechanical and chemical treatments

5.1.2 Projektleitung

Schulze, Volker, Prof. Dr.-Ing., geb. 20.04.1965, deutsch

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde (IAM-WK)

Kaiserstr. 12

76128 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 6084-2440

Volker.Schulze@kit.edu

Löhe, Detlef, Prof. Dr.-Ing., geb. 23.09.1949, deutsch

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde (IAM-WK)

Kaiserstr. 12

76128 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 6084 2004

Detlef.Loehe@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Zur Herstellung der Formeinsätze werden im SFB 499 Mikrofräsen, Mikroerodieren sowie Laserablation angewandt, wobei die erzeugten Oberflächen durch den Einfluss des Herstellverfahrens geprägt sind. So entstehen beim Mikrofräsen Grate an den Kanten der Strukturen sowie Fräsuren, beim Mikroerodieren und der Laserablation bilden sich sogenannte weiße Schichten und Schmelzablagerungen auf der Oberfläche. In Hinblick auf die Verwendung als Formeinsatz können sich diese Oberflächenbeschaffenheiten negativ auf Entformungs- oder Verschleißverhalten auswirken, was eine Feinstbearbeitung zur Optimierung der Oberflächen erforderlich macht.

Das Teilprojekt B 5 beschäftigt sich mit der Entwicklung und Untersuchung von Verfahren zur Feinstbearbeitung der Mikroformeinsätzen zur Verbesserung der Bauteilqualität. Hierzu wurden in den vorangegangenen Phasen insbesondere die Mikro-Strahlverfahren Mikrostrahlen und Ultraschallnassstrahlen zur Nachbearbeitung der primärstrukturierten Formeinsätze untersucht. Dabei wurden die Oberflächen bzw. Randschichten unterschiedlich strukturierter Kavitäten bezüglich Topographie, Rauheiten, Eigenspannungs- und Verfestigungszustände sowie der Phasenzusammensetzung untersucht. Die mit den Feinstbearbeitungsverfahren erzielbare Oberflächenqualität der Formeinsätze ist dabei stark abhängig von den Strukturierungsverfahren sowie der Wahl des Werkstoffes.

Es konnte gezeigt werden, dass die Verfahren Mikrostrahlen und Ultraschallnassstrahlen die Entgratung mikrogefräster Strukturen erlauben. Beim Mikrostrahlen tritt dabei eine Erhöhung der Rauheit im Grund der Strukturen sowie eine Kantenverrundung infolge plastischer Verformung durch Strahlmitteleinschläge auf. Dieses Verfahren kann außerdem zur Entfernung der weißen Schichten am Grund mikroerodierter Oberflächen eingesetzt werden. Zudem werden durch das Mikrostrahlen unabhängig von Ausgangszustand gleichmäßige, rotationssymmetrische Druckeigenspannungszustände erzielt. Beim Ultraschallnassstrahlen hingegen ist die Kantenverrundung geringer. Bei erodierten Proben wurde mit diesem Verfahren keine Ent-

fernung der Randschicht erreicht. Auch hier entstehen Druckeigenspannungen im randnahen Bereich. Nachteil bei diesem Verfahren ist ein Anstieg der Rauheit mit zunehmender Bearbeitungszeit für duktile Werkstoffe infolge direkter Kavitation. Eine weitere Verbesserung dieser beiden Verfahren in Hinblick auf Kantenverrundung und Oberflächenrauheit war somit noch zu untersuchen.

Des Weiteren sollte ein Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung der Formeinsätze entwickelt und untersucht werden. Das Ziel hierbei war eine Entfernung von Graten, wobei der Abtragsbereich lokal beschränkt werden sollte. Vorteil hierbei sind der bevorzugte Abtrag von Profilspitzen, wobei eine minimale Kantenverrundung erzielt und eine Erhöhung der Oberflächenrauheit vermieden werden soll.

5.2.1.1 Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

Formeinsatzmaterialien

Die Untersuchungen wurden an zwei verschiedenen Stählen, Toolox 44 (30 CrMo 6) und Corrax (X5 CrNiMo 12-9-1), sowie am Ultrafeinkornhartmetall TSF 44 (WC-12Co) durchgeführt.

Der Kunststoffformenstahl Toolox 44 (SSAB Oxelösund) lag im vergüteten Lieferzustand (Anlasstemperatur > 590 °C) vor und weist eine Härte von 434 HV 0,1 auf. Der niedriglegierte Stahl ist dabei gekennzeichnet durch einen erhöhten Anteil an Mangan und Silizium.

Weiterhin wurde der korrosionsbeständige Werkzeugstahl Corrax verwendet. Zum Härteten des Werkstoffes, wurde er bei 850 °C 10 min vorgewärmt, bei 990 °C 40 min austenitisiert und anschließend in Öl abgeschreckt. Nach der darauffolgenden zweistündigen Auslagerung bei 525 °C und anschließender Abkühlung auf Raumtemperatur in Öl wird eine Härte von 555 HV 0,1 eingestellt.

Außerdem wurden auch Hartmetall-Strukturen, welche durch Laserablation gefertigt wurden, untersucht. Das verwendete Material TSF 44, das eine Korngröße von 0,4 µm besitzt, wies dabei eine Härte von über 1800 HV auf.

Primärstrukturierung

Die Primärstrukturierung der Formeinsätze, an denen die Feinstbearbeitungsverfahren durchgeführt wurden, erfolgte durch Mikrofräsen, Mikro-Laserablation und Mikrofunkenerosion am Institut für Produktionstechnik (wbk) innerhalb der Teilprojekte B 6 und Z 3. Dabei wurden mikrogefräste Kavitäten der Werkstoffe Toolox 44 sowie Corrax hergestellt. Das Hartmetall wurde durch Laserablation bearbeitet.

Charakterisierungsmethoden

Zur Untersuchung der Oberflächentopographie der bearbeitenden Kavitäten wurde ein konfokales Weißlichtmikroskop der Bauart „Nanofocus µsurf“ verwendet. Aus den erhaltenen Profillinien wurden die Rauheitskenngrößen Rz bzw. Ra berechnet und der Mittelwert bestimmt, wobei eine Filterung der langwelligen Anteile mit einer Grenzwellenlänge von 250 µm erfolgte.

Des Weiteren erfolgten mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops Aufnahmen zur Auswertung der Oberflächenbeschaffenheiten sowie EDX-Messungen zur lokalen Bestimmung von Werkstoffzusammensetzungen. Weitere Phasenanalysen wurden mithilfe röntgenographischer Messungen durchgeführt.

Mikrostrahlen

Das Mikrostrahlen erfolgte durch eine Druckluft-Strahlanlage der Bauart IEPCO Peenmatic 770 mit dem Zusatzmodul Micropeen 200, die von Horsch [9] im Rahmen des SFB 499 mit einer 5-Achs-CNC-Verfahrenseinheit versehen wurde.

Für das Mikrostrahlen wurden sowohl das Strahlmittel MS 550 B, bestehend aus Glasperlen mit Durchmessern zwischen 20 und 30 µm, verwendet als auch das Abrasivstoffgemisch MS 550 A aus Siliziumcarbid, Korund und Glasperlen mit einer Größe von 10 – 20 µm. Des Weiteren wurden Versuche mit Edelkorundstrahlmitteln unterschiedlicher Körnung durchgeführt. Die Durchmesser der hierfür verwendeten Abrasivpartikeln betrugen dabei zwischen 5 – 25 µm, 3 – 19 µm, 2 – 14 µm und 1 – 10 µm. Als Strahldruck wurden 2

bzw. 7 bar gewählt, die übliche Verfahrgeschwindigkeit lag bei 2 mm/s. Die Strahldüse wurde im Strahlwinkel von 90 ° und einem Abstand von 10 mm zum Werkstück angebracht. Für die Bearbeitung wurde eine Strahldüse mit einem Innendurchmesser 1,2 mm verwendet.

Das Mikrostrahlen wurde zur Bearbeitung mikroerodierter Oberflächen und mikrogefräster Kavitäten eingesetzt. Für die mikroerodierten Corrax-Flächen wurde die Änderung der Phasenanteile bis zu einer Tiefe von 1,5 µm vor und nach dem Mikrostrahlen mit dem Abrasivstoffgemisch MS 550 A ermittelt. Abbildung 1 a und b zeigen die Interferenzlinien der Röntgenpeaks vor und nach der Strahlbehandlung. Im Ausgangszustand weisen die Corrax-Proben neben der α -Fe-Phase auch einen Restaustenitanteil auf, der nach dem Mikrostrahlen eine geringere Intensität aufweist. Weiterhin tritt infolge des Strahlens ein geringer Anteil an Siliziumcarbid auf (Abbildung 1). Dieser Peak ist auf die Einlagerung von SiC-Strahlmittelpartikeln aus dem Abrasivstoffgemisch in die Strahlgutoberfläche zurückzuführen.

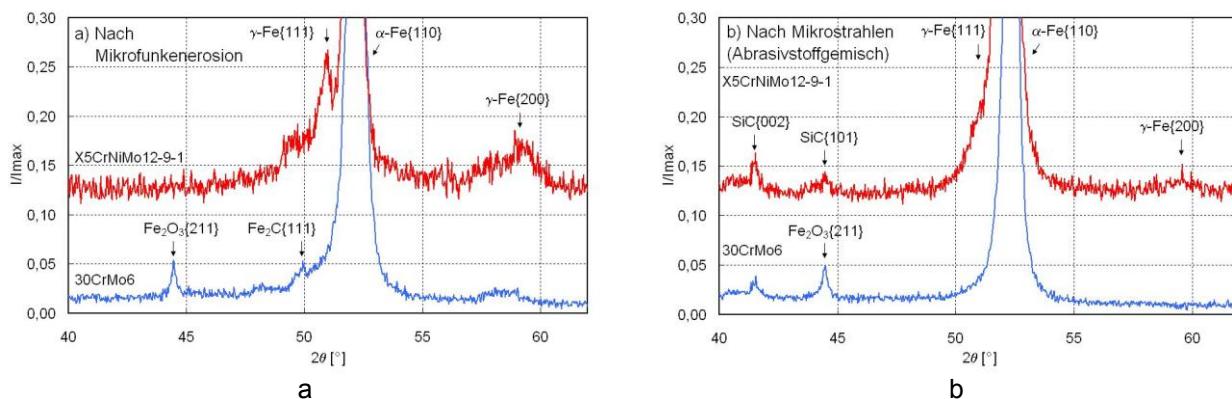


Abbildung 1: Phasenanalyse von Corrax nach Mikrofunkenerosion (a) und nach anschließendem Mikrostrahlen (b)

Der Verlauf der Flächenverhältnisse der γ - und α -Phasen in Abbildung 2 zeigt ebenfalls ein geringeres Verhältnis von Restaustenit zu α -Eisen an der Oberfläche im Vergleich zu tieferen Schichten. Bis zu einer Tiefe von ca. 6 µm nach Mikrostrahlen bei Strahldrücken von 2 und 7 bar werden diese geringeren Restaustenitanteile gefunden. Diese Abnahme ist auf eine verformungsinduzierte Umwandlung des Restaustenits infolge der plastischen Verformung der Oberfläche durch Strahlmitteleinschläge, wie sie auch beim Kugelstrahlen auftreten kann, zurückzuführen.

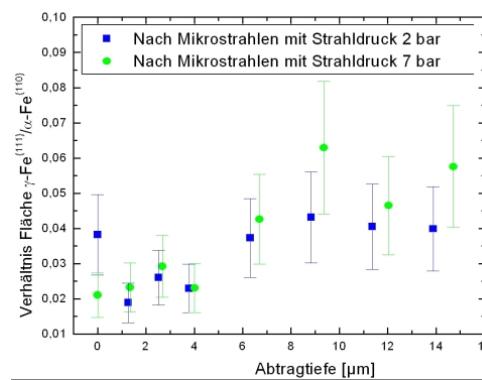


Abbildung 2: Verhältnis der Phasenanteile von γ - zu α -Fe nach Mikrostrahlen mit den Strahldrücken 2 und 7 bar

Um die erzielbaren Oberflächenqualitäten, die Rauheit sowie Kantenverrundungen durch das Entgraten zu verbessern, wurden Versuche an Toolox 44 mit feineren Strahlmittelpartikeln durchgeführt. Dazu wurde Edelkorund-Abrasivstrahlmittel mit verschiedenen Körnungen von 5 - 25 µm, 3 - 19 µm sowie von 2 - 14 µm und 1 - 10 µm eingesetzt. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, können mit den beiden größeren Strahlmitteldurchmessern bei einem Strahldruck von 2 bar die Grate vollständig entfernt werden. Bei der Körnung von 3 - 19 µm sind außerdem noch Spuren der Schleifriefen an der Oberfläche zu erkennen (Abbildung 3 b), die von der Probenpräparation vor dem Mikrostrahlen stammen und mit größerem Strahlmittel komplett entfernt werden. Frässpuren im Grund der Struktur sind nicht mehr vorhanden. Hier trat jedoch bereits gelegentlich

das Problem auf, dass die Strahlintensität während der Bearbeitung nicht konstant war. Bei einer weiteren Verkleinerung des Strahlmitteldurchmessers waren sowohl an der Probenoberfläche als auch während des Strahlens deutliche Schwankungen des Strahlmittelstrahls zu beobachten, dass keine gleichmäßige Strahlintensität mehr erzeugt werden konnte. Daher erweisen sich diese Strahlmittel als nicht geeignet zur Verwendung in der zur Verfügung stehenden Strahlanlage. Da hier lediglich der Strahldruck vorgegeben wird, nicht aber der Massendurchsatz des Strahlmittels geregelt werden kann, traten vermehrt Verstopfungen der Schläuche und der Düse auf. Gegenüber den bisher verwendeten Strahlmitteln wurden mit den Körnungen von 5 - 25 µm und 3 - 19 µm jedoch Oberflächen geringerer Rauheit erzielt. Der erreichbare Rauheitswert hängt dabei vom Ausgangszustand ab. So konnte gegenüber dem Strahlen mit MS 550 A, bei dem die Rauheit der geschliffenen Fläche von $Rz = 1,2 \mu\text{m}$ auf $2,0 \mu\text{m}$ ansteigt, hier die anfängliche Rauheit der vorliegenden Charge von $2,7 \mu\text{m}$ erhalten werden. Um mit sehr feinem Mikrostrahlmittel Oberflächen hoher Qualität bei konstanten Strahlbedingungen zu erzeugen, wäre also eine Erweiterung der Anlage um einen Strahlmitteldurchsatzregelung nötig, die im Rahmen des Teilprojektes nicht erfolgen konnte.

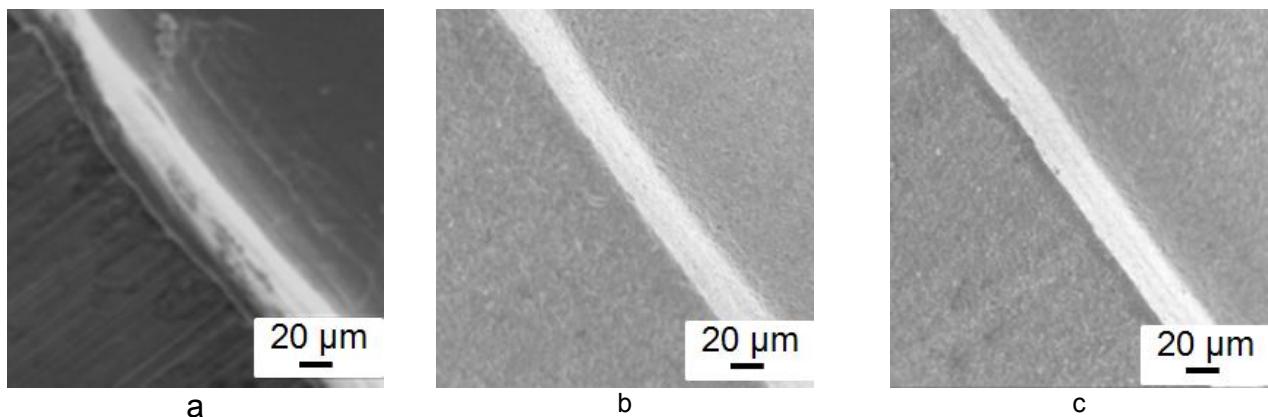


Abbildung 3: Toolox 44-Kante nach Mikrofräsen (a) und nach Entfernung der Grate durch Mikrostrahlen mit Strahlmitteldurchmesser $d = 5 - 25 \mu\text{m}$ (b) und $d = 3 - 19 \mu\text{m}$ (c)

Die im Rahmen des SFB erzielten Ergebnisse zeigen außerdem das hohe Potential des Mikrostrahlens als mechanisches Oberflächenverfestigungsverfahren auf. Die hierbei erzielbaren Druckeigenspannungs- und Verfestigungszustände können wie beim herkömmlichen Verfestigungsstrahlen die Dauerfestigkeit erhöhen. Das Verfahren zeichnet sich hierbei durch die hohen Maxima der Druckeigenspannungsmaxima an den Oberflächen und die geringen Eindringtiefen aus. Einen weiteren Vorteil stellen die im Vergleich zum konventionellen Kugelstrahlen geringeren Oberflächenrauheiten dar, sodass eine Verbesserung der Dauerfestigkeit abgeleitet werden kann. Mögliche Anwendungsgebiete sind hierbei beispielsweise dünne Bauteile, die aufgrund von Verzug und Verformung infolge höherer Strahlintensitäten nicht zur Oberflächenverfestigung durch herkömmliches Kugelstrahlen geeignet sind.

Experimentell konnte bestätigt werden, dass das Mikrostrahlen die Wechselbiegefestigkeit von 42 CrMo 4-Proben gegenüber dem Ausgangszustand von 556 MPa deutlich erhöht auf 966 MPa. Somit ist eine Etablierung des Mikrostrahlens auch außerhalb der Bearbeitung von Mikroformenätsen denkbar, wozu weitere Untersuchungen durchgeführt werden sollten.

Ultraschallnassstrahlen

Das Ultraschallnassstrahlen wurde zur Entgratung mikrogefräster Formeinsätze verschiedener Werkstoffe eingesetzt. Dieses Verfahren beruht auf der Erzeugung von Kavitation, die das in der Flüssigkeit enthaltene Strahlmittel beschleunigt. Durch Platzierung einer Sonotrode über der Strahlgutfläche und deren Anregung wird dabei ein Ultraschallfeld erzeugt, in dem Kavitationsblasen entstehen. Das Ziel ist es dabei, durch die Beschleunigung von Strahlmittelpartikeln auf das Strahlgut in der Flüssigkeit eine Abrasion der Oberfläche zu erhalten, durch die die Grate abgetragen werden. Die Topographie der erzielbaren Oberflächen hängt dabei stark von den Eigenschaften des bearbeiteten Werkstoffes sowie der Suspension ab. Als Strahlmittel wurden Korund-Abrasivpartikel der Größe von $20 - 30 \mu\text{m}$ verwendet, die zu einem Anteil von 5 Ma-% den jeweiligen Strahlflüssigkeiten zugesetzt wurden. Für die Optimierung der Topographie wurden unterschiedliche Flüssigkeiten miteinander verglichen. Dazu wurden die Eignung von destilliertem Wasser, destilliertem und abgekochtem Wasser mit geringerem Gasgehalt sowie gesättigte Natriumchlorid-Lösung, welche eine um 20 % höhere Dichte aufweist untersucht.

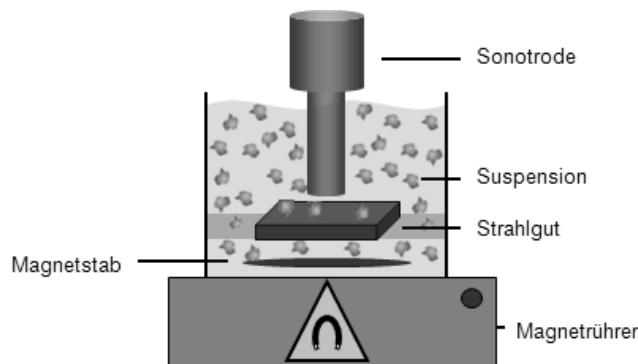


Abbildung 4: Aufbau der Ultraschallnassstrahlanlage

Der Aufbau der Ultraschallnassstrahlanlage nach Kienzler [4] ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Die Anregung der Sonotrode erfolgte über einen Ultraschallprozessor der Bauart Hielscher UIP-500 bei einer Frequenz von 20 kHz mit einer maximalen Leistung von 500 W. Die Sonotrode wurde dabei gepulst betrieben, wobei das Verhältnis von Betrieb zu Ruhezeit 0,8 betrug, um ein Nachfließen der Suspension zu ermöglichen. Die Sonotrode mit einem Stirnflächendurchmesser von 40 mm wurde im Abstand von 1 mm über der Strahlgutoberfläche angebracht. Um eine Erwärmung der Suspension infolge der Anregung zu vermeiden, wurde eine wasserdurchflossene Kühlspirale verwendet, sodass eine konstante Temperatur von ca. 25 °C gewährleistet werden konnte. Um außerdem ein Absetzen der Strahlmittelpartikel zu verhindern, erfolgte eine ständige Durchmischung der Suspension mithilfe eines Magnetrührers.

Bei den verwendeten TSF 44-Proben konnte keine Wirkung des Strahlenverfahrens auf die Probenoberfläche nachgewiesen werden. Infolge der geringen Energie der auftreffenden Strahlmittelteilchen bei gleichzeitig sehr hoher Härte des Strahlgutes blieben eine plastische Verformung oder abrasive Angriffe aus, so dass sich dieses Verfahren als nicht geeignet für die Bearbeitung des Hartmetalls erwies und die weiteren Untersuchungen daher auf die Werkstoffe Toolox 44 und Corrax beschränkt wurden.

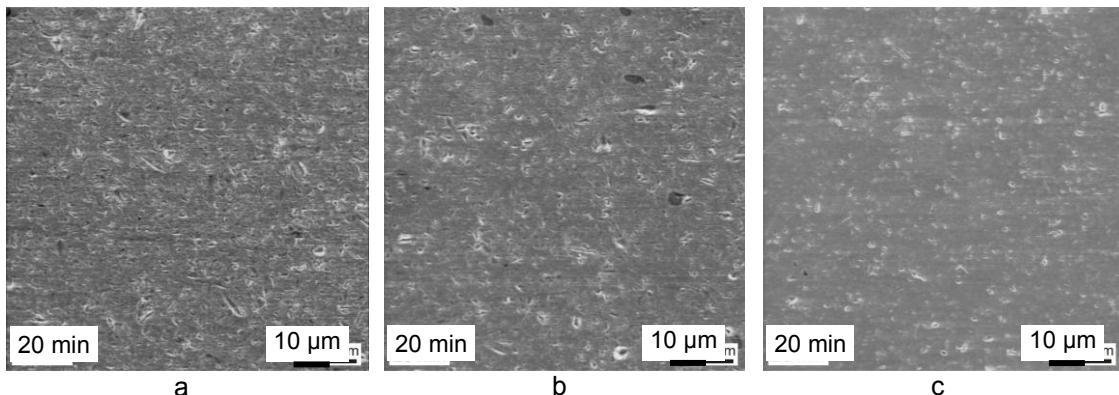


Abbildung 5: Ultraschallnassgestrahlte Corrax-Flächen nach 20 min Bearbeitungszeit in destilliertem Wasser (a), abgekochtem Wasser (b) und NaCl-Lösung (c)

Zunächst wurden die Effekte auf die Topographie von Flachproben untersucht, um den Einfluss der Strahlmedien auf die Rauheit zu ermitteln.

Die polierten Corrax-Flachproben zeigen nach dem Ultraschallnassstrahlen in den untersuchten Suspensionen einheitliche Topographien auf (Abbildung 5). Die Oberflächen sind von kantigen Kratern geprägt, deren typische Größe 2 μm oder kleiner ist und deren Tiefen gegenüber der Ausgangsrauheit vernachlässigbar sind (Abbildung 6 a). Für alle drei Flüssigkeiten werden ähnliche Topographien gefunden, die sich nur leicht in der Dichte und den Abmessungen der Krater unterscheiden.



Abbildung 6: Einschlagskrater (a) infolge von durch Kavitation beschleunigten Strahlmittelpartikeln(b)

Diese Krater entstehen durch plastische Verformungen der Oberfläche infolge der Einschläge von Strahlmittelpartikeln, welche durch kollabierende Kavitationsblasen beschleunigt werden (Abbildung 6 b). Zurückzuführen ist dieser Effekt auf die Keimwirkung der Partikelloberflächen. Es bilden sich bevorzugt Kavitationsblasen an den Strahlmittelteilchen, sodass diese durch bei der Blasenimplosion in gleichmäßig verteilten Winkeln auf die Strahlgutfläche auftreffen. Dadurch ergeben sich gleichmäßig verteilte Krater auf der gesamten Oberfläche.

Die ursprüngliche Rauheit von $Ra = 0,02 \mu\text{m}$ der Oberflächen nimmt dabei nicht zu, sondern bleibt infolge der geringen Tiefe der Einschläge auch bei zunehmender Bearbeitungszeit nahezu konstant (Abbildung 7 a).

Neben der Rauheit der Flächen wurde die Eignung des Ultraschallnassstrahlens zur Entgratung mikrogefräster Formeinsätze untersucht. Die zeitliche Entwicklung der Grathöhen unterscheidet sich für die unterschiedlichen Flüssigkeiten (Abbildung 7 b).

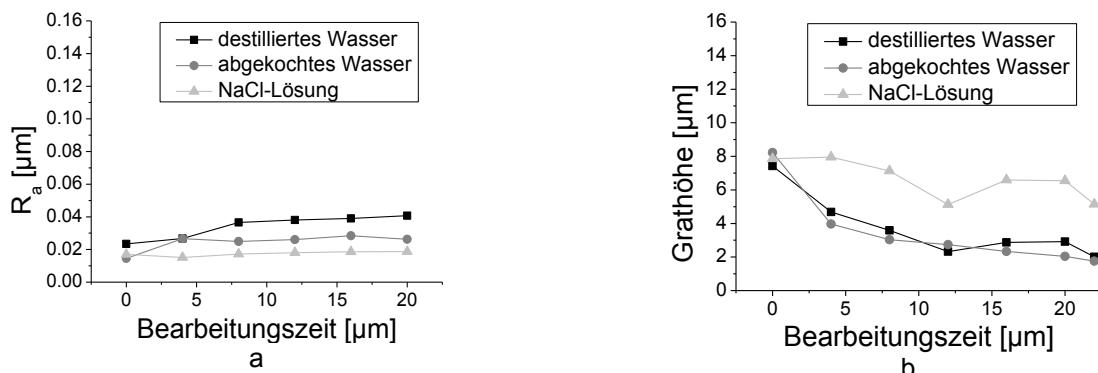


Abbildung 7: Verlauf von Rauheit (a) und Grathöhe (b) beim Ultraschallnassstrahlen von Corrax in unterschiedlichen Strahlmedien

Eine Reduzierung der Grate konnte dabei in allen drei Strahlmedien erzielt werden. In Natriumchloridlösung erfolgt der Abtrag der Grate langsamer, da infolge der höheren Dichte die kinetischen Energie der Strahlmittelteilchen beim Einschlag geringer ist (Abbildung 7 b). In destilliertem Wasser sowie abgekochtem Wasser hingegen können die Grate innerhalb einer Bearbeitungszeit von 20 min abgetragen werden, wie in Abbildung 8 zu sehen ist. Außerdem ist zu erkennen, dass diese Bearbeitung infolge der gleichmäßigen Einschlagswinkel auch die Bearbeitung der Wände der Kavitäten erlaubt und die Frässpuren reduziert werden können.

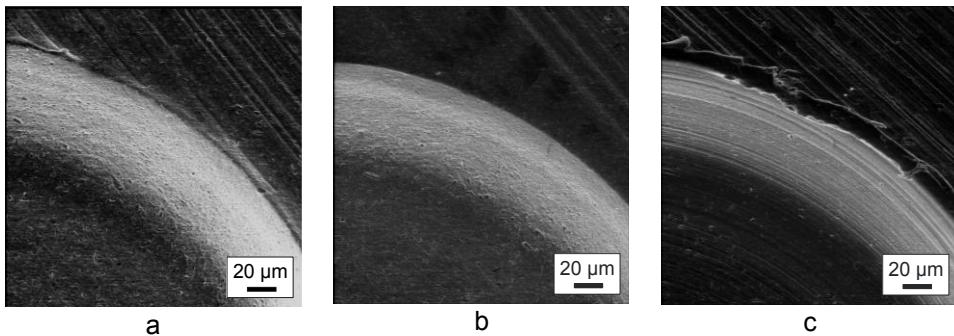


Abbildung 8: Corrax: Grat nach einer Bearbeitungszeit von 20 min in destilliertem Wasser (a), abgekochtem Wasser (b) und NaCl-Lösung (c)

Für Toolox 44 hingegen die zeigen die Flächen neben den gleichmäßigen Einschlagskratern, die in allen Flüssigkeiten auftreten, runde Formen, welche in Wasser auftreten (Abbildung 9). Die Tiefe und Anzahl dieser Grübchen nimmt mit der Bearbeitungszeit zu, sodass sich eine Erhöhung der Rauheit von $0,02 \mu\text{m}$ auf $0,16 \mu\text{m}$ für destilliertes Wasser ergibt (Abbildung 11 a). Diese Erosion ist eine Folge der Implosion von Kavitationsblasen direkt an der Oberfläche (Abbildung 10 b). Da Topographiespitzen Keime für die Bildung der Blasen darstellen, bilden diese Grübchen sich bevorzugt an bereits vorhandenen Grübchen, was den Anstieg der Tiefe erklärt.

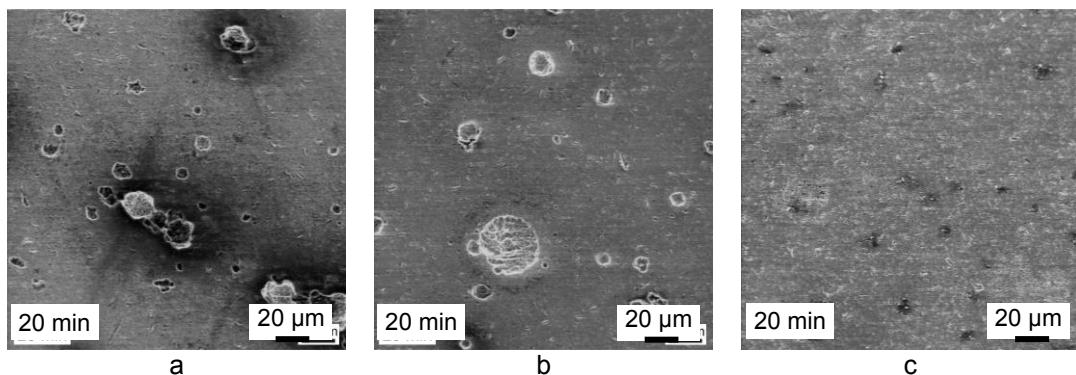


Abbildung 9: Oberflächentopographie von Toolox 44 nach 20 min USNS in destilliertem Wasser (a), abgekochtem Wasser (b) und NaCl-Lösung (c)

Durch das Abkochen und das Absenken des Gasgehaltes kann die Anzahl der Grübchen infolge einer geringeren Gasbläschenanzahl verringert und somit der Rauheitsanstieg verlangsamt werden, das Auftreten von Grübchen jedoch nicht vermieden werden (Abbildung 9 b). Im Fall der NaCl-Lösung hingegen treten keine Kavitationsgrübchen auf und die Rauheit bleibt nahezu konstant, sodass in diesem Fall eine hohe Oberflächenqualität infolge der höheren Dichte erzielt werden kann.

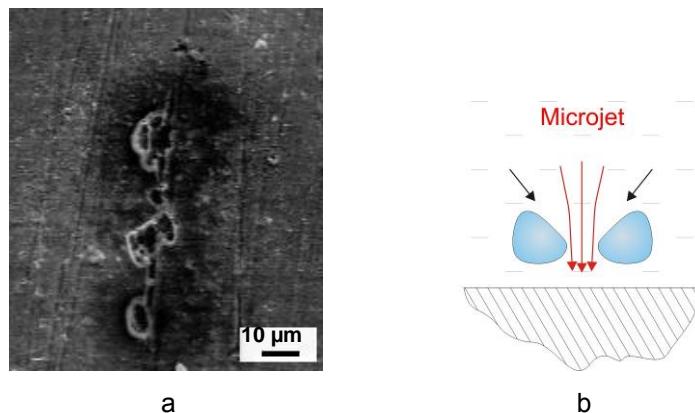


Abbildung 10: Bildung von Grübchen (a) durch direkten Kavitationsangriff (b)

Auch für Toolox 44 eignet sich das Ultraschallnassstrahlen zum Entgraten mikrogefräster Strukturen (Abbildung 11 b). Die Bearbeitungszeit in allen Flüssigkeiten bis zum Entfernen der Grate beträgt dabei ca. 8 min, der Abtrag erfolgt also schneller als beim härteren Corrax. Auch hier wird in destilliertem Wasser ein schnellerer Abtrag erzielt als bei der Natriumchlorid-Lösung.

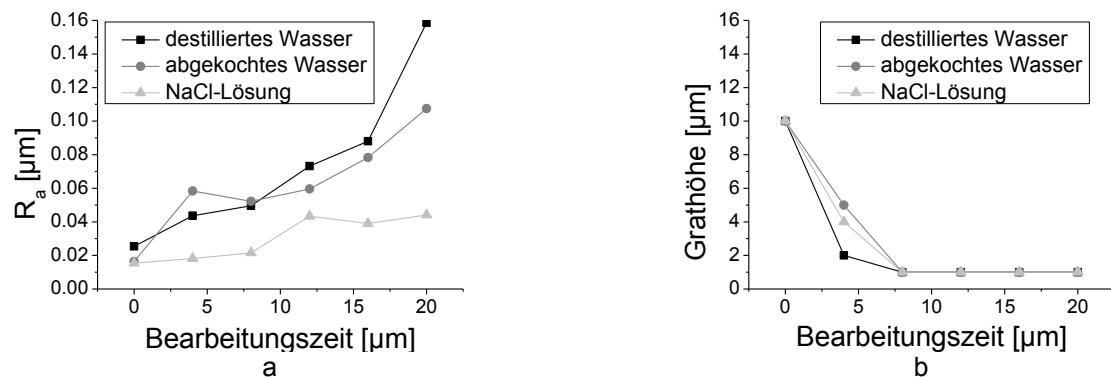


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf von Rauheit (a) und Grathöhe (b) beim Ultraschallnassstrahlen von Toolox 44

Allerdings stellen die bei Verwendung von Wasser unterschiedlichen Gasgehaltes auftretenden Grübchen eine Verschlechterung der Oberfläche dar, sodass bei hohen Ansprüchen an Topographie und Entformungsverhalten das Verwenden von Flüssigkeiten höherer Dichte nötig sein kann.

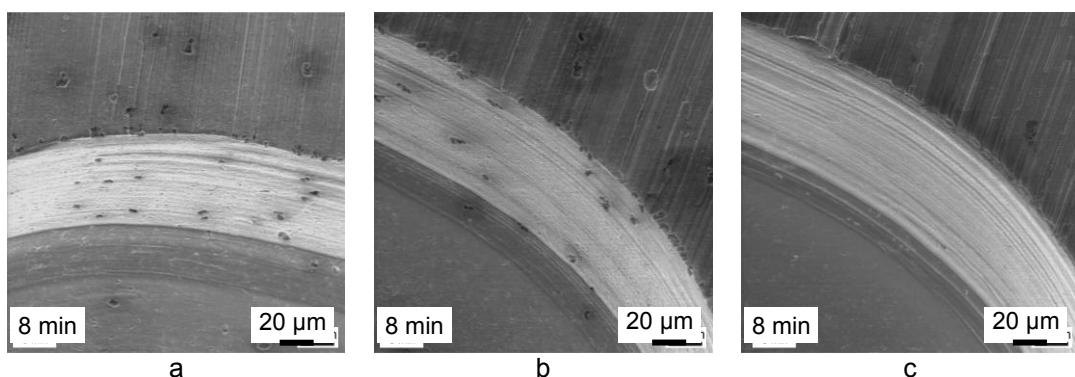


Abbildung 12: Toolox 44: Grat nach einer Bearbeitungszeit von 8 min in destilliertem Wasser (a), abgekochtem Wasser (b) und NaCl-Lösung (c)

Für das Ultraschallnassstrahlen konnten somit geeignete Parameter für die Entgratung von Formeinsätzen bei hoher Oberflächenqualität ermittelt werden. Es erweisen sich Suspensionen aus destilliertes Wasser für die Bearbeitung von Corrax-Strukturen und Natriumchlorid-Lösung zur Bearbeitung von Toolox 44-Kavitäten

als geeignete Strahlmedien zur Entfernung der Grate mikrogefräster Kavitäten. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der minimalen Kantenverrundung und einer bei geeigneter Wahl der Parameter gleichbleibenden Oberflächenrauheit.

Auch Ichida [1] findet bei seinen Untersuchungen die beiden Arten von Kavitationsangriffen und stellt einen Einfluss der Suspensionseigenschaften fest. Er erzielt eine sehr niedrige Rauheit bei Kratertiefen von 3 – 6 nm, wobei hier kein Abtrag von Fräsraten, hier angestrebt, mehr zu erwarten ist.

Elektrochemisches Abtragen

Für die elektrochemische Bearbeitung von Mikroformenätsen wurde in der letzten Förderperiode des SFB 499 eine Anlage zum lokal begrenzten Abtrag der Strukturen aufgebaut. Das Verfahren basiert dabei auf der Verwendung von Hartmetallkathoden geringen Durchmessers, durch die der Elektrolyt hindurch auf die Werkstückoberfläche strömt. Die bearbeitete Fläche wird dabei auf den Bereich der Kathode bzw. des Elektrolytstrahls begrenzt, innerhalb dessen ein Stromfluss infolge der angelegten Spannung zwischen Werkstück und Kathode entstehen kann. Für die Bearbeitung unterschiedlicher Strukturen unabhängig von ihrer Geometrie wurde eine Hexapod-Verfahrenseinheit zur Bewegung der daran befestigten Kathode entlang der zu bearbeitenden Bereiche eingerichtet (Abbildung 13). Der Elektrolytstrahl wird dafür aus einem Druckluftbeaufschlagten Behälter über einen Schlauch durch die Röhrchenkathode geführt.

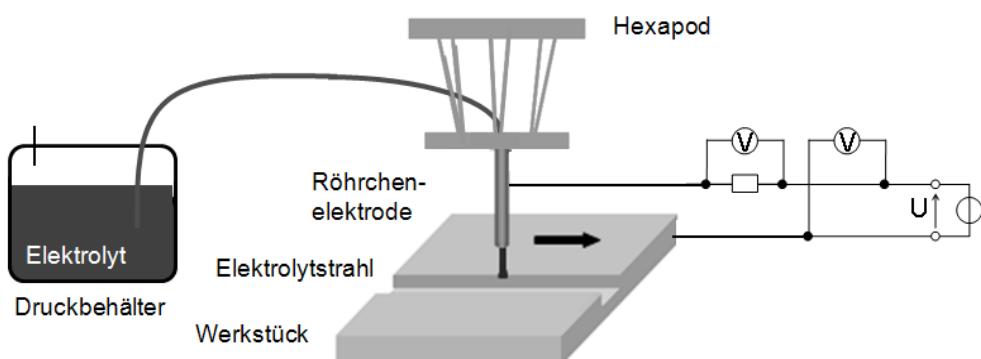


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Aufbaus zum elektrochemischen Abtragen

Die Bewegung des Hexapoden erfolgt dabei über die Software LabView. Die grobe Positionierung der Kathode über dem Werkstück und die Beobachtung des Prozesses erfolgt mithilfe einer an den Hexapod angebrachten Kamera. Die Feinjustierung der Kathode erfolgt durch ein Antasten an die Oberfläche des Werkstücks und an die Kanten der zu bearbeitenden Strukturen im trockenen Zustand bis zum elektrischen Kontakt und das anschließende Einstellen des gewünschten Arbeitsabstandes zwischen Werkstück und Kathode.

Als Kathode wurden Röhrchenkathoden aus Hartmetall mit einem Innendurchmesser von 0,18 mm ausgewählt. Die Kathode und das Werkstück werden über die Halterungen kontaktiert. Der Druck im Elektrolytbehälter betrug 5 bar.

Die Prozessparameter, die variiert wurden, sind dabei die Verfahrgeschwindigkeit, der Arbeitsabstand zwischen Elektrode und Werkstück sowie die angelegte Spannungsart. Weiterhin wurden zwei verschiedene Elektrolyte verwendet. Der Volumenstrom wurde dabei nicht verändert.

Das Verfahren wurde auf laserablatierte TSF 44-Proben und mikrogefräste Corrax-Proben angewandt. Als Elektrolyte wurden AE 35 der Firma Schilling, eine wässrige Lösung von Ammoniumnitrat, Zitronensäure und Isopropanol (jeweils < 10 %), sowie ein Polierelektrolyt für rostfreien Stahl der Firma Graul aus Phosphor- und Schwefelsäure (< 50 %) verwendet.

Die durch Laserablation hergestellten Proben weisen an der Kante Schmelzsichtablagerungen einer Höhe von 1,7 µm auf. Die Rauheit im Grund der Struktur beträgt $Rz = 0,4 \mu\text{m}$. Am Rand der Struktur sind Vertiefungen zu erkennen (vgl. auch Abbildung 14 oben).

Unter Verwendung des Elektrolytes AE 35 können die Schmelzsichtablagerungen entfernt werden, wie in Abbildung 14 a zu sehen ist. Die Form der Kante erfährt dabei keine Änderung. Auch im Grund der Struktur erfolgt ein Abtrag der Schicht (vgl. Abbildung 14 b), sodass hier die Rauheit von $Rz = 0,4 \mu\text{m}$ auf $0,3 \mu\text{m}$ verringert werden kann. Aufgrund geringer Abtragsraten eignet sich das Verfahren jedoch nicht dazu, die Vertiefungen an den Wänden der Strukturen auszugleichen (Abbildung 14 c).

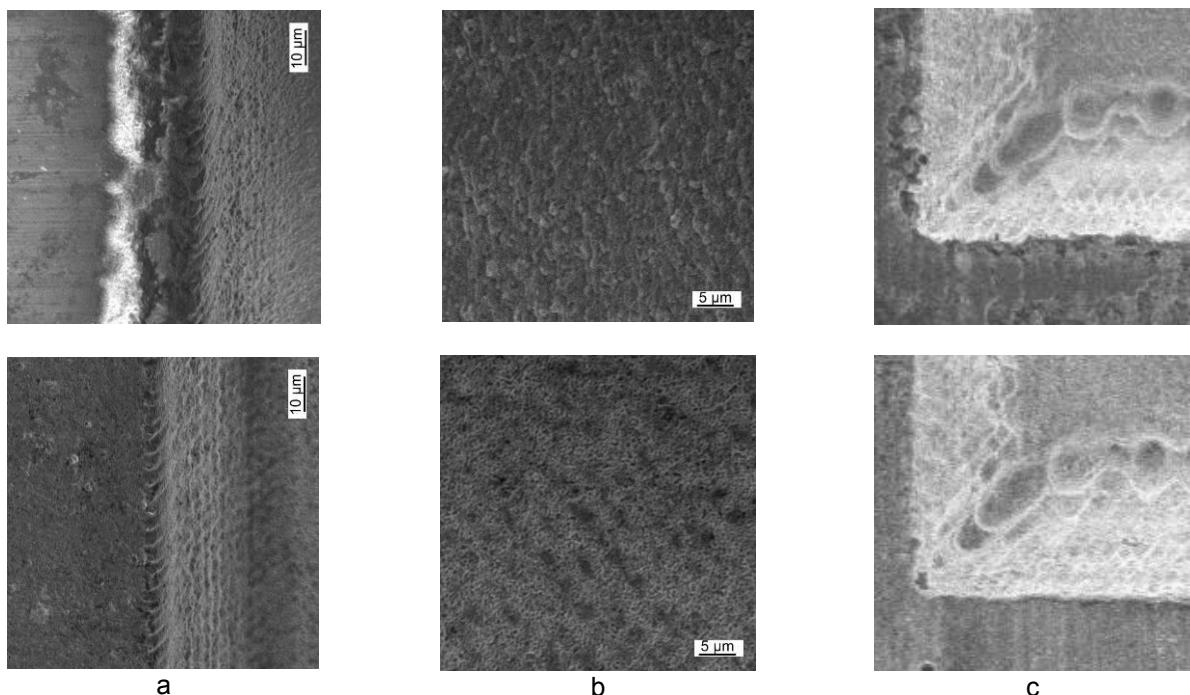


Abbildung 14: TSF-Laserstruktur vor (oben) und nach (unten) elektrochemischer Bearbeitung: Entfernung von Schmelzablagerungen (a), Verbesserung der Rauheit im Grund (b), keine Änderung der Vertiefungen am Rand (c)

Die erzielte Oberflächenbeschaffenheit ist dabei stark vom verwendeten Elektrolyt bzw. Werkstoff abhängig. Während für TSF 44 mit dem Elektrolyt 35 AE gleichmäßige Oberflächen erzeugt wurden, trat beim Entgraten der mikrogefrästen Corrax-Strukturen eine poröse Oberflächenstruktur auf (Abbildung 15). Bei der Bearbeitung der mikrogefrästen Strukturen findet beim Abtrag der Grate eine starke Kantenverrundung statt. Die Oberfläche weist außerdem eine löchrige Struktur auf, sodass die Rauheit erhöht wird. Röntgenographische Phasenanalysen zeigten keinen Unterschied der Phasenzusammensetzung vor und nach der Bearbeitung auf. In beiden Fällen konnten lediglich Phasenreflexe von α - sowie einen geringen Anteil an γ -Eisen nachgewiesen werden, es bildet sich keine Oxidschicht an der Oberfläche aus.

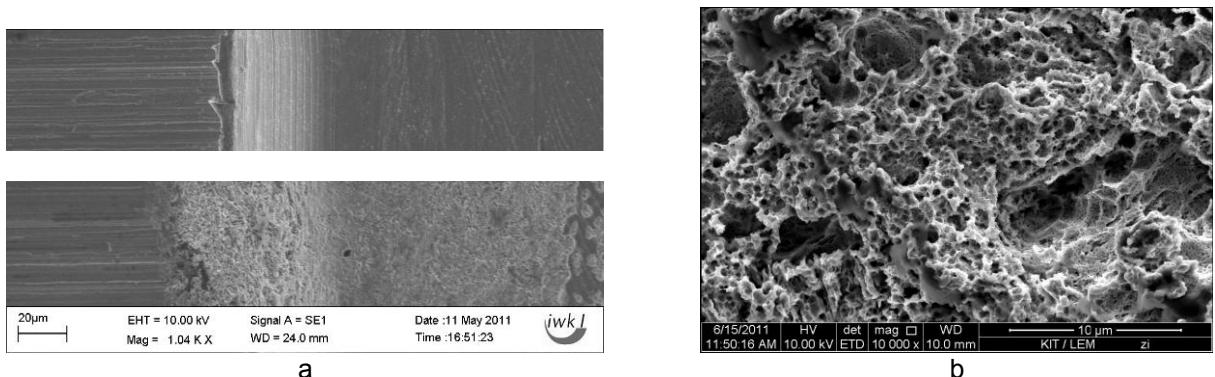


Abbildung 15: Oberflächentopographie von Corrax nach Mikrofräsen (a, oben) und nach elektrochemischem Abtragen im Elektrolyt AE 35 (a, unten, b)

Das Elektrolyt Graul erweist sich in Hinblick auf Oberflächen- und Abtragseigenschaften als besser geeignet. Wie die Höhenprofile in Abbildung 16 zeigen, können die Fräsgenauigkeit der Höhe von bis zu 10 μm an der Kante der Struktur vollständig entfernt werden. Eine Verrundung der Kante ist dabei nicht zu erkennen, ebenso tritt keine Änderung der Strukturtiefe auf.

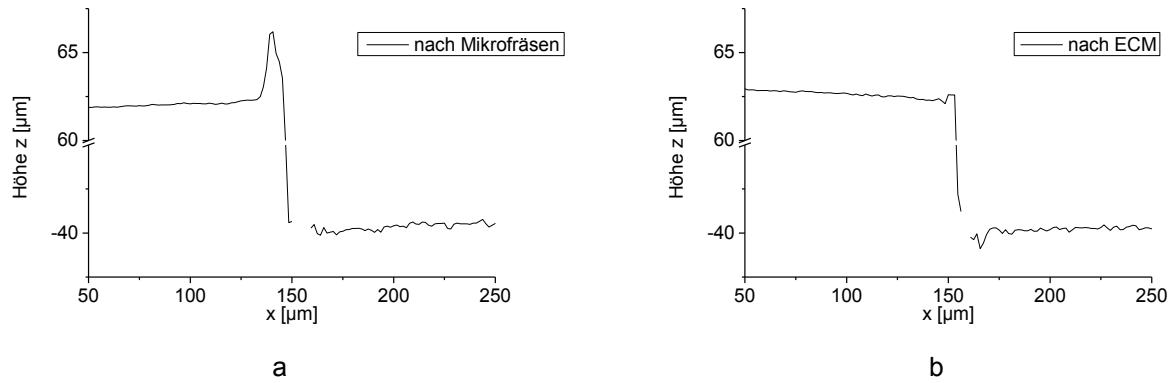


Abbildung 16: Grathöhe einer Corrax-Probe nach Mikrofräsen (a) und Kante nach der Gratentfernung durch elektrochemisches Abtragen mit dem Elektrolyt Graul (b)

Wie Abbildung 17 zeigt, werden auch im Strukturgrund die Profilspitzen abgetragen, wobei der Abtrag der Fläche insgesamt so gering ist, dass die Frässpuren noch erkennbar sind. Somit kann eine Reduzierung der Rauheit von $R_a = 0,16 \mu\text{m}$ auf $0,11 \mu\text{m}$ erreicht werden.

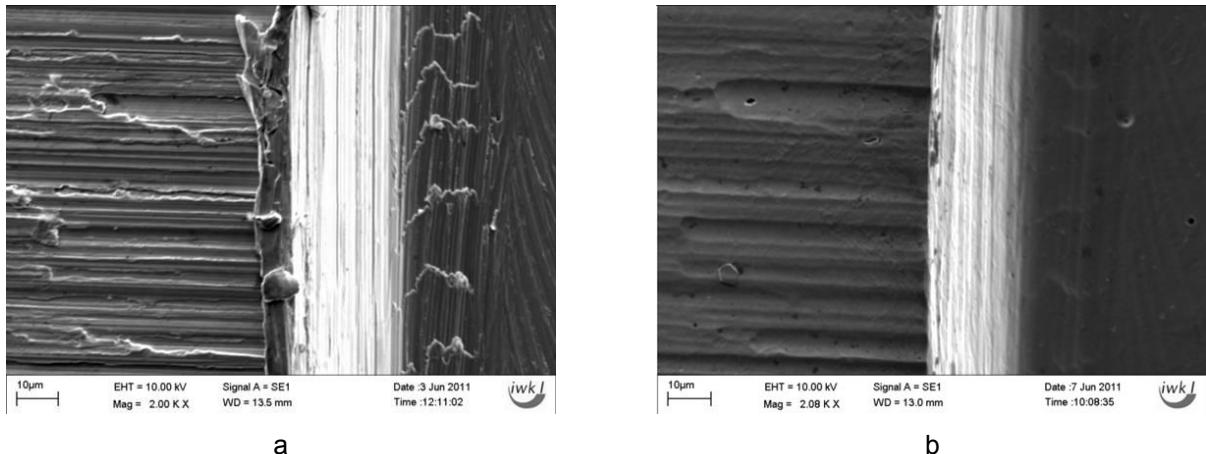


Abbildung 17: Mikrogefräste Corrax-Struktur mit Graten vor (a) und nach elektrochemischem Abtragen im Elektrolyt Graul zur Entfernung der Grade und Glättung der Profilspitzen (b)

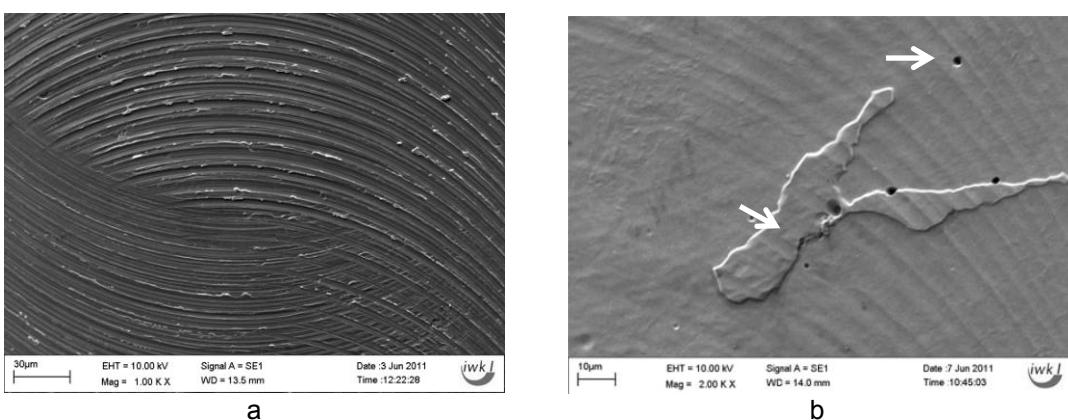


Abbildung 18: Strukturgrund mit Fräsrinnen nach Mikrofräsen (links) und Oberfläche mit Löchern und Plateaus nach ECM (Mitte, rechts)

Vereinzelt treten auf den bearbeiteten Flächen Löcher auf, deren Durchmesser etwa $2 \mu\text{m}$ beträgt. Außerdem sind Plateaus zu erkennen, deren Höhe etwa $1 \mu\text{m}$ beträgt (Abbildung 18 b). EDX-Messungen zeigen, dass die gleichen Elemente vorliegen wie im Grundmaterial, wobei der Nickelgehalt geringer und der Chromanteil im Vergleich zum Eisenanteil leicht höher ist (Abbildung 19 b). Diese Plateaus weisen ebenfalls kleine Löcher auf, deren Durchmesser etwa $0,05 \mu\text{m}$ beträgt (Abbildung 19 a). Eine mögliche Ursache für die Bil-

dung dieser Löcher könnte das schnellere Herauslösen von Nickel-Ausscheidungen infolge der höheren Elektronegativität sein.

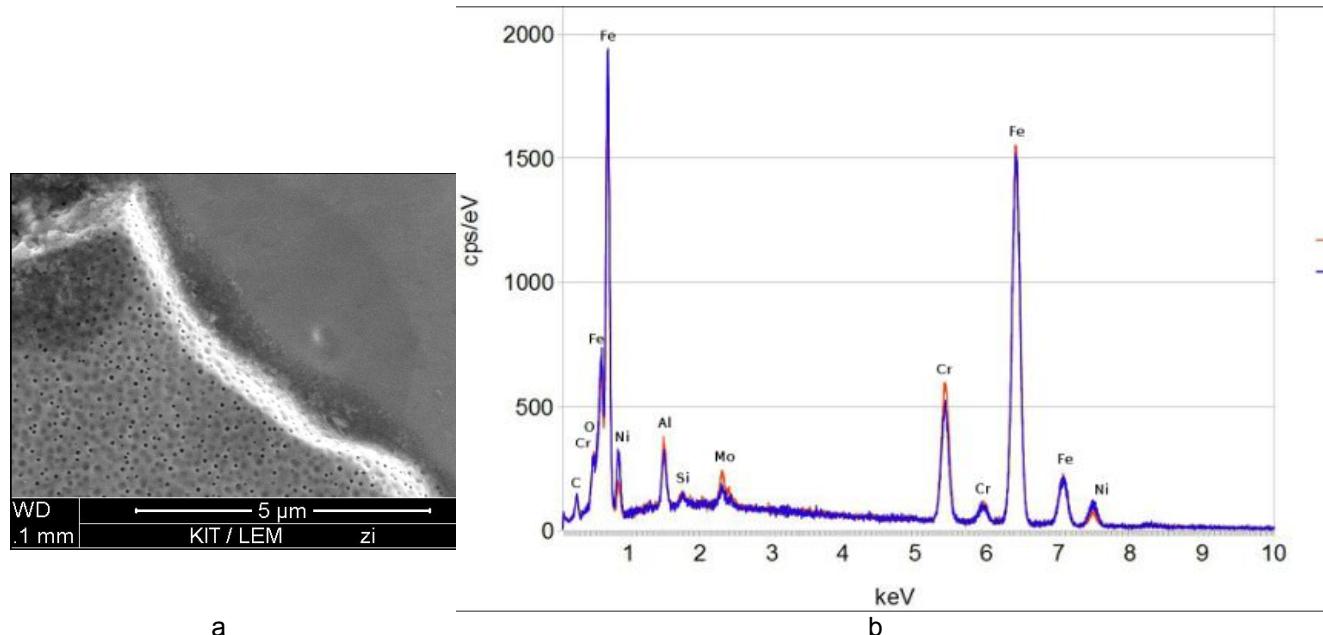


Abbildung 19: Plateau nach ECM (a) und Phasenanalyse (b)

Ein Nachteil des Verfahrens liegt dabei in der hohen Abhängigkeit der erzielten Oberflächenqualität von den Prozessparametern bzw. dem verwendeten Elektrolyten und den chemischen Eigenschaften des Werkstoffes. So kann das Verfahren nicht ohne weiteres auf andere Werkstoffe angewandt werden, da die Eignung des Elektrolyten überprüft werden und die Bearbeitungsparameter angepasst werden müssen. Der Vorteil liegt in geringen Kantenverrundungen sowie in der Reduzierung der Rauheit, die bei mechanischen Nachbearbeitungsverfahren wie dem Mikrostrahlen sogar ansteigen kann.

Beim Elektropolieren von Corrax-Strukturen stellt Gietzelt [2, 3] fest, dass Grate entfernt werden können, Fräsrinnen jedoch nur leicht eingeebnet werden können. Er stellt außerdem eine Kantenverrundung fest, die bei langen Bearbeitungszeiten zunimmt, die im Rahmen des Teilprojektes minimiert werden konnte. Auch er stellt fest, dass ungleichmäßige Werkstoffzustände wie grobe Ausscheidungen oder passivierende Bestandteile sich negativ auf die Ergebnisse auswirken.

Allgemein liegt die Schwierigkeit bei diesem Verfahren in der fehlenden Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Prozessgrößen, Elektrolyt- und Werkstoffeigenschaften und der erzielbaren Abtragsresultate.

In dem Teilprojekt wurden somit verschiedene Nachbearbeitungsverfahren zur Optimierung unterschiedlich hergestellter Formeinsätze erarbeitet. Die Vor- und Nachteile sowie die bevorzugten Anwendungen, die sich dabei ergeben, sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Feinstbearbeitungsverfahren

	Vorteile	Nachteile	Anwendung
Mikrostrahlen	<ul style="list-style-type: none"> - Abtrag thermisch-bedingter Randschichten möglich durch hohe Abtragsraten - Kurze Bearbeitungszeiten - Konstante Rauheit bei feinem Strahlmittel erzielbar - Erzeugung von Druckeigenspannungen, unabhängig von vorherigem Zustand 	<ul style="list-style-type: none"> - Kantenverrundungen bei weichen Werkstoffzuständen - Schwankende Strahlmitteltensitäten bei Einsatz von feinem Strahlmittel - Anstieg der Rauheit bei üblichen Strahlmitteldurchmessern 	<ul style="list-style-type: none"> - Grundsätzlich für alle untersuchten Werkstoffzustände und Fertigungsverfahren; - Geeignet zum Entgraten und Entfernen von thermisch bedingten Randschichten
Ultraschall-nassstrahlen	<ul style="list-style-type: none"> - Vollständige Entfernung der Fräsgrate möglich - Bearbeitung aller Flächen infolge nicht gerichteter Strahlmitteleinschläge - Konstante Rauheit bei Wahl geeigneter Parameter möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Bearbeitungszeiten, zunehmend mit Härte des Werkstoffes - Keine Anwendbarkeit auf Werkstoffe hoher Härte 	<ul style="list-style-type: none"> - Für nicht zu harte Werkstoffzustände zur Entgratung gefräster Mikrostrukturen
Elektrochemisches Abtragen	<ul style="list-style-type: none"> - Anwendbarkeit auch bei elektrisch leitenden Werkstoffzuständen hoher Härte - Prozesskraftfreie Bearbeitung - Reduzierung der Oberflächenrauheit durch Abtrag der Profilspitzen - Bevorzugter Abtrag der Fräsgrate ohne Kantenverrundung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Ungleichmäßiger Abtrag verschiedener Werkstoffbereiche - Kantenverrundung und hohe Rauheit der Oberflächen bei nicht geeigneten Prozessparametern 	<ul style="list-style-type: none"> - Besonders zur Entgratung gefräster Mikrostrukturen bei beliebig harten, nicht korrosiven Werkstoffen

Die im Rahmen des Teilprojektes verwendeten Teststrukturen und Formeinsätze wurden von den Teilprojekten B6, B4 und Z3 hergestellt. Diese wiederum erhielten die zu strukturierenden Werkstoffzustände vom Teilprojekt B5. Weiterhin wurden Proben zur Eigenspannungsanalyse durch Mikrostrahlen für das Teilprojekt D1 bearbeitet sowie Mikrotribologie-Proben für Verschleiß-Untersuchungen an das Teilprojekt D3 mikrogestrahlt.

Herausforderungen bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Beim Mikrostrahlen mit sehr feinen Strahlmittelpartikeln konnte ab Strahlmitteldurchmessern von etwa 20 µm mit der zur Verfügung stehenden Anlage kein konstanter Strahlmittelstrom erreicht werden. Um daraus resultierende Intensitätsschwankungen zu vermeiden, wäre eine umfangreiche Erweiterung der Anlage nötig, die im Rahmen des SFB nicht möglich gewesen wäre. Somit konnten keine weiteren Untersuchungen auf diesem Gebiet zur weiteren Verbesserung der Oberflächenrauheit durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Ichida, Y.; Sato, R.; Morimoto, Y. und Kobayashi, K.: Material removal mechanisms in non-contact ultrasonic abrasive machining, Wear, 258(1-4):107 – 114, 2005, Second International Conference on Erosive and Abrasive Wear.
- [2] Gietzelt, Th.; Eichhorn, L. und Schubert, K.: Material and Micromachining Aspects of Manufacturing Micromolds for Replication Techniques, Advanced Engineering Materials, 2006 (8), S. 33 - 34.

- [3] Gietzelt, Th.: Einsatz des Elektropolierens in der Mikrosystemtechnik, *Galvanotechnik* 1/2008, S. 204 – 211.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

- [4] Kienzler, A.: Auswirkungen mechanischer Oberflächenbehandlungen auf die Randschicht mikrostrukturierter Formeinsätze, 2011.
- [5] Schneider, J.; Zum Gahr, K.-H.; Kienzler, A. und Schulze, V.: Influence of surface condition on wear and demoulding behaviour of mould inserts for micro powder injection moulding, *Friction, Wear and Wear Protection*, S. 629 – 636, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [6] Kienzler, A.; Schulze, V. und Löhe, D.: Surface conditioning by ultrasonic wet peening: Proc. of the ICSP10 (2008), 15.-18.9.2008, Tokio.
- [7] Weingaertner, R.; Kienzler, A.; Hoffmeister, J. und Schulze, V.: Effects of fluid condition and material on surface damage in ultrasonic wet peening, *Shot Peening 2011 Conference Proceedings*, 12. - 15.09.2011, South Bend.
- [8] Horsch, C.; Schulze, V. und Löhe, D.; Deburring and surface conditioning of micro milled structures by micro peening and ultrasonic wet peening; *Microsystem Techn.* 12 (2006), S. 691 – 696.
- [9] Horsch, C.: Optimierung gefräster Mikrostrukturen aus Stahl durch Analyse der Einflußgrößen auf die Randschichtausbildung durch Feinstbearbeitung mit Strahlverfahren; Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Schriftenreihe Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik 38 (2007); Shaker Verlag, ISBN 3-8322-6731-5.
- [10] Kienzler, A.; Okolo, B.; Schulze, V.; Wanner, A. und Löhe, D.: A reliable tool for the improvement of micro powder injection moulds made of steel; *Advanced Engineering Materials* (2008), 10/7, S. 661 – 665.
- [11] Kienzler, A.; Horsch, C.; Schulze, V. und Löhe, D.: Application of micro peening for deburring and surface conditioning of micro moulds; Proc. 7th Euspen International Conference, 20. – 24.05.2007, Bremen, Vol. II, S. 372 – 375.

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit 01.01.2003 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung						
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	1	Hermeneit, A.		IAM-WK	39,5	
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	2	Kienzler, A., Dipl.-Phys.	Werkstoffkunde	IAM-WK	39,5	E 13 Ü
	3	Weingärtner, R., Dipl.-Phys.	Werkstoffkunde	IAM-WK	39,5	E 13
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	4	N. N.		IAM-WK		SH

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

1 Arndt Hermeneit (technischer Angestellter, E9)

Der technische Angestellte unterstützte den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei mechanischen und elektronischen Arbeiten beim Aufbau der Feinstbearbeitungsverfahren, insbesondere der Anlage zur elektro-chemischen Bearbeitung. Er war beteiligt an der Konstruktion und Fertigung der dafür benötigten Vorrichtungen der Anlage sowie der Einrichtung der Messsysteme. Auch die Programmierung der Steuerungssoftware zählte zu seinen Aufgaben. Weiterhin führte er die Wärmebehandlungen der verwendeten Werkstoffe durch und war an der Fertigung der Proben beteiligt.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

2 Dipl.-Phys. Andreas Kienzler (wissenschaftlicher Angestellter, E 13Ü, 01/2009 - 06/2010)

3 Dipl.-Phys. Regina Weingärtner (wissenschaftliche Angestellte, E 13, 07/2010 - 12/2011)

Der wissenschaftliche Mitarbeiter war für die Planung und Durchführung des Forschungsvorhabens zuständig. Dazu gehörte die Auswertung der Versuche sowie Untersuchungen zu den erzielbaren Eigenschaften der im Rahmen des Teilprojektes nachbearbeiteten Formeinsätze. Er war für die Beschaffung der eingesetzten Materialien, Werkstoffe und Teststrukturen zuständig. Des Weiteren koordinierte er die Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten des SFBs und war für Veröffentlichungen und Präsentation der erzielten Ergebnisse auf Konferenzen verantwortlich.

4 Cand. Mach. (studentische Hilfskraft)

Die studentischen Hilfskräfte unterstützten den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung verschiedener Versuche. Sie arbeiteten mit an der Präparation der Proben sowie an Untersuchungen zur Charakterisierung der Probentopographie und Formvermessungen. Außerdem waren sie an metallographischen Untersuchungen und der Software-Programmierung des Versuchsaufbaus beteiligt.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt B6

5.1.1 Titel

Mikrolaserstrukturierung – Kombination von Laserablation und Funkenerosion zur Herstellung dreidimensionaler mikrostrukturierter Formeinsätze

Micro Laser Ablation – Combination of Laser Ablation and EDM (Electric Discharge Machining) for the Manufacturing of three-dimensional Micro Molds

5.1.2 Projektleitung

Schulze, Volker, Prof. Dr.-Ing. habil., geb. 20.04.1965, deutsch

Institut für Produktionstechnik (wbk)

Karlsruher Institut für Technologie

Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-42440

Telefax: 0721 / 608-45004

E-Mail: Volker.Schulze@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

5.2.1.1 Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Die Mikrolaserstrukturierung bietet auf Grund der feinen Strahlfokussierung auf Durchmesser von bis zu 5 µm ein hohes Potenzial zur Miniaturisierung und ermöglicht eine kontaktlose Mikrostrukturierung von einer Vielzahl von sehr harten und verschleißbeständigen Werkstoffen (Stähle, Hartmetalle und Keramiken). Angestrebt wird eine prozesssichere und wirtschaftliche Herstellung von dreidimensionalen Geometrien mit Strukturdetails in der Größenordnung 10 µm in verschleißfesten Werkstoffen. Die Mikrobearbeitung mit Lasern ist jedoch im Vergleich zur EDM Bearbeitung sehr langsam. Die Anwendung und Kombination der Verfahren Erodieren und Laserstrukturieren ist insbesondere bei der wirtschaftlichen Bearbeitung hochfester Werkstoffe (Härtegrade > 60 HRC) sinnvoll, da beide Technologien gemeinsam Materialabträge unabhängig von den mechanischen Werkstückeigenschaften, hohe Abtragraten und ein hohes Maß an Miniaturisierung erlauben. Teilprojekt B6 erarbeitete dabei vorwiegend lasertechnische Fragestellungen und entwickelte zusammen mit den Erkenntnissen aus Teilprojekt B4 (Mikrofunkenerosion) eine erweiterte Abfolgeplanung für die kombinierte Laser-/EDM-Bearbeitung. Die Steigerung der Qualität, Robustheit und Prozesssicherheit bei der Fertigung von Mikrobauteilen durch Laserablation und deren Kombination mit EDM standen dabei im Vordergrund.

Oft treten beim Laserabtragen unerwünschte Löcher in der bearbeiteten Kavität auf, deren Ursache bislang nicht hinreichend geklärt wurde. Diese Löcher sind in ihrem Auftreten und in ihrer Lage nicht reproduzierbar, sondern entstehen scheinbar stochastisch bei gleichbleibenden Parametereinstellungen [3, 4, 5]. Eine wissenschaftliche Untersuchung zum Entstehungsmechanismus von Löchern (Keyholes oder Pits) bei der Laserbearbeitung wurde in bisherigen Arbeiten nicht angegangen. Eine Steigerung der Qualität und der damit einhergehenden Prozesssicherheit bei der Mikrolaserablation stellte die Forderung nach einer sehr präzisen Fokuspositionierung der Strahlöffnung auf der zu bearbeitenden Oberfläche. Der Arbeitsbereich liegt hier bei $z_A = 40 \mu\text{m}$. Gerade bei einem variierenden Materialspektrum oder bei der Ablation tieferer Kavitäten kann sich von Ebene zu Ebene die Oberflächenbeschaffenheit stark unterscheiden. Die Oberflächen sind hell, dunkel, transparent, spiegelnd, glatt oder matt, wodurch die Absorption der Laserstrahlung schwankt. Diese Bedingungen stellen oft eine sehr große Herausforderung oder gar Grenze für derzeitige optische Ansätze zur Laserfokuspositionierung in der benötigten Genauigkeit von $\pm 20 \mu\text{m}$ dar. Eine automatisierte objektive Laserfokuspositionierung auf der Oberfläche des Werkstücks war daher für eine Steigerung der Prozesszuverlässigkeit bei der Fertigung von Mikrobauteilen durch Laserablation zwingend erforderlich. Des Weiteren musste sichergestellt werden, dass die Laserablation immer in den engen Toleranzen des Prozessfensters

liegt, um Schmelzaufwürfe und Defekte in den Strukturen zu vermeiden. Hierfür waren neue Methoden zur Überwachung von signifikanten Prozessparametern, wie der Fokuslage und Laserleistung erforderlich. Eine Senkung der Ablationszeiten ist vom wirtschaftlichen Gesichtspunkt aus erstrebenswert und wurde in der vierten Förderphase angegangen.

5.2.1.2 Ergebnisse

Die genannten Ausgangsfragestellungen und Forschungsdefizite wurden in der vierten Förderphase des SFBs wie folgt angegangen. Bei der wissenschaftlichen Untersuchung zum Entstehungsmechanismus von Löchern bei der Laserbearbeitung wurden zunächst die Löcher näher charakterisiert. Löcher treten im Flächengrund (I), am Rand (II) und in den Ecken (III) von Kavitäten auf (Abbildung 1, links) und sind in ihrem Auftreten und ihrer Lage nicht reproduzierbar. Sie sind stets kreisrund und wurden für verschiedene Lasersysteme sowohl im Scanbetrieb als auch im Achsbetrieb von Laserbearbeitungssystemen mit Fokusdurchmessern von 3 µm bis 30 µm beobachtet [3, 4, 5]. Die Löcher weisen Durchmesser von 3 µm bis 10 µm auf und sind damit zum Teil deutlich kleiner als die Fokusdurchmesser des Laserstrahls. Zur Untersuchung von Form und Tiefe der Löcher wurden hier mit Hilfe eines „Focused Ion Beam“ (FIB)-Systems Querschnitte einzelner Löcher angefertigt. Dafür wurde ein Loch im Flächengrund, am Rand und in der Ecke der Kavität ausgewählt. Die hier betrachteten Löcher unterscheiden sich deutlich in ihrer Tiefe, ihrem Durchmesser und ihrem Tiefenverlauf (Abbildung 1, links unten). Das Vorkommen von Löchern wurde bislang unter anderem bei den Stählen X38CrMoV5-1 (1.2343), 30CrMo6 (Toolox44), X5CrNiMo12-9-1 (Corrax) und 100Cr6, dem Hartmetall WC-12Co (TSF44), einem Halbleitersilizium und einer Titanlegierung (Ti6Al2Sn4Zr2Mo) beobachtet [15].

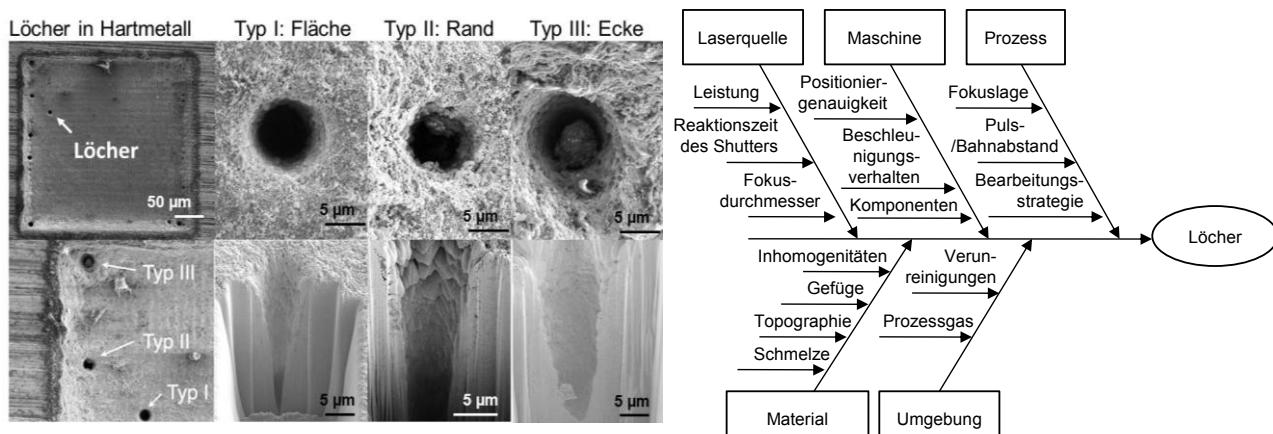


Abbildung 1: REM (Rasterelektronenmikroskop)-Aufnahmen von Löchern in Hartmetall TSF44; laterale Aufnahmen (links oben), FIB (Focused Ion Beam)-Querschnitaufnahmen (links unten); Ursache-Wirkungs-Diagramm zu Entstehungsmechanismen von Löchern (rechts) [15]

Die Einflussanalyse hat ergeben, dass die Einflussfaktoren zur Lochbildung primär aus der Laserquelle, der Maschine, des Prozesses, des Materials und der Umgebung stammen (Abbildung 1, rechts). Primär wird an dieser Stelle der Einfluss des Prozesses, speziell der Fokuslage und des Materials auf die Entstehung von Löchern betrachtet. Damit konnten bereits wichtige Mechanismen identifiziert werden. Der Bearbeitungsprozess wird von signifikanten Prozessparametern wie der Pulsleistung, dem Puls-, dem Bahnabstand, der Fokuslage und der Bearbeitungsstrategie bestimmt [6, 7]. Festgehalten werden kann, dass Löcher in Stahl, Hartmetall und Silizium aufgrund zu klein gewählter Puls- und Bahnabstände gehäuft auftreten. Zur Untersuchung des Einflusses der Fokuslage wurden Kavitäten, bestehend aus mehreren Ebenen mit Fokuslagen oberhalb, direkt auf und unterhalb der Werkstückoberflächen abgetragen (Tabelle 1). Die Fokuslage wurde für die Versuchsreihen von Ebene zu Ebene mit konstanten Zustellungsinkrementen nachgeführt. Der Arbeitsbereich im Fokus liegt bei dem hier verwendeten Lasersystem bei $z_A = z_F \pm 20 \mu\text{m}$. Die Versuche machen deutlich, dass die Fokuslage einen großen Einfluss auf die Lochentstehung hat. Eine zuverlässige Fokuslagenpositionierung und -regelung gewinnt dadurch eine umso bedeutendere Rolle. Die Untersuchung zum Einfluss der Fokuslage auf die Entstehung von Löchern ergab, dass bei der Mischkeramik SN80 auch bei einer defokussierten Bearbeitung keine Löcher entstehen. Beim Hartmetall TSF44, dem Stahl 1.2343 und dem Silizium-Einkristall hingegen treten bei defokussierter Bearbeitung Löcher auf.

Tabelle 1: REM-Aufnahme von Kavitäten mehrerer Ebenen in Keramik SN80, Hartmetall TSF44, Stahl 1.2343 und Halbleitersilizium; Bearbeitung mit ausgehend verschiedenen Fokuslagen z bei konstanten Zustellungsinkrementen der Fokusposition [15]

	Keramik SN80	Hartmetall TSF44	Stahl 1.2343	Halbleitersilizium
Fokuslage z [μm]	$z = z_F - 130 \mu\text{m}$ 	$z = z_F - 140 \mu\text{m}$ 	$z = z_F - 50 \mu\text{m}$ 	$z = z_F - 90 \mu\text{m}$
	$z = z_F - 80 \mu\text{m}$ 	$z = z_F - 60 \mu\text{m}$ 	$z = z_F - 30 \mu\text{m}$ 	$z = z_F - 70 \mu\text{m}$
	$z_F = 0 \mu\text{m}$ 	$z_F = 0 \mu\text{m}$ 	$z_F = 0 \mu\text{m}$ 	$z_F = 0 \mu\text{m}$
		$z = z_F + 40 \mu\text{m}$ 	$z = z_F + 40 \mu\text{m}$ 	$z = z_F + 20 \mu\text{m}$
		$z = z_F + 70 \mu\text{m}$ 	$z = z_F + 110 \mu\text{m}$ 	$z = z_F + 40 \mu\text{m}$

Aus diesem Grund wurde anschließend der Einfluss des Werkstückmaterials und seiner Eigenschaften genauer untersucht. Die hier untersuchten Materialien besitzen unterschiedliche Bindungsarten, wie die metallische Bindung beim Stahl und Hartmetall, einer Mischform von ionischer und kovalenter Bindung bei keramischen Werkstoffen und rein kovalenter Bindung beim Halbleitersilizium. Für diese unterschiedlichen Bindungsarten wirken unterschiedliche Abtragmechanismen. Zur Visualisierung des unterschiedlichen Abtragverhaltens wurde der Abtrag von Einzelpulsen in Abhängigkeit der Pulsleistung für die untersuchten Materialien analysiert. Alle untersuchten Materialien, bis auf die Mischkeramik SN80, zeigen für eine Fluenz von 204 J/cm^2 bei einer konstanten Pulsdauer von 13 ps einen Schmelzrand um den Einzelpulsabtrag. Abbildung 2 zeigt den Einzelpulsabtrag für die vier untersuchten Materialien. Beim Stahl und beim Halbleitersilizium ist der Schmelzrand besonders stark ausgeprägt. Auch bei kleineren Pulsleistungen entstand hier ein deutlich ausgeprägter Schmelzrand.

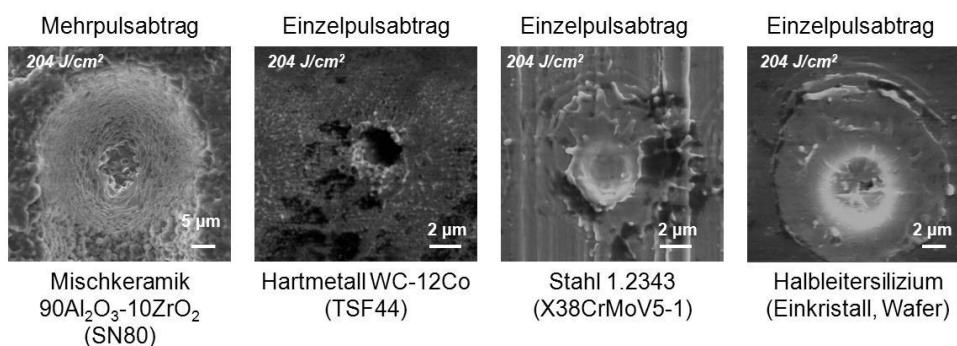


Abbildung 2: Keine Schmelzebildung bei der Mischkeramik SN80; Schmelzebildung bei Hartmetall TSF44, Stahl 1.2343 und Halbleitersilizium [15]

Als Fazit lässt sich daher ableiten, dass Löcher nur bei schmelzebildenden Materialien beobachtet wurden und besonders stark bei defokussierter Bearbeitung.

5.2.1.2.1 Akustische Prozessüberwachung und –regelung

Neue Ansätze zur Fokuslagenregelung wurden durch Nutzung akustischer Prozessemisionen zur Fokuslagenpositionierung und -regelung verfolgt, entwickelt und umgesetzt [13, 15]. Die Regelung mittels akustischer Emissionen bringt den großen Vorteil mit sich, dass die Methode auch auf stark variierenden Oberflächen, wie beispielsweise transparenten Oberflächen bei Glas sehr gut einsetzbar ist. Hier gelangen optische Positionierungssysteme schnell an ihre Grenze. Durch die Aufnahme und Auswertung akustischer Emissionen bei der Laserablation werden Rückschlüsse auf die Fokuslage oder eingebrachte Laserleistung gezogen. Hierbei können Körper- und/oder Luftschatlemissionen detektiert werden, welche in dem Ausbreitungsmedium (Luft oder Werkstück) und somit in der Frequenz differieren. Abbildung 3 zeigt den Versuchsaufbau zur Erfassung akustischer Emissionen bei der Laserablation.

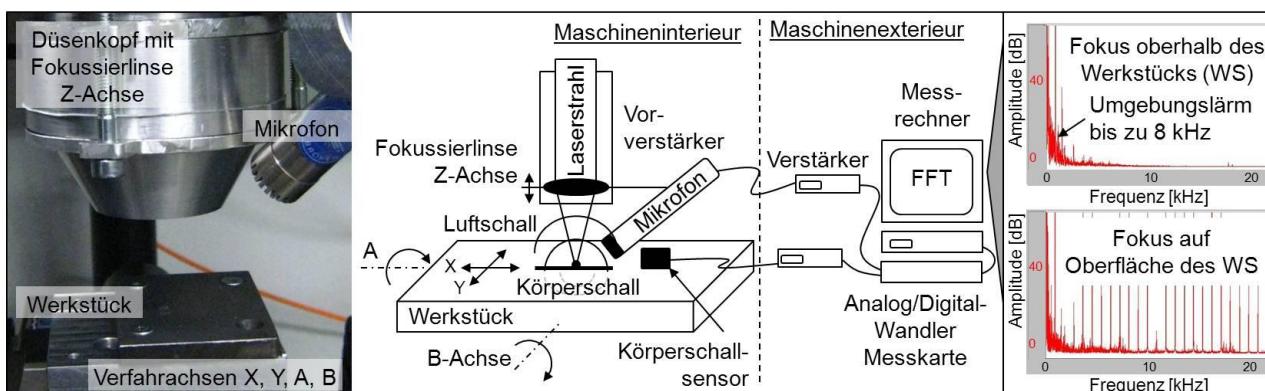


Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Erfassung akustischer Emissionen bei der Laserablation [13, 16]

Die mit einem Mikrofon der Firma Brüel & Kjær und einem Körperschallsensor der Firma Kistler aufgenommenen akustischen Signale wurden verstärkt und in LabVIEW mittels Fast Fourier Transformation (FFT) verarbeitet und ausgewertet. Die Detektion von Luftschatlemissionen hatte den Vorteil, dass ein Mikrofon zu deren Aufnahme an der Z-Achse parallel zur Fokuslinse angebracht werden konnte, so dass die Distanz der Emissionsquelle zum Mikrofon im Prozess nahezu unverändert blieb. Die Position der Sensoren zur Schallquelle besaß einen großen Einfluss auf die Intensität der akustischen Signale. Nach der FFT zeigte das Luftschatlignal im Fokus einen signifikanten Ausschlag der Frequenzen bis zu 20 kHz. Das Körperschallsignal in x-, y- und z-Richtung wiederum wies keine signifikanten Signalanstiege in Abhängigkeit der Fokusposition auf, wie in Abbildung 4 (links) deutlich zu erkennen ist. Lediglich der Signalanstieg der Achsregelkreise bei einer Frequenz von 20 kHz konnte detektiert werden. Aus diesen Gründen wurde im Rahmen dieses Vorhabens die akustische Prozesskontrolle mittels Akquisition von Luftschatlemissionen umgesetzt.

In einem akustischen Prozessmodell wurden zunächst signifikante Zusammenhänge akustischer Luftschatlemissionen mit Prozessparametergrößen (Leistung (P), Pulsabstand (PA) und Fokusposition (Z)) in Abhängigkeit vom Materialtyp (Mischkeramik $90\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}10\text{ZrO}_2$ (SN80) oder Hartmetall WC-12Co (TSF44, mittlere Korngröße $d_{\text{WC}} = 0,4 \mu\text{m}$, 86,65 % WC, 12,0 % Co und 1,35 % Mischkarbid) gegenübergestellt. Abbildung 4 (rechts) zeigt den Zusammenhang der akustischen Luftschatlemission in Abhängigkeit der Leistung für TSF44 und SN80 bei einer konstanten Laserablation im Fokus mit einem Pulsabstand von 5 μm , welcher für die Bearbeitung von Flächen seinen Einsatz findet.

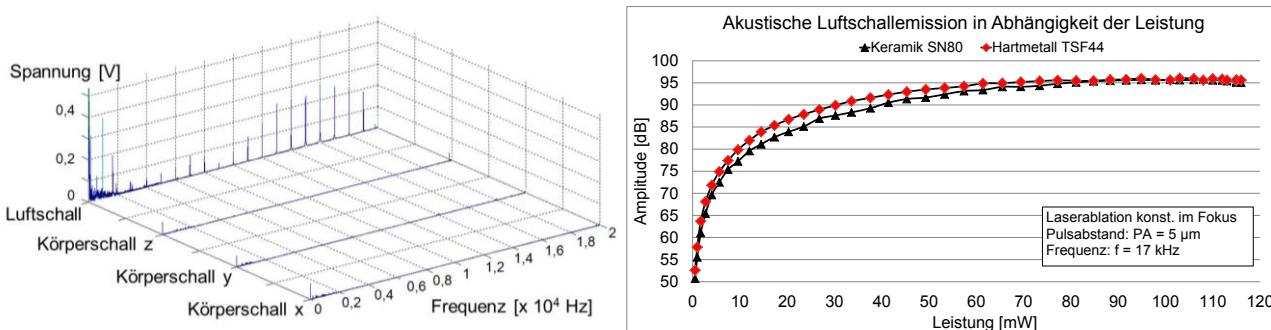


Abbildung 4: Vergleich Luftschall- mit Körperschallsignalamplitude (links); Akustische Luftschallemission in Abhängigkeit der Laserleistung für Hartmetall TSF44 und Keramik SN80 (rechts)

Jeder Datenpunkt im Diagramm entspricht einer Mittelung von 10 akustischen Signaldatenpunkten aufgenommen während der Ablation einer Linie. Der Zusammenhang von akustischer Signalamplitude und der Laserleistung macht deutlich, dass im Leistungsbereich 1 - 20 mW eine Leistungsregelung mittels akustischer Emissionen sinnvoll ist. Dieser Leistungsbereich findet gerade für die Laserablation sehr feiner Strukturen häufig ihre Anwendung.

Des Weiteren zeigten die Versuche zur Prozessmodellentwicklung, dass die akustischen Signale bei einer Leistung von 40 mW und einem Pulsabstand von 1 μm ein Maximum durchlaufen, wenn der Laserfokus die Werkstückoberfläche durchfährt (Abbildung 5). Beim Hartmetall TSF44 bildete der Parametersatz ($\text{PA} = 1\mu\text{m}$) ein Plateau im Maximum aus, welches eine Fokuslagenregelung in der gewünschten Genauigkeit von $\pm 20\mu\text{m}$ nicht erlaubte.

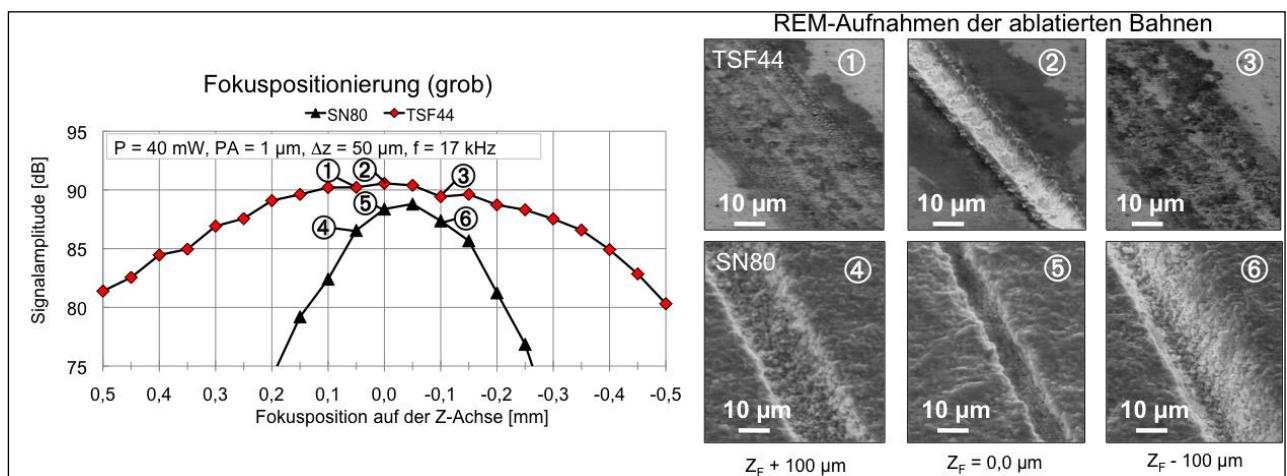


Abbildung 5: Verlauf der akustischen Signalamplitude für Hartmetall TSF44 und Keramik SN80 bei der groben Fokuspositionierung von 0,5 mm oberhalb bis 0,5 mm unterhalb der Werkstückoberfläche beim Pulsabstand $\text{PA} = 1\mu\text{m}$ (links); REM-Aufnahmen der ablatierten Bahnen (rechts)

Für den Pulsabstand $\text{PA} = 0,1\mu\text{m}$ konnte jedoch ein abweichendes Verhalten festgestellt werden. Aufgrund der hohen Fluenz, wird angenommen, dass es hier zu einer Plamaabschirmung der Laserpulse kommt und somit zu einem lokalen Einbruch der akustischen Emissionen. Zur Überprüfung dieser Hypothese wurden Aufnahmen des entstehenden Plasmaleuchtens während der Bearbeitung durchgeführt und dem Abtragergebnis und der akustischen Signalamplitude gegenübergestellt (Abbildung 6). Beim Hartmetall TSF44 ist das Plasmaleuchten dort am größten, wo der akustische Signalamplitudeneinbruch erfolgte. Auch bei der Keramik SN80 war dies zu beobachten. Somit wurde die Plasmaabsorption und das damit einhergehende lokale Minimum der akustischen Signalamplitude als Regelgröße für die akustische Fokuspositionierung genutzt. Die unterschiedlichen Signalverläufe in Abbildung 6 werden auf die unterschiedlichen Ablationsmechanismen beim Abtrag von Metallen und Keramiken zurückgeführt. Mit diesen Erkenntnissen war es nun möglich, die Fokuspositionierung in das lokale Minimum durchzuführen und die Genauigkeit auf $\leq 40\mu\text{m}$ zu steigern.

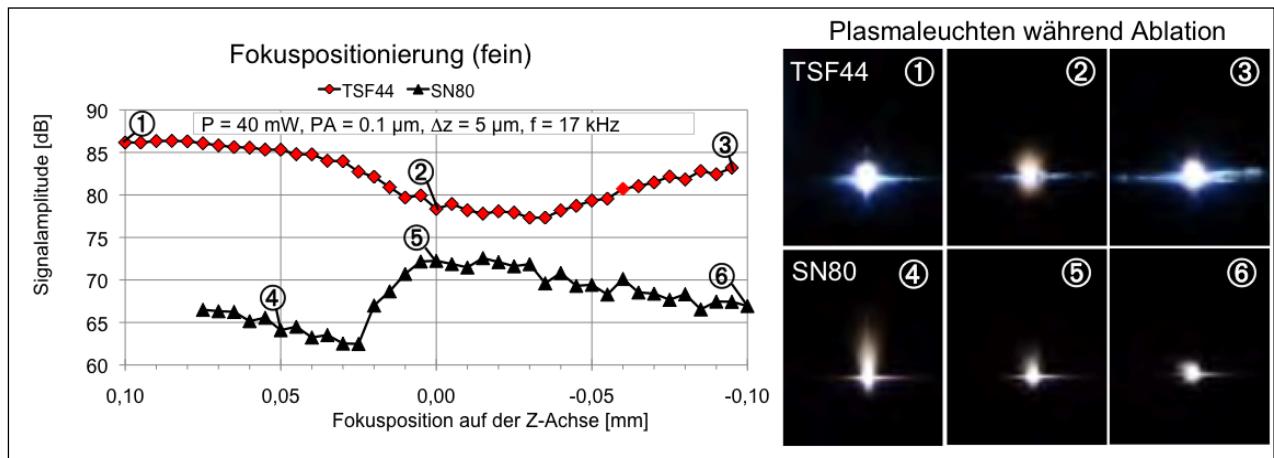


Abbildung 6: Verlauf der akustischen Signalamplitude für Hartmetall TSF44 und Keramik SN80 bei der Fokuspositionierung von 0,1 mm oberhalb bis 0,1 mm unterhalb der Werkstückoberfläche beim Pulsabstand PA = 0,1 µm; Plasmaleuchten während der Ablation mit 40 µJ

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde eine automatisierte akustische Fokuslagenpositionierung entwickelt und in LabVIEW programmiert. Dabei wird von LabVIEW aus vollautomatisch auf Daten der CNC-Steuerung zugegriffen und die Fokuslage geregelt. Die Fokuspositionierung unterteilt sich in eine Grob- und eine Feinpositionierung. Die Grobpositionierung stellt bei variierenden Werkstückgeometrien das Antasten der Oberfläche dar. Hierbei wird der Laserfokus in einem Punkt dem Werkstück angenähert und das akustische Signal automatisch in LabVIEW ausgewertet. Je näher der Laserfokus der Werkstückoberfläche kommt, desto größer ist die akustische Signalamplitude. Ein Signalabfall bedeutet, dass der Laserfokus unterhalb der Werkstückoberfläche positioniert ist und somit als Abbruchkriterium genutzt werden kann (Abbildung 7, links). Für die anschließende Feinpositionierung, bei welcher 31 Linien auf der Oberfläche ablatiert werden, wird der Fokuspunkt auf Position z_4 , oberhalb der Oberfläche positioniert. Mit Hilfe der Steuerung in Kombination mit einer eigens in LabVIEW aufgebauten Programmabfolge wird vollautomatisch das lokale Minimum in der Spitze der glockenförmigen Kurve der Signalamplitude gesucht und der Laserfokus dahingehend mit einer Genauigkeit von $\leq 40 \mu\text{m}$ auf der Oberfläche positioniert. Die automatische Fokuslagenpositionierung wurde auf den Stählen X30CrMoV5-1 und dem Toolox44, dem Hartmetall TSF44 und der Keramik SN80 erfolgreich angewendet. Die anschließende Ablation dieser Materialien erfolgte geregelt mit der in Phase 3 entwickelten optischen Tiefenregelung oder durch konstante Zustellung der Fokustaille in einem empirisch ermittelten Inkrement pro ablatierter Ebene.

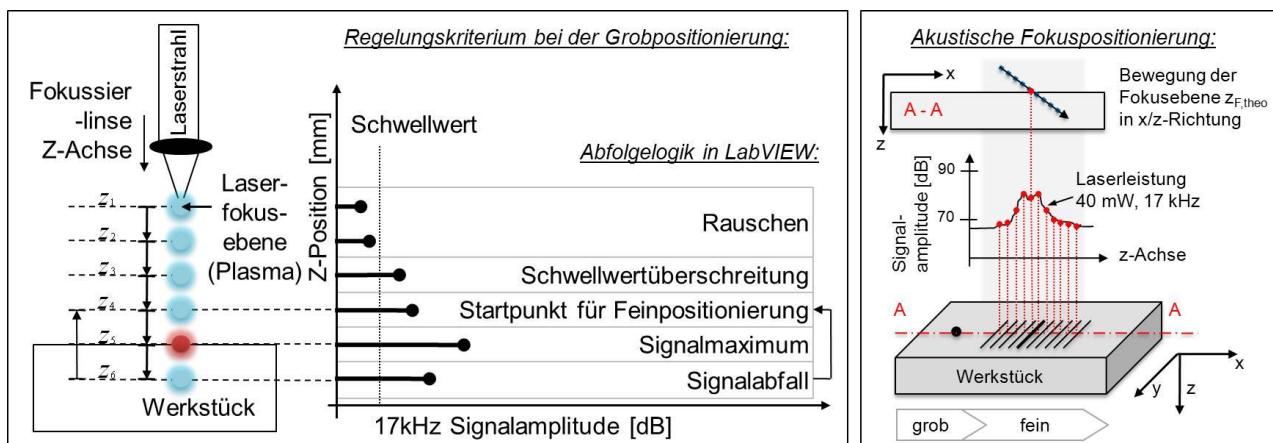


Abbildung 7: Akustische Fokuspositionierung (grob), Antasten (links); Akustische Fokuspositionierungsabfolge (rechts) [11, 14]

5.2.1.2.2 Erhöhung der Abtragraten durch Schrupp- und Schlichtstrategien

Die Mikrolaserablation mittels Festkörperlaser ist bisweilen ein eher langsames Verfahren im Vergleich zu EDM und Fräsen, weshalb durch neue Abtragstrategien, wie der Schrupp- und Schlichtstrategie eine Erhöhung der Abtragrate angestrebt wurde. Beim Schruppen wurde mit einem größeren Strahldurchmesser und höherer Laserleistung das Material schnell abgetragen. Dabei entstanden sichtbare Stufen pro ablatierter Ebene, die mittels Schlichten entfernt wurden.

Mithilfe der Integration eines steuerbaren variablen Strahlaufweiters der Firma Sill Optics mit möglicher Aufweitung von 1 bis 8, kann der Bearbeitungsdurchmesser des Laserstrahls gezielt im Prozess aus dem CNC-Programm heraus verändert werden. Die Integration beinhaltete die Konstruktion einer speziellen Halterung zur präzisen Ausrichtung der optischen Komponente, die mehrere Linsen beinhaltet. Der theoretische Fokusdurchmesser $d_{0,\text{theo}}$ errechnet sich in Abhängigkeit der Aufweitung des Laserstrahls vor der Fokussierlinse gemäß der Formel

$$d_{0,\text{theo.}} = \frac{4\lambda}{\pi} \frac{f}{D} M^2 \quad \text{Formel 1}$$

wobei λ die Laserwellenlänge $0,355 \mu\text{m}$, f die Brennweite von 60 mm , D der aufgeweitete Durchmesser vor der Fokussierlinse ($D = 3 \text{ mm} \times \text{Aufweitungsfaktor}$) und M^2 die Beugungsmaßzahl ($\geq 1,5$) ist. Je größer der Strahl vor der Fokussieroptik aufgeweitet wird, desto kleiner kann der Fokus in der Strahltaille fokussiert werden. Damit sind theoretisch Fokusdurchmesser von $7 \mu\text{m}$ bei einer Aufweitung des Strahls vor der Fokussieroptik um den Faktor 2 und $2 \mu\text{m}$ bei einer Aufweitung von 8 realisierbar (Abbildung 8, $d_{0,\text{theo.}}$).

Das reale Aufweitungsverhalten wurde anhand von Abtragbildern einzelner Laserimpakte mittels konfokalmikroskopischen Aufnahmen (NanoFocus AG, μ surf), lichtmikroskopischen Aufnahmen (Carl Zeiss AG) und rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (Carl Zeiss AG) untersucht. Anhand der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen erfolgten Beobachtungen der Schmelzonen. Die Einzelpulsimpakte wurden in den Aufnahmen mittels μ surf jeweils in drei Zonen eingeteilt, einen Abtragdurchmesser d_A mit starker Vertiefung, einem Schmelzzonendurchmesser d_S mit starkem Aufwurf oder kranzförmigem Ring und einem Wärmeeinflusszonendurchmesser d_W mit leicht beeinflusster Oberfläche. Es konnte ein Anstieg des Abtragdurchmessers d_A bei größer werdender Aufweitung beobachtet werden. Dieser verhält sich entgegengesetzt dem theoretisch erwarteten Strahldurchmesser. Die Schmelzzone und Wärmeeinflusszone hingegen fielen, wie erwartet mit höherer Aufweitung ab. Die empirischen Versuche konnten das Einstellen des Fokusdurchmessers gemäß dem theoretischen Modell für ideale Gaußstrahlen jedoch nicht eindeutig verifizieren (Abbildung 8).

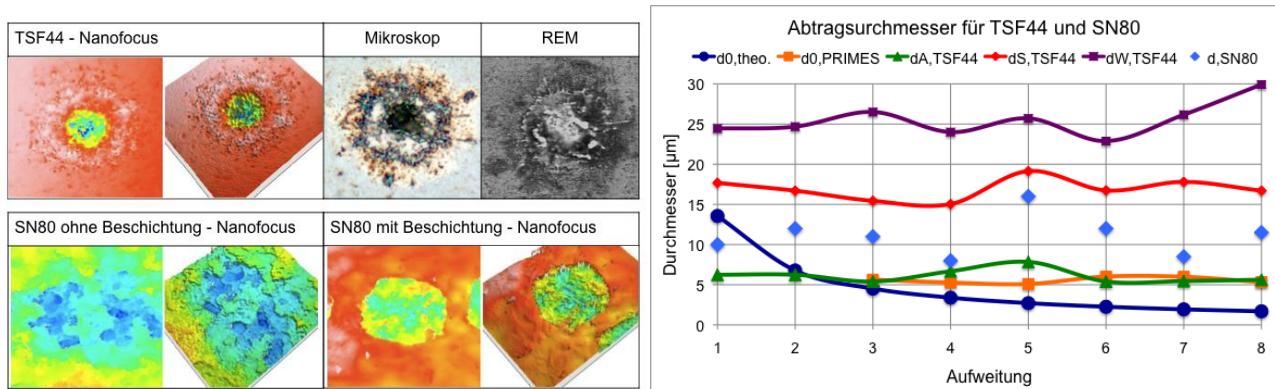


Abbildung 8: Durchmesser in Abhängigkeit der Laserstrahlauflaufweitung für Hartmetall TSF44 und Keramik SN80

Der Einfluss der verschiedenen Aufweitungen wurde zudem bei gleichbleibendem Parametersatz und einer Aufweitung von 3 ($d_{0,\text{theo.},A3} = 4,52 \mu\text{m}$) und 6 ($d_{0,\text{theo.},A6} = 2,26 \mu\text{m}$) anhand dreidimensionaler Ablation untersucht. Auch die Fertigung flächiger, tiefer Kavitäten der Aufweitung 3 und 6 bei sonst gleichen Parameterstellungen zeigten keine signifikanten Unterschiede im Abtragbild (Abbildung 9).

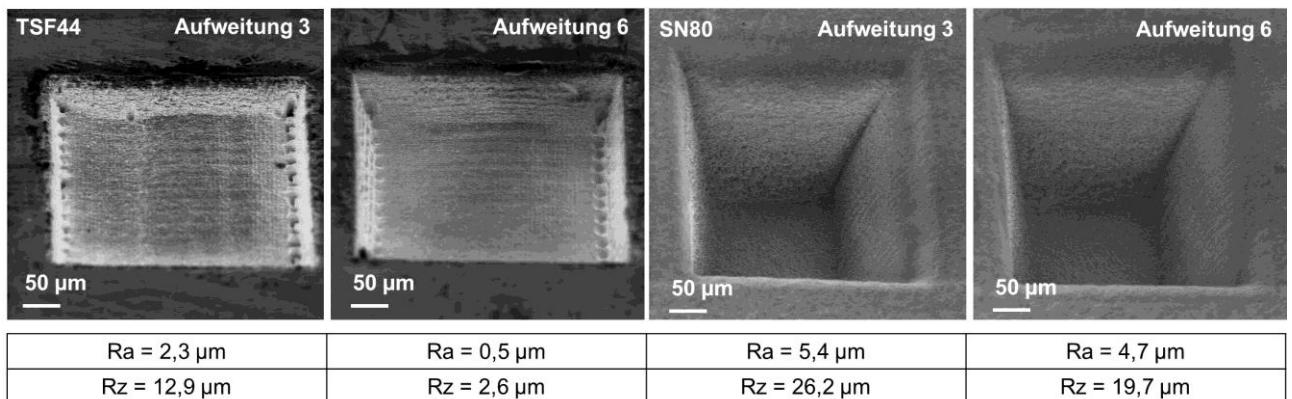


Abbildung 9: Kavität in TSF44 und Keramik SN80 mit Aufweitung 3 und 6; Parameter TSF44:

Fluenz = 204 J/cm², Pulsabstand = 5 µm, Bahnabstand = 3 µm, Zustellung = 0,65 µm, Tiefe-Soll 20 µm; Parameter SN80: Fluenz = 204 J/cm², Puls-/Bahnabstand = 5 µm, Zustellung = 11 µm, Tiefe-Soll = 330 µm

Um dieses Verhalten besser zu verstehen, wurde abschließend das Strahlprofil mit dem Messgerät MicroSpotMonitor der Firma Primes GmbH nach der 86%-Methode vermessen (Abbildung 10) [8]. Die Messung ergab, dass der Divergenzwinkel des Strahls und damit die Beugungsmaßzahl M^2 mit höherer Aufweitung steigen, so dass sich die Effekte einer feineren Fokussierung aufhoben und der Fokusdurchmesser nahezu unverändert blieb. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf den Bereich $\pm 20 \mu\text{m}$ in z-Richtung um den Fokuspunkt z_F gelegt.

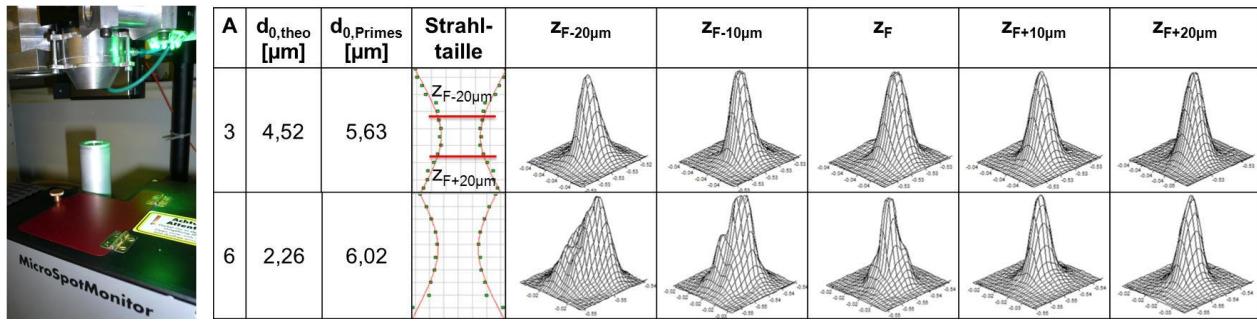


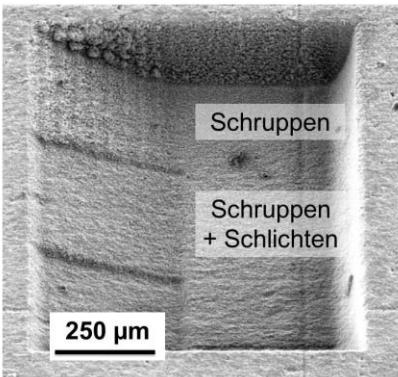
Abbildung 10: Vergleich des gemessenen Strahlprofils in Strahltaille bei Aufweitung $A = 3$ und $A = 6$; Messung mit MicroSpotMonitor (Firma Primes GmbH) nach der 86%-Methode

Es konnte festgestellt werden, dass sich lediglich die Qualität der Intensitätsverteilung bei kleineren Aufweiterungen verbesserte und damit der idealen Gaußverteilung angenähert werden konnte. Somit konnte in weiteren Versuchen mit verbesserter Strahlqualität der Aufweitung 3 gearbeitet werden.

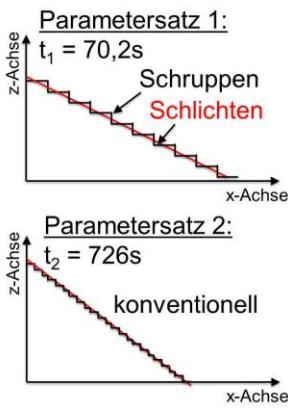
Schrupp- und Schlichtstrategien wurden alternativ zur ursprünglich angestrebten Methode mittels Strahlaufweitung über die Manipulation der Fluenz und der Bearbeitungsstrategie umgesetzt. Für den groben Schrappabtrag wurde dabei mit höherem Leistungseintrag gearbeitet als beim feinen Schlichtabtrag. Um gute Oberflächenqualitäten zu erzielen, wurden die Bearbeitungsparameter (Fluenz, Pulsabstand und Bahnabstand) teilkontoriell in je 10 Stufen variiert und fünfmal wiederholt. Somit konnten für die Fluenz von 5 bis 510 J/cm^2 empirisch Parameterkombinationen gefunden werden, die Oberflächengüten $Rz_{\text{Keramik}} < 10 \mu\text{m}$ und $Rz_{\text{Hartmetall}} < 1 \mu\text{m}$ erzielten.

Zur Fertigung von Kavitäten mittels Schrapp- und Schlichtstrategien wurde zunächst eine $200 \mu\text{m}$ tiefe Kavität durch Schrappen aus der Keramik SN80 ablatiert, so dass an der schrägen Wand $40 \mu\text{m}$ breite Stufen aufgrund der groben Zustellung zu erkennen sind (Abbildung 11). Dabei wurde mit der Aufweitung 6, der Fluenz von 204 J/cm^2 , einem Puls- und Bahnabstand von $5 \mu\text{m}$ in 9 Ebenen gearbeitet. Pro Ebene wurde eine Abtragtiefe von $22 \mu\text{m}$ erreicht. Die Abtragsrate betrug dabei $500.000 \mu\text{m}^3/\text{s}$ bei einer Bearbeitungszeit von $65,4 \text{ s}$. In einem zweiten Schritt wurde die erzeugte stufige Schräge mit einer veränderten Bearbeitungsstrategie nachgearbeitet. Dabei wurde der Laserfokus der Sollkontur folgend über die Spitzen der schrägen Wand verfahren und die Oberfläche geglättet (Abbildung 11). Der Schlichtvorgang dauerte $4,8 \text{ s}$. Die Gesamtbearbeitung dauerte somit $70,2 \text{ s}$.

REM-Aufnahme: Keramik SN80



Bearbeitungsstrategie:



Parameter: Keramik SN80

Parametersatz	1	2
Fluenz [J/cm^2]	204	153
Pulsabstand [μm]	5	4
Bahnabstand [μm]	5	7
Ebenen	9	40
Abtrag/Ebene [$\mu\text{m/Ebene}$]	22	5
Abtragsrate [$\mu\text{m}^3/\text{s}$]	500.000	100.000
Bearbeitungszeit [s]	70,2	726

90% Zeitsparnis bei der Bearbeitung mittels neuer Schrapp- und Schlichtstrategie

Rauheit	Schrappen	Schlichten
$Rz [\mu\text{m}]$	7,07	4,45
$Ra [\mu\text{m}]$	1,4	0,788

Abbildung 11: Laserablatierte Kavität in Keramik SN80 mittels Schrappen und Glättung der Oberfläche durch Schlichten, Vergleich mit konventioneller Bearbeitung mit Parameter geringer Abtragsrate

Um die gleiche Geometrie ohne nachgeschaltetem Schlichtvorgang zu erzeugen, wurde mit deutlich geringeren Abtragsraten pro Ebene gearbeitet. Dafür wurde folgender Parametersatz verwendet: Aufweitung 6, Fluenz von 153 J/cm^2 , einem Pulsabstand von $4 \mu\text{m}$ und einem Bahnabstand von $7 \mu\text{m}$ bei 40 Ebenen, die Abtragtiefe pro Ebene betrug $5 \mu\text{m}$. Die Bearbeitungszeit ergab hier 726 s bei einer Abtragsrate von $100.000 \mu\text{m}^3/\text{s}$. In diesem Beispiel wurde gezeigt, dass durch den Einsatz von Schrapp- und Schlichtstrategien der Ablationsprozess um das 10-fache beschleunigt werden konnte.

5.2.1.2.3 Strukturierung dreidimensionaler Geometrien

Weiterhin wurden Strategien zur Herstellung von echten dreidimensionalen Geometrien entwickelt. Dafür wurden die Parametersätze und Stufenbreiten für Hartmetall TSF44 und Keramik SN80 variiert und Optima ermittelt. Dabei wurde das Verhältnis der optimalen Stufenbreite pro Ebene in Bezug zur Abtragtiefe pro Ebene und dem sich einstellenden Wandwinkel untersucht. Ein Optimum lag für die in Abbildung 12 (Mitte links) gezeigte Pyramidenstruktur in der Keramik SN80 bei einer Stufenbreite von 11,7 µm bei 8 Ebenen. Es konnte somit eine Pyramide mit Kantenlängen von 150 µm, einer Tiefe von 70 µm und einer Spitz im Winkel von 47° eingestellt werden. Die Oberflächenrauheit lag hier bei $R_z = 13,4 \mu\text{m}$ und $R_a = 1,56 \mu\text{m}$. Die Pyramidenstruktur in Abbildung 12, Mitte rechts wurde mit einer Stufenbreite von 36 µm hergestellt. Abbildung 12 (rechts) zeigt zudem ein ablatiertes Zahnrad mit dem Durchmesser von 1500 µm und einer Tiefe von 13 µm ($R_z = 8,68 \mu\text{m}$, $R_a = 1,18 \mu\text{m}$). Die Evolventenverzahnung konnte mit einer hohen Konturtreue erstellt werden.

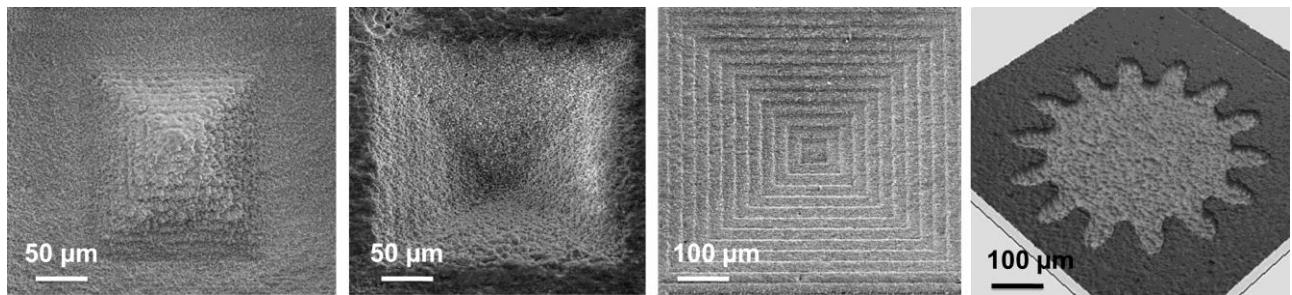


Abbildung 12: Keramik SN80, aus dem Material herausstehende rechteckige Pyramidenstruktur (links), in das Material hineinreichende quadratische Pyramidenstruktur ohne Schmelzrückstände (Mitte links), quaderförmige Stufenkavität (Mitte rechts), Zahnradformeneinsatz (rechts)

Bei den Versuchen auf Hartmetall TSF44 kam es zur Bildung von Schmelze, die die Oberflächenqualität deutlich verschlechterte. Abbildung 13 zeigt die dreidimensionalen Ergebnisse für Hartmetall TSF44. Hier wurden Pyramiden mit der Kantenlänge 200 µm x 400 µm ($R_z = 6,47 \mu\text{m}$, $R_a = 1,12 \mu\text{m}$) und 200 µm x 200 µm ($R_z = 3,24 \mu\text{m}$, $R_a = 0,586 \mu\text{m}$) gefertigt. Des Weiteren wurde eine defektfreie quaderförmige Kavität mit senkrechten Wänden hergestellt. Abbildung 13 (rechts) zeigt einen Zahnradformeneinsatz mit 3 mm im Durchmesser und 80 µm Tiefe in Hartmetall TSF44 ($R_z = 1,03 \mu\text{m}$, $R_a = 0,156 \mu\text{m}$) [12]. Auch hier konnte die Evolventenverzahnung mit einer hohen Konturtreue erstellt werden.

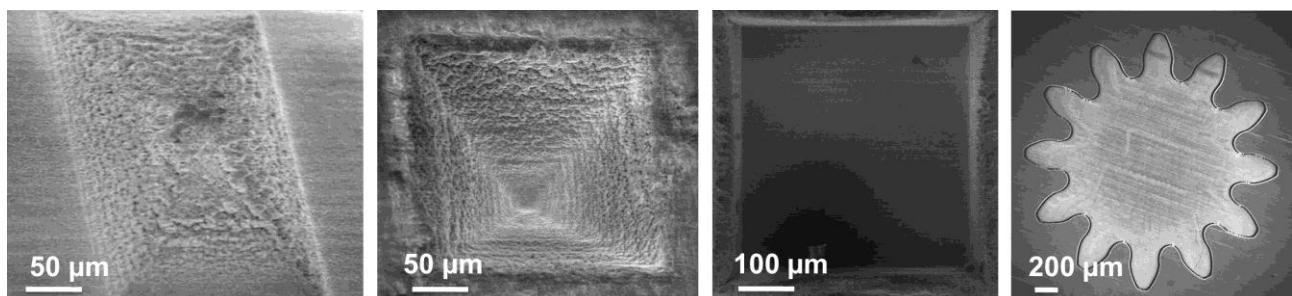


Abbildung 13: Hartmetall TSF44, Fluenz = 204 J/cm², Pulsabstand 5 µm, Bahnabstand 3 µm, z-Zustellung 1 µm; Schmelzerückstände bei rechteckiger Pyramidenstruktur (links), Schmelzrückstände bei quadratischer Pyramidenstruktur (Mitte links), quaderförmige Kavität mit guter Oberflächenqualität (Mitte rechts), Zahnradformeneinsatz (rechts) [12]

5.2.1.2.4 Anwendung des kombinierten Bearbeitungsverfahrens zur Fertigung

Abschließend wurden in Phase 4 die Erkenntnisse und Weiterentwicklungen aus TP B4 mit denen aus TP B6 in Form der hybriden Laser-/EDM-Bearbeitung kombiniert. Großflächiger Abtrag mit hohen Aspektverhältnissen und hoher Abtragsrate erfolgte hierbei mittels EDM, wobei filigrane Strukturen mittels Laserablation herausgearbeitet wurden. Dabei kamen eine erweiterte Abfolgeplanung für die kombinierte Laser-/EDM-Bearbeitung und die entwickelten Regelungskonzepte zum Einsatz (Abbildung 14).

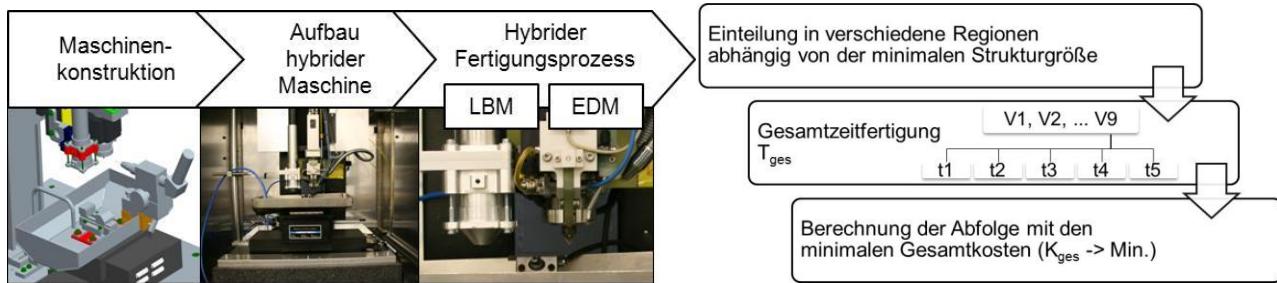


Abbildung 14: Entwicklung und Aufbau der hybriden EDM-/Lasermaschine (links) [9]; Vorgehensweise zur Berechnung der optimalen Abfolge der Fertigungsverfahren (rechts) [5]

Auf Basis der berechneten Maschinenkosten und den experimentell bestimmten Abtragsraten der einzelnen Verfahren wurde ein Optimierungsalgorithmus entwickelt, der die kostenoptimale Bearbeitung beliebiger Geometrien auf der hybriden EDM-/Laser-Maschine berechnet und die ideale Abfolge der beiden Verfahren ausgibt. Exemplarisch kamen bei der EDM-Bearbeitung vier verschiedene Elektrodendurchmesser 50 µm, 100 µm, 450 µm und 900 µm zum Einsatz. Zu Beginn musste die zu fertigende Struktur als CAD-Datei vorliegen sowie die gewünschte Oberflächenqualität und Toleranz bekannt sein. Im CAM-System wurde die Struktur dann im Hinblick auf vorkommende Abmessungen untersucht und in Regionen eingeteilt, die mit dem entsprechenden Verfahren bearbeitet werden können. Aus den jeweils minimal herstellbaren Strukturdetails ergaben sich verschiedene Regionen und Bearbeitungsabfolgen. Für jeden Elektrodendurchmesser wurden in der Planung immer nur diejenigen Strategien berücksichtigt, die die größtmögliche Abtragsrate bei gleicher Oberflächenrauheit gewährleisteten [5].

Die in Abbildung 15 (links) dargestellte Testgeometrie wurde beispielsweise in 9 Regionen mit den dazugehörigen Volumen unterteilt. Volumen 1 bis 8 wurde für die Laserablation ausgewählt. Die Strukturdetails liegen hier bei 20 µm und kommen somit für die EDM-Bearbeitung mit ihren kleinsten Elektrodendurchmessern von 40 µm nicht in Frage. Für die Laserablation der 400 µm langen, 20 µm breiten und 5 µm tiefen Volumen V1 bis V8 kamen folgende Parameter zum Einsatz: Fluenz 25 J/cm², Pulsabstand 1 µm, Bahnabstand 3 µm. Die Bearbeitung der Volumenkörper V1 bis V8 betrug 380 s. Das Volumen V9 im Zentrum konnte prinzipiell auch mittels Laserablation bearbeitet werden. Aus Kostensicht ist die EDM-Bearbeitung das geeignete Verfahren für das geforderte hohe Aspektverhältnis und die hohen Abtragsvolumina. Für die EDM-Bearbeitung kam eine 100 µm-Elektrode aus Wolframcarbid mit folgenden Prozessparametern zum Einsatz: Spannung = 80 V; Strom = 0.8 A; Frequenz = 120 kHz; Pulsdauer = 2 µs). Die Bearbeitungszeit betrug hier 1:05 h. Abbildung 15 (rechts) zeigt eine weitere Testgeometrie, bei welcher mittels EDM-Bearbeitung das große umliegende Volumen des Pins ablatiert wurde und anschließend der miniaturisierte Schriftzug in der Gesamtbreite von 100 µm mittels Laserablation aufgebracht wurde.

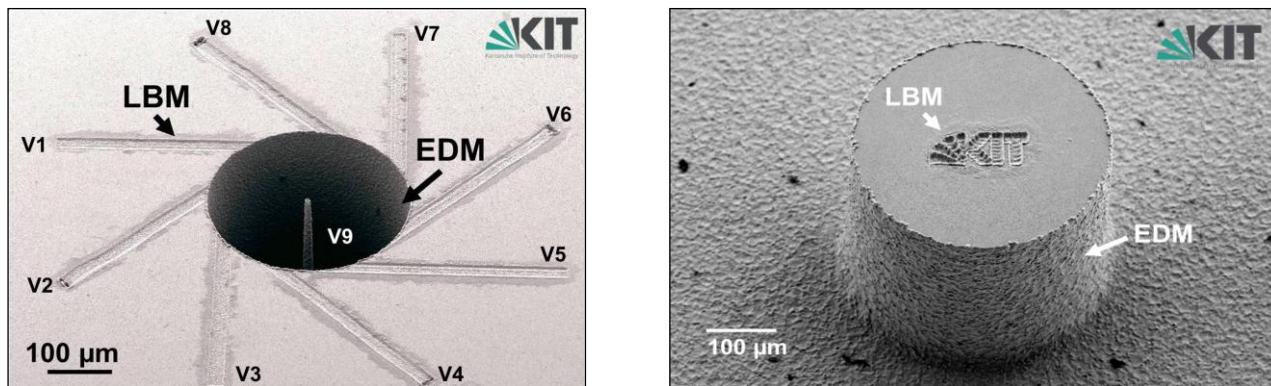


Abbildung 15: hybride Abtragbeispiele in Hartmetall TSF44; Testgeometrie eingeteilt in 9 Volumen (links), Pin mit KIT-Logo (rechts)

Bei diesen Geometrien galt die Übergangszone von der EDM-bearbeiteten Region zur laserablativen Region als unkritisch. Sollen jedoch zwei Strukturen mit gleicher Tiefe hergestellt werden, so weist die Übergangszone oft eine unzureichende Qualität auf. Diese äußerte sich in Form von deutlichen Stufen oder Defekten im Übergangsbereich (Löcher, Gräben, Materialanhäufungen). Untersuchungen zeigten, dass die Qualität der Übergangszone primär von der Bearbeitungsreihenfolge (EDM-Laser oder Laser-EDM) und von der Bearbeitungsüberlappung abhängt. Durch den Einsatz der entwickelten Tiefenregelungen, konnte die Abweichung auf 2 µm reduziert werden (Abbildung 16, Mitte) [6, 7, 9, 15, 16, 17].

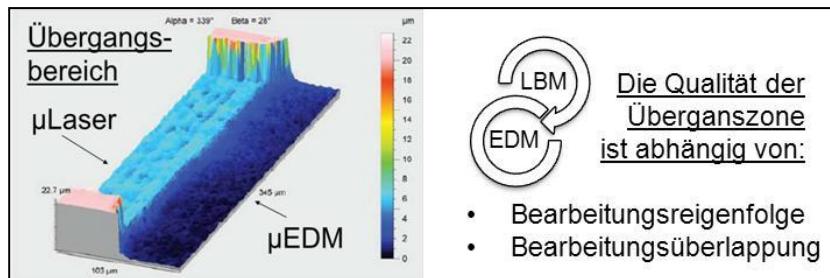


Abbildung 16: Nanofocus Vermessung des Übergangsbereichs Laser/EDM-Strukturierung, Stufenhöhe 2 μm

Die Versuche zeigten, dass nach der Laserbearbeitung durch einen abschließenden EDM-Bearbeitungsschritt Unebenheiten in den Übergangszonen beglichen werden konnten. Die Laserablation als abschließender Bearbeitungsschritt erwies sich in den Übergangszonen als ungeeignet. Der Laserstrahl schmiegt sich der ursprünglichen Kontur an, bildete einen Graben aufgrund von defokussierter Bearbeitung und verstärkte die Defekte in den Übergängen bei mehrmaliger Überfahrt. Gemäß der erweiterten Abfolgeplanung werden demnach die geometrischen Größen zunächst einem Verfahren zugewiesen auf Grund von fixen Randbedingungen, die stets die Wirtschaftlichkeit mittels Bearbeitungszeit und Bearbeitungskosten mit berücksichtigt. Anschließend wurde bei kritischen Übergängen, d.h. wenn beide Bereiche die gleiche Tiefe aufweisen sollten, das Kriterium der Bearbeitungsstrategie an kritischen Übergängen (abschließende EDM-Glättung am kritischen Übergang) mit berücksichtigt.

5.2.1.2.5 Erweiterung des μ -Strukturkatalogs und Beitrag zum ZIM

Gemeinsam mit den Teilprojekten Z3 (Mikrozerspanung), B4 (Mikrofunkenerosion) und B5 (Optimierte Formeinsätze) wurde bereits in den vorherigen Phasen mit der Erstellung eines Strukturkatalogs begonnen, in dem Teststrukturen mit entsprechenden Handlungsempfehlungen für eine hinsichtlich Qualität, Fertigungszeit und –aufwand optimale Bearbeitung für die fertigungsgerechte Konstruktion bereitgestellt werden. Hierfür wurden Teststrukturen mit den unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt, untersucht und anschließend verglichen. Die Arbeiten wurden zusammen mit den Teilprojekten A1 (Entwicklungsmethodik), B4, B5, C4 (Microfeatures) und Z3 ausgebaut und der Strukturkatalog durch Fertigung, Untersuchung und Bewertung neu zu entwickelnder Teststrukturen, bspw. zur Identifikation maximaler Aspektverhältnisse und Oberflächengüten, erweitert. In der vierten Förderphase wurde das Zentrum für integrierte Mikrofertigung (ZIM) aufgebaut, welches eine optimale Abwicklung von Entwicklungs- bzw. Fertigungsaufgaben beliebiger Mikrobauteile in keramischen oder metallischen Werkstoffen ermöglicht. Teilprojekt B6 war hierbei im Bereich der Arbeitsvorbereitung beteiligt und brachte sein Know-how bei fertigungstechnischen Fragestellungen zur Laserbearbeitung sowie zur kombinierten EDM-/Laserbearbeitung ein.

Literaturverzeichnis

- [1] N. N.: Sonderforschungsbereich (SFB) 499: Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung ungeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen. Internet: www.sfb499.de. Stand: 2010. Zuletzt aufgerufen: 08.10.2010
- [2] N. N.: DIN 8580:2003-09: „Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth-Verlag 2003
- [3] Weikert, M.: Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW). München: Herbert Utz-Verlag 2005
- [4] Läßiger, B.: Kontrollierter Formabtrag durch Sublimation mittels Laserstrahlung. Dissertation, RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, 1994
- [5] Klinger, P.: Regelung des Nd:YAG-Formabtrags mit optischen Sensoren. Dissertation, TU München. Aachen: Shaker-Verlag 2004
- [6] Fleischer, J.; Haupt, S.; Halvadjiysky, G.: Process parameter analysis in ablating micro mold manufacturing. *Microsystems Technologies* 14 (2008), S. 1367–1372

- [7] Haupt, S.: Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation, Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik Universität Karlsruhe; #147, Shaker Verlag, 2009
- [8] Eichler, J.; Dünkel, L.; Eppich, B.: Die Strahlqualität von Lasern, Laser Technik Journal (2004), Volume: 1, Issue: 2, Publisher: Academic Press, Pages: 63-66, DOI: 10.1002/latj.200790019

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

- [9] Schulze, V.; Haupt, S.; Weber, P.: Hybrid machining of microstructures using a combination of electrical discharge machining milling and laser ablation. in: Journal of Vacuum Science & Technology B (JVST B) - Microelectronics and Nanometer Structures, Jahrgang 2009, Heft/Band Vol. 27, No. 3, May/Jun 2009, S. 1327-1329.
- [10] Schulze, V.; Haupt, S.; Weber, P.: Hybrid machining of microstructures using a combination of electrical discharge machining milling and laser ablation. in: Virtual Journal of Ultrafast Science, Jahrgang 2009, Heft/Band Volume 8, Issue 6, S. 1327-1329.
- [11] Schulze, V.; Weber, P.; Ruhs, C.: Implementation of on-machine measurements using confocal white-light sensors for micro Electrical Discharge Machining and micro laser ablation. 4M/ICoMM 2009 Conference, 23-25 September 2009, Karlsruhe, Deutschland, Band 4M/ICoMM 2009 - The Global Conference on Micro Manufacture, S. 179-182.
- [12] Schulze, V.; Deuchert, M.; Kienzler, A.; Ruhs, C.; Weber, P.: Prozessübergreifende Betrachtung abtragender Verfahren zur Mikroformemeinsatzherstellung. 4. Kolloquium Mikroproduktion, 28.-29.10.2009, Bremen, Deutschland, Verlag BIAS-Verlag, F. Vollertsen, S. Büttgenbach, O. Kraft, W. Michaeli, Band , 4. Kolloquium Mikroproduktion, Bremen, ISBN 978-3-933762-32-0, S. 125-131.
- [13] Schulze, V.; Weber, P.: Precise ablation milling with ultra short pulsed Nd:YAG lasers by optical and acoustical process control. SPIE Photonics West 2010 - LASE, 23.01. - 28.01.2010, San Francisco, USA, Proceedings of SPIE Vol. 7585 75850J-1, document 7585-18.
- [14] Schulze, V.; Weber, P.; Deuchert, M.; Haupt, S.; Ruhs, C.; Kienzler, A.: Limits and challenges of manufacturing micro moulds. in: International Journal of Nanomanufacturing, Jahrgang 2010, Heft/Band Vol. 6, No.1/2/3/4, Verlag Inderscience Publishers, DOI 10.1504/IJNM.2010.034782, S. pp. 176 - 189.
- [15] Schulze, V.; Weber, P.: Löcher beim Mikrolaserabtragen vermeiden - Einfluss von Werkstückmaterial und Fokuslage auf die Bildung unerwünschter Löcher. in: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 100 (2010), Heft/Band 11/12-2010, Verlag Springer-VDI-Verlag 2010, Düsseldorf, S. 847-852.
- [16] Schulze, V.; Weber, P.: Acoustical focal positioning for micromachining using a picosecond pulsed UV-Laser. ICALEO 2011, 23-27 October, 2011, Orlando, USA, ICALEO 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro Optics Congress Proceedings, ISBN 978-0-912035-94-9, S. 966 - 971.
- [17] Schulze, V.; Deuchert, M.; Ruhs, C.; Weber, P.; Weingärtner, R.: Fertigungstechnologien zur Erzeugung hochgenauer Mikrostrukturen und Oberflächen. Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, 11. - 12. Oktober 2011, Karlsruhe, Germany, Verlag KIT Scientific Reports, Band , Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, ISBN ISBN 978-3-86644-747-9, S. 65 - 74.
- [18] Schulze, V.; Weber, P.; Ruhs, C.: Optical and acoustical process control in hybrid micromachining using a picosecond pulsed UV-laser and micro EDM-milling. Proceedings of the 8th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture (4M 2011), 8-10 November 2011, Stuttgart, Germany, Verlag Research Publishing, 4M Association, ISBN 978-981-07-0319-6, S. 83 – 86.

- [19] Schulze, V.; Weber, P.; Ruhs, C.: Increase of process reliability in the micro-machining processes EDM-milling and laser ablation using on-machine sensors. In: Journal of Materials Processing Technology, Micro-Manufacturing Processes, Volume 212, Issue 3, March 2012, Elsevier, DOI: 10.1016/j.jmatprot.2011.09.014, Pages 625-632.

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit 01.06.2004 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1	Prof. Dr.-Ing. habil. V. Schulze	Masch.bau, Fert. technik, Institutsleitung	wbk	6
	2	Prof. Dr.-Ing. J. Fleischer	Masch.bau, Institutsleitung	wbk	2
	3	Dipl.-Ing. Raphael Rilli	Masch.bau, Fert. technik	wbk	5
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	4	Friedbert Mathes		wbk	19,75
	5	Ellen Freding		wbk	19,75
beantragte Ergänzungsausstattung					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	6	Dipl.-Phys. S. Haupt	Masch.bau, Fert.technik	wbk	39,5
	7	Dipl.-Ing. P. Weber	Masch.bau, Fert.technik	wbk	39,5
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	8	Cand.-Ing. N.N		wbk	19,25
	9	Matthias Becker		wbk	19,75

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

- 1 Matthias Becker (technischer Angestellter, E9)

Der technische Angestellte unterstützte den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei mechanischen und elektronischen Arbeiten beim Aufbau der Kombination von Laserablation und Funkenerosion. Er war beteiligt an der Konstruktion und Fertigung der dafür benötigten Vorrichtungen der Anlage sowie der Einrichtung der Messsysteme. Auch die Programmierung der Steuerungssoftware zählte zu seinen Aufgaben.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

- 2 Dipl.-Ing. Patricia Weber (wissenschaftliche Angestellte, E 13, 01/2009 - 12/2011)

Die wissenschaftliche Mitarbeiterin war für die Planung und Durchführung des Forschungsvorhabens zuständig. Dazu gehörte die Auswertung der Versuche sowie Untersuchungen zu der erzielbaren Qualität der im Rahmen des Teilprojektes bearbeiteten Formeinsätze im Hinblick auf die Zuverlässigkeit, Prozessfähigkeit

keit und Robustheit des Prozesses. Des Weiteren koordinierte sie die Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten des SFBs und war für Veröffentlichungen und Präsentation der erzielten Ergebnisse auf Konferenzen verantwortlich.

3 Cand. Mach. (studentische Hilfskraft)

Die studentischen Hilfskräfte unterstützten die wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung verschiedener Versuche. Sie arbeiteten mit an der Präparation der Proben sowie dessen Strukturierung und an Untersuchungen zur Charakterisierung der Probentopographie und Formvermessungen. Außerdem waren sie am Versuchsaufbau, an der Software-Programmierung und Versuchsdurchführung beteiligt.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt C1

5.1.1 Titel

MicroPIM – Herstellung von metallischen und keramischen Mikrobauteilen durch Pulverspritzgießen

MicroPIM – Manufacturing of metal and ceramic micro parts by powder injection molding

5.1.2 Projektleitung

Piotter, Volker, Dr.-Ing., geb. 24.06.1964, deutsch

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT)

Postfach 3640

76021 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-26463

Telefax: 0721 / 608-22095

E-Mail: volker.pirotter@kit.edu

Hanemann, Thomas, Prof., geb. 24.03.1963, deutsch

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT)

Postfach 3640

76021 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-22585

Telefax: 0721 / 608-22095

E-Mail: thomas.hanemann@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

5.2.1.1 Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Eine der wesentlichen Fragestellungen bei der Herstellung pulverspritzgegossener Mikrobauteile ist die Verbesserung der Maß- und Geometrietreue, welche bisher eine limitierende Größe darstellt. Es werden Standardabweichungen zwischen $\pm 0,1$ und $\pm 0,5$ % des Nennmaßes angegeben, was für viele Anwendungen ausreichend ist, im Falle hochpräziser Bauteile aber eine Nachbearbeitung erforderlich macht. Hierzu sollten grundlegende Untersuchungen mit einem neu zu entwickelnden Werkzeugkonzept, welches eine gezielte Beeinflussung der Formfüll-, Verdichtungs- und Abkühlprozesse auch in der Kavität ermöglicht, durchgeführt werden und ggf. engere Toleranzen erreicht werden.

Bisher kam weitgehend das in früheren Förderphasen entwickelte „GoMikro“-Bindersystem zum Einsatz. Ein Nachteil dieses Bindersystems ist der notwendige Schritt einer chemischen Entbinderung in n-Hexan, welches toxisch, umweltgefährdend und hoch brennbar ist. Dieser Schritt kann durch den Einsatz neuer Binderkomponenten, welche ein partielles Entbinden in Wasser erlauben, ersetzt werden. Daher sollten mit den im Teilprojekt B1 neu zu entwickelnden Formmassen Versuche zur Eignung für Micro-PIM-Abformungen durchgeführt werden.

In enger Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt B1 wurden in der Förderphase 2006-2008 erstmals Pulver-Binder-Separationen in pulverspritzgegossenen Mikrobauteilen mittels Computer-Tomographie untersucht. Dabei wurden Partikeldichteprofile an Mikrobiegeproben aus Stahl ermittelt. Es zeigte sich, dass in den Randbereichen einer Probe quadratischen Querschnitts geringe Partikeldichten, in der Mitte hingegen die höchsten Dichten zu finden sind. Diese ersten Erkenntnisse sollten mit weiterführenden Versuchen, u.a. zur Ermittlung der Verteilungsprofile entlang des Fließweges, belegt und erweitert werden.

Neben den geometrischen Anforderungen an PIM-Bauteile sind die erreichbaren mechanischen Festigkeiten von entscheidender Relevanz. Erste Ansätze zur systematischen Verbesserung dieser Kennwerte durch eine gezielte Einstellung der Sintergefüge wurden in der dritten Förderphase im Teilprojekt C1 verfolgt. Ein Ziel der vierten Phase war daher eine weitere Verbesserung dieser Gefüge insbesondere bei Stahlbauteilen,

was durch eine Anpassung des Sinterprozesses in Hinblick auf die Temperaturführung und Atmosphären geschehen sollte.

Auch die Ausheilung von Oberflächendefekten kann zu einer Festigkeitssteigerung von spritzgegossenen Mikrobauteilen führen. Im Teilprojekt A3 „Prototypenfertigung“ konnte gezeigt werden, dass durch eine gezielte Abstimmung der Feedstockzusammensetzung und des Entbinderungsprozesses eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften möglich ist. Diese Erkenntnisse sollten auf das Hochdruck-Spritzgießen übertragen und systematisch untersucht werden.

5.2.1.2 Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

AP 1: Dimensionierungsoptimierung von PIM Bauteilen

Die maximal erreichbare Bauteilgenauigkeit in Hinblick auf die Maß- und Geometrietreue stellt eine wichtige Größe für die industrielle Nutzbarkeit des Pulverspritzgießens dar. Um mögliche Einflussfaktoren zu untersuchen und eine signifikante Steigerung dieser Eigenschaften zu erreichen, wurde ein Werkzeugkonzept (Abb. 1) entwickelt, welches neben den maschinenseitig einzustellenden Parametern eine Variation der Angrussposition und Bauteillänge sowie die Kompression der Formmasse in der Kavität nach dem Einspritzvorgang ermöglicht. Möglich wird dies durch das Einbringen zweier in der Kavität verfahrbarer Kolben (Abb. 1, A), die durch ein System aus Elektromotoren (Abb. 1, B) und aufeinander gleitenden schießen Ebenen (Abb. 1, C, D) bewegt werden. Dieses System ermöglicht in Verbindung mit der Positionierung des Angusses in der Trennebene des Werkzeugs eine variable Positionierung der Anspritzpunkte entlang des Bauteils sowie die Realisierung unterschiedlicher Bauteillängen. Nach dem Einbringen der Formmasse kann durch ein Zusammenfahren der Kolben mit definierter Kraft Druck auf die Formmasse in der Kavität ausgeübt werden. Um eine möglichst exakte Vermessung der Bauteile mit den zur Verfügung stehenden Messmethoden zu gewährleisten wurde eine zylindrische Bauteilgeometrie mit 2 mm Durchmesser und, je nach Kolbenstellung, Längen von bis zu 40 mm gewählt.

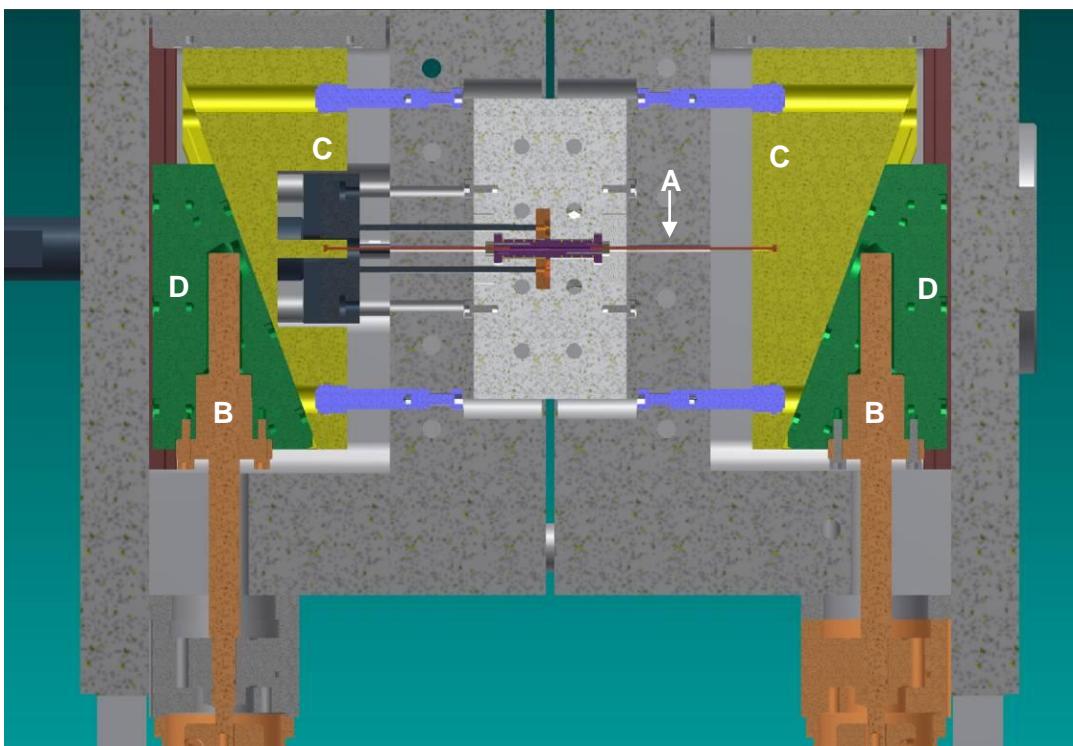


Abb.1: Schematische Skizze des Doppelkolbenwerkzeugs
(A = Kolben, B,C = schieße Ebene, D = Elektroantrieb).

Als zu verarbeitendes Material kam ein mit 50 Vol% ZrO_2 des Typs TZ-3YS-E (Tosoh Corp.) gefüllter Feedstock mit einem Bindersystem aus Polyethylen, Paraffinwachs und einem Dispergatorgehalt von $3,3 \text{ mg/m}^2$ Stearinsäure zum Einsatz. Für die prozessgerechte Auslegung des Werkzeuges wurde eine Simulation der

Formfüllung durchgeführt, bei der sich ein Angusskonzept mit vier Anspritzpunkten am Umfang des Zylinders (Abb. 2) als geeignet erwies.

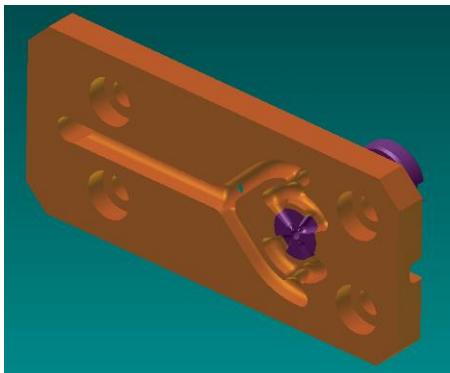


Abb.2: Zylindrisches Bauteil mit 4-Punkt Angussystem; CAD (links) und Grünling (rechts).

Nach Ermittlung der für eine gleichmäßige Formfüllung notwendigen Parameter wurden Bauteile unter Variation dreier Parameter gefertigt. Dabei wurden die Position des Angusses, die Werkzeugtemperatur und der durch die Kolben aufgebrachte Druck im Rahmen eines vollfaktoriellen Versuchplanes variiert (Tabelle 1).

Tabelle 1: Versuchsplan zur Optimierung der Maßhaltigkeit.

Versuchsnummer	Kolbendruck (%)	Angussposition	Werkzeugtemperatur (°C)
1	5,8	Bauteilmitte	50
2	19,5	Bauteilmitte	50
3	5,8	Bauteilende	50
4	19,5	Bauteilende	50
5	5,8	Bauteilmitte	60
6	19,5	Bauteilmitte	60
7	5,8	Bauteilende	60
8	19,5	Bauteilende	60

Um eine möglichst produktionsnahe Abbildung des Prozesses zu gewährleisten, wurden die Bauteile in einem vollautomatischen Prozess unter Zuhilfenahme eines vorhandenen Handlingmoduls gefertigt, wodurch sich der folgende Spritzgießzyklus ergibt:

1. Spritzen des Formteils;
2. Abkühlen;
3. Öffnen des Werkzeugs;
4. Auswerfen des Angussrestes;
5. Entformen des zylindrischen Bauteils durch den auswerferseitigen Kolben;
6. Ablegen durch Handlingsystem;
7. Schließen des Werkzeugs.

Zur Vermessung der Bauteile kam ein berührungsloses Messsystem zum Einsatz, bei dem das zu messende Bauteil zwischen einer Laserquelle und einer Sensorfläche positioniert wird (Abb.3, links). Durch den so entstehenden Schattenwurf kann der Durchmesser des Bauteil mit einer Wiederholgenauigkeit von ± 100 nm bestimmt werden. Die Durchmesser der produzierten zylinderförmigen Bauteile wurden im Grünlingszustand an mehreren Positionen und Winkelpositionen entlang des Fließweges vermessen (Abb. 3, rechts) und die Abweichungen vom gemessenen Mittelwert bestimmt und die Ergebnisse mit den eingestellten Parameterwerten korreliert.

Dadurch lassen sich aus den vorliegenden Ergebnissen folgende Erkenntnisse ableiten:

Die geringsten Abweichungen, bezogen auf alle gemessenen Werte am Bauteil, wurde mit der Parameterkombination „Mittige Angussposition“, „hohe Werkzeugtemperatur“ und „niedriger Kolbendruck“ erreicht (Tabelle 1, Versuch 5). Dabei ergibt sich selbst bei Betrachtung nur dreier Parameter über alle Versuche ein komplexes Bild aus Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der Maßhaltigkeit von den getätigten Einstellungen. Betrachtet man die erreichbaren Genauigkeiten über das gesamte Bauteil im Grünlingszustand (Abb. 4) in Abhängigkeit der drei Faktoren, so zeigt sich ein signifikanter Einfluss der Angussposition, nicht jedoch des Kolbendrucks und der Temperatur der Werkzeugwand. Allerdings zeigt sich bei näherer Betrachtung, dass auch die Werkzeugtemperatur insofern zu beachten ist, dass sich Wechselwirkungen mit der Angussposition zeigen (Abb. 5). Für einzelne Positionen am Bauteil lassen sich ähnliche Beziehungen erkennen,

eine allgemeine Aussage positiver oder negativer Auswirkungen der Parametereinstellungen ist nur sehr begrenzt möglich.

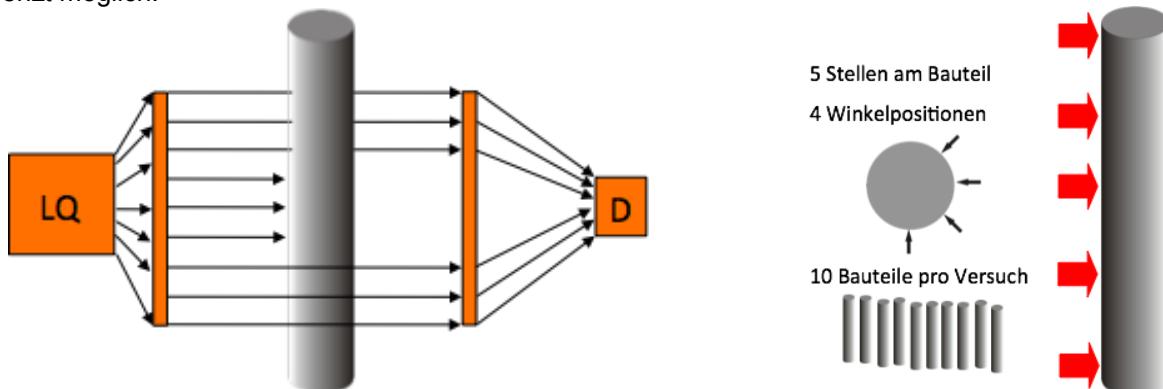


Abb. 3: Messmethode der gefertigten Prüfkörper.

Eine Zusammenfassung der an Grünlingen gemessenen Abweichungen ist in Tabelle 2 gegeben. Es wurden an einzelnen Positionen sehr gute Werte von kleiner als 0,05% relativer Standardabweichung erreicht, die besten Ergebnisse für das gesamte Bauteil wurden wie anfangs erwähnt mit dem Versuch 5 erreicht.

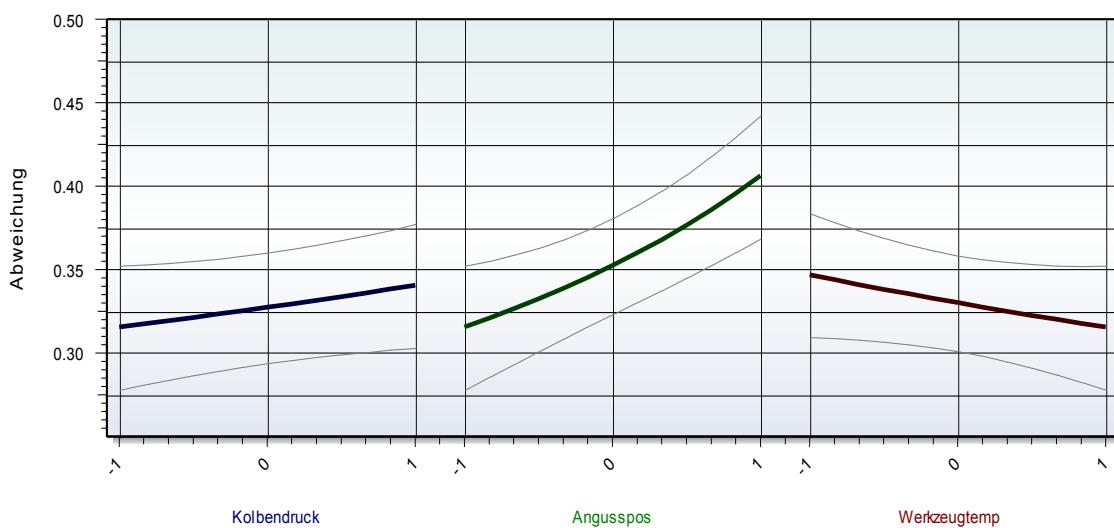


Abb.4: Einflüsse der varierten Parameter auf die Abweichung vom Mittelwert.

Die Grünlinge wurden im Anschluss an die Messungen zunächst in einem chemischen Entbinderungsschritt in n-Hexan bei 50°C für 8 Stunden teilentbindet, die übrigen Binderbestandteile wurden in einem dem Sinter vorgeschalteten thermischen Entbinderungsschritt bei 500°C entfernt. Der abschließende Sinterschritt wurde bei 1450°C und zwei Stunden Haltezeit durchgeführt. Auch die fertigen Sinterlinge wurden anschließend vermessen. Dabei zeigt sich, dass im Grünlingszustand vorhandene Schwankungen im Bauteildurchmesser im Sinter teil wiederzufinden sind, teilweise sind geringere Abweichungen der Durchmesserwerte vom Mittelwert erreicht worden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mittels des neuen Werkzeugkonzeptes sehr gute Maßhaltigkeiten spezifischer Bauteilmaße erreicht werden konnten. Eine allgemeine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere, kompliziertere Bauteilgeometrien ist aufgrund der komplexen Zusammenhänge aber nur teilweise möglich. Das erlangte tiefere Prozessverständnis kann allerdings bei der Auslegung zukünftiger Werkzeug- und Angusskonzepte genutzt werden, um schon im Vorfeld eine möglichst gleichbleibende und exakte Bauteilqualität zu gewährleisten.

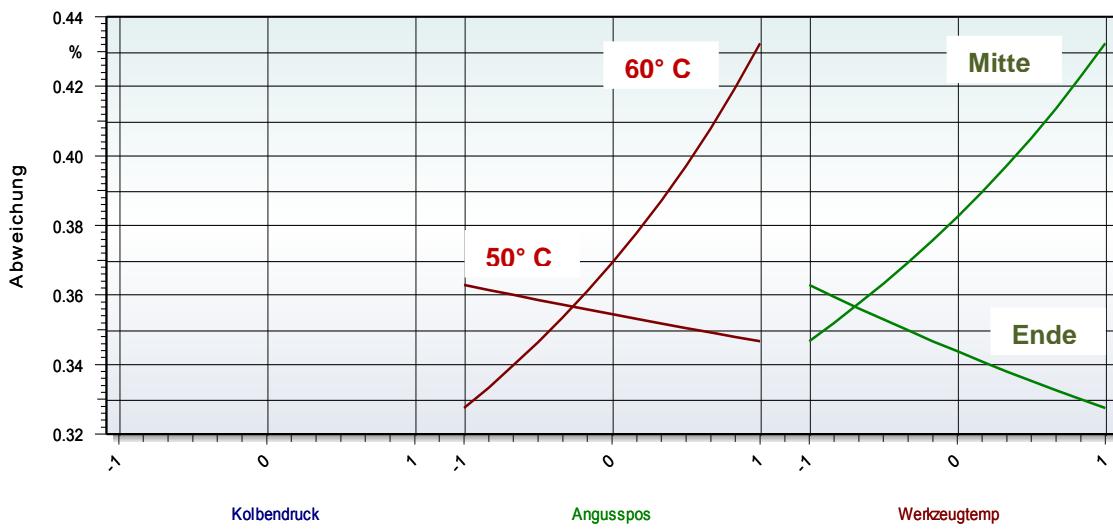


Abb.5: Wechselwirkungen der varierten Parameter untereinander.

Tabelle 2: Erreichte relative Abweichungen vom Mittelwert (Grünlinge).

Abweichungen (%)	Bauteilposition				
	Bauteilende düsenseitig	Zwischenmaß düsenseitig	Bauteilmitte	Zwischenmaß auswerferseitig	Bauteilende auswerferseitig
V1: M – 5,8% – 50°C	0,116	0,063	0,063	0,121	0,095
V2: M – 19,5% – 50°C	0,039	0,059	0,053	0,310	0,148
V3: E – 5,8% – 50°C	0,020	0,029	0,027	0,52	0,076
V4: E – 19,5% – 50°C	0,037	0,037	0,032	0,202	0,157
V5: M – 5,8% – 60°C	0,113	0,095	0,060	0,113	0,066
V6: M – 19,5% – 60°C	0,127	0,084	0,90	0,051	0,067
V7: E – 5,8% – 60°C	0,024	0,051	0,072	0,103	0,079
V8: E – 19,5% – 60°C	0,028	0,032	0,051	0,071	0,187

AP2: Einsatz weiterentwickelter, umweltfreundlicher Bindersysteme

Das Hochdruck-Pulverspritzgießen stellt besondere Anforderungen an Feedstocksysteme und insbesondere an die verwendete Binderkombination, die die Prozessierbarkeit der Formmasse bei deren Herstellung, der darauf folgenden Abformung und anschließenden Nachbehandlung der Grünlinge gewährleisten soll. Im TP B1 (AP 3) wurden unter Berücksichtigung der langjährigen Abformerfahrungen aus TP C1 mit dem Zirkonoxid-Pulver alternative Bindersysteme entwickelt und untersucht. Die wichtigste Zielsetzung war dabei, die Umweltbelastung während des chemischen Entbinderungsschritts zu minimieren. Hierfür wurde das wasserlösliche Polyethylenglykol PEG 4000 als Hauptkomponente des neuen Bindersystems gewählt. Damit die neuen Formmassen eine ausreichende Grünfestigkeit während der Entformung und Entbinderung aufweisen, wurde ein hochmolekularer Thermoplast wie Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Polyvinylbutural (PVB) dem Feedstock beigemischt. Wie im Ergebnisbericht von TP B1 dargestellt ist, wurden verschiedene PMMA- und PVB-Sorten auf deren Tauglichkeit für das MikroPIM untersucht (siehe TP B1, AP 3). Genauere Informationen zu den Eigenschaften der verwendeten Polymere wie z.B. Molekulargewichtsverteilung sind im Bericht des TP B1 aufgeführt.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Prozessierbarkeit der neuen Formmassen beim Spritzgiessen hinsichtlich verschiedener Kavitätsgeometrien, Binderzusammensetzung und des dabei maximal erreichten Pulverfüllgrads. Genauere Informationen zu den unterschiedlichen Rezepturen sind im Ergebnisbericht des TP B1 zu finden. Die Abformtests wurden an den Spritzgießmaschinen Mikrosystem 50 von Wittmann-Battenfeld mit einer Schließkraft von 50 kN durchgeführt. Bei den einfachen Geometrien konnte der Standard von 50 Vol% ZrO₂ aus den letzten Förderphasen für alle untersuchten Binderkombinationen in einem automatischen Betrieb und unter einer isothermen Prozessführung problemlos erreicht oder sogar übertroffen werden. Als schwierig hat sich die Mikrozugprobe erwiesen, da sie aufgrund ihrer komplizierten Geometrie variotherm abgeformt werden muss. Eine komplette Formfüllung war zwar gegeben, aber das Bauteil klebte stark an der Auswerferseite. Um den Grünling aus der Kavität entformen zu können, musste er auf 20-30°C gekühlt werden, was zu langen Prozesszeiten von über 5 Minuten führte.

Nach der erfolgreichen Formgebung schließt der Entbinderungsschritt an. Dieser hat einen grundlegenden Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften des gesinterten Bauteils sowie die Bauteilpräzision, da eine ungeeignete Prozessführung eine Ausbildung von Blasen, Rissen, Abplatzungen oder ähnlichen Defekten verursachen kann. Der Einsatz von neuen Polymeren für ein teilwasserlösliches Bindersystem erforderte eine systematische Neuentwicklung des Entbinderungsverfahrens. Hierfür wurde der Einfluss der Temperatur des Lösungsmittels sowie der Immersionszeit auf den entfernten Binderanteil und die Formstabilität der Grünlinge untersucht. Abbildung 6 zeigt den Verlauf des Massenverlustes einer Tribologiescheibengeometrie während deren Auslagerung in de-ionisiertem Wasser. Da die restlichen Binderbestandteile wie PVB und Stearinsäure in Wasser nicht löslich sind, wurde der Massenverlust auf den ursprünglichen PEG 4000-Anteil relativiert. Während im Falle des Rezeptes I (Abb. 6, links) der Einfluss der Wassertemperatur deutlich zu erkennen ist, zeigen die mit dem Rezept II hergestellten Proben einen von der Temperatur unabhängigen Verlauf (Abb. 6, rechts), wobei die Kurven bereits nach zwei Stunden 90% erreichen und sich dann einem konstanten Wert annähern. Die Abnahme des entfernten PEG 4000-Anteils lässt sich auf die Präsenz der PVB-Moleküle im Binder zurückführen. Seine stark polaren Acetyl-, Hydroxyl- und Butyralgruppen können durch die van-der-Waals-Kräfte Wassermoleküle anziehen und anlagern. Die Folgen sind das Aufquellen von PVB in der Probe und eine dadurch bedingte sterische Blockade der Basiskomponente während des flüssigen Entbindens. Dieser Effekt wird bei den höher werdenden Temperaturen bzw. mit der zunehmenden PVB-Konzentration im Binder (Rezept 1) stärker. Betrachtet man nun die Formstabilität, stellt man starke Deformationen in Form von Blasen und Rissen auf den Probenoberflächen fest, wobei diese von 40°C auf 50°C zunehmen. In Abbildung 7 sind exemplarisch drei Triboscheiben nach 2 Stunden Entbinderungszeit bei 50 °C dargestellt. Aufgrund der niedrigeren PVA-Restgehalte weisen die mit PVB B 30 HH hergestellten Proben wesentlich wasserbeständigere Eigenschaften auf (siehe TP B1). Die beste, defektfreie Formstabilität konnte bei Raumtemperatur unabhängig von der eingesetzten PVB-Sorte beobachtet werden.

Tabelle 3: Überblick über die Prozessierbarkeit der neuen Formmassen beim Spritzgiessen für verschiedene Testgeometrien.

Testgeometrie	Bindersystem		
	PMMA-PEG-Rezept II	PVB-PEG-Rezept I	PVB-PEG-Rezept II
Tribologische Scheiben	AA: 50 ^{1,2} – 52,5 Vol% ³	AA: 50 Vol % ^{4,5}	AA: 55 Vol % ⁴
Mikrobiegebalken	AA: 50 Vol % ¹	nicht getestet	AA: 55 Vol % ⁴
Getriebe-Gehäuse	HA: 50 Vol % ¹	50 Vol % ⁴	AA: 50 Vol % ⁴ , HA: 52, 5Vol % ⁴
Mikrozugprobe	FF: 50 Vol % ¹	nicht getestet	FF: 55 Vol % ⁴

AA: Automatisches Abformen, HA: Halbautomatisches Abformen; FF: Formfüllung. 1: PMMA Aldrich. 2: PMMA Granulat.. 3: PMMA Quinn Acryl. 4: PVB B 30 H. 5: PVB B 30 HH, PVB B 45 H und PVB B 60 H.

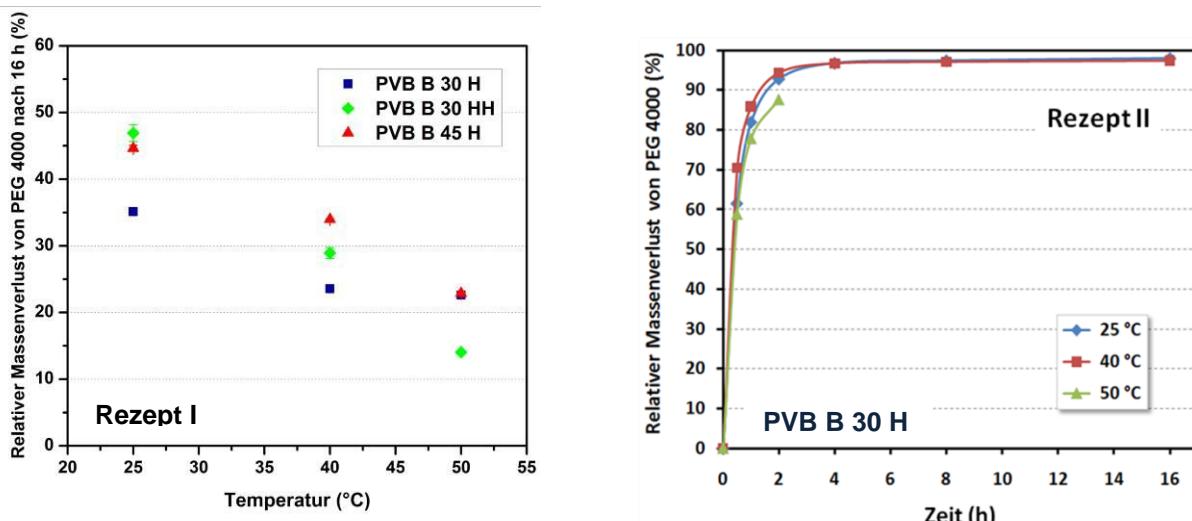


Abb. 6: Ergebnisse der chemischen Vorentbinderung von Tribologiescheiben in Wasser in Abhängigkeit der Temperatur, Immersionsdauer, PVB-Art und des Compoundierrezeptes (I-links, II-rechts). Der Pulvergrad der Proben betrug 50 Vol % TZ-3YS-E und die Dispergatorkonzentration 4,4 mg/m².

Die Ergebnisse zu den PMMA-PEG basierten Formmassen werden im Weiteren nicht detailliert betrachtet, da dem PVB-PEG-Rezept II-Bindersystem ähnliche Beobachtungen gemacht wurden.

Um ein geeignetes Programm für das thermische Entfernen der restlichen Binderbestandteile zu finden, wurden die Einzelkomponenten (PVBs bzw. PMMAs und Stearinsäure) in einer thermogravimetrischen Analyse untersucht. Daraus ergaben sich drei Temperatur-Plateaus für den zweiten Entbinderungsschritt, die in

Tabelle 4 mit dem anschließenden Sinterprogramm zusammengefasst sind. In Rahmen der Arbeiten dieses Arbeitspaket wurde der Einfluss des chemischen Entbinderungsschrittes auf das Sinterverhalten von keramischen Formmassen auf Basis der neu entwickelten Bindersysteme untersucht. Die Bestimmung der Dichte wurde an den tribologischen Scheiben durchgeführt. Tabelle 5 fasst die absoluten Sinterdichten für unterschiedliche Gerüstpolymere und Compoundierrezepte am Beispiel der mit 50 Vol % gefüllten TZ-3YS-E-Formmassen zusammen. Es ist kein wesentlicher Unterschied in der Sinterdichte nach dem chemischen Entfernen von PEG 4000 zu erkennen. Alle restlichen Binderbestandteile lassen sich anschließend im Ofen thermisch vollständig entfernen, woraus eine lückenfreie Verdichtung der Bauteile während des Sinterns resultiert. Dagegen kann ein deutlicher Einfluss der Rezeptes II im Falle einer rein thermischen Binderentfernung beobachtet werden, die Proben zeigen hier um etwa 2,5% höhere Werte.



Abb. 7: Aufnahmen der Testscheiben nach 2 Stunden Entbinderungsdauer im Wasser bei 50 °C.

Tabelle 4: Parameter für das thermische Entbinden und Sintern der auf TZ-3YS-E basierten Feedstocks. In den Klammern sind die Temperatur-Plateaus zu dem PMMA haltigen Bindersystem angegeben.

	Schritt	Temperatur (°C)	Heiz/Kühl-Rate (°C/min)	Haltezeit (min)
Thermisches Entbinden	Aufheizen	220 (250)	0.5	
	Halten	220 (250)		30
	Aufheizen	350 (320)	0.5	
	Halten	350 (320)		30
	Aufheizen	450 (380)	0.5	
	Halten	450 (380)		30
	Aufheizen	500	2	
	Halten	500		30
	Aufheizen	1450	5	
	Halten	1450		60
Sintern	Abkühlen	Raumtemperatur	5	

Tabelle 5: Vergleich der resultierenden Sinterdichte bei Verwendung von verschiedenen Gerüstpolymeren und Compoundierrezepten. Die restlichen Binderbestandteile beinhalteten PEG 4000, 4,4 mg/m² Stearinsäure als Dispergator und Ascorbinsäure als Antioxidationsmittel.

Gerüstpolymer		Dichte (g/cm ³) ¹	
		mit flüssiger Vorentbinderung	ohne flüssige Vorentbinderung
Rezept I	PVB B 30 H	6,04	5,96
	PVB B 30 HH	6,05	5,95
	PVB B 45 H	6,06	5,96
	PVB B 60 H	6,06	5,96
Rezept II	PVB B 30 H	6,08	6,10
	PMMA Granulat	6,07	5,97
	PMMA Aldrich	6,08	6,01
	PMMA Quinn Acryl	6,03	6,03

1: Die theoretische Sinterdichte von TZ-3YS-E beträgt 6,10 g/cm.

Der relative Messfehler der betrachteten Werte liegt zwischen 0,8-1,0%.

Bei den Untersuchungen zum chemischen Entbinderungs- und Sinterverhalten der neuen Formmassen konnten ebenfalls einige Probleme festgestellt werden. Ein Hinweis auf mögliche Entmischungseffekte wurde bei den auf PVB basierten Feedstock gefunden. Abbildung 8 zeigt ein Getriebegehäuse, das mit einem 55 Vol% haltigen Zirkonoxid-Feedstock realisiert wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass der flüssige Vor-entbinderungsschritt zu Defekten in Form von Abplatzungen in der Angussnähe sowie der Zahnkranz-Struktur führt. Offenbar kommt es zum Trennen von PEG während des Prozessierens, wobei sich die Moleküle aufgrund der verwendeten Bauteilgeometrie in den oben erwähnten Probensegmenten konzentrieren. Das anschließende chemische Entfernen von PEG hinterlässt Hohlbereiche im Bauteil, die ein vollständiges Sintern der Pulverpartikel verhindern. Dahingegen weisen die nur rein thermisch entbinderten Proben ein defektfreies Sinterverhalten aus, das zu dichten Endprodukten führt.

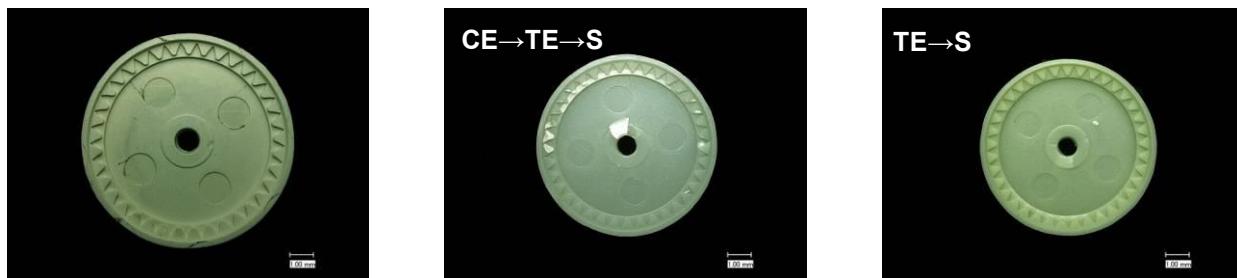


Abb. 8: Getriebegehäuse als Grünlings (links) und gesintertes Bauteil (mitte, rechts). Die dabei verwendete Formmasse bestand aus 55 vol% TZ-3YS-E und einem auf PVB B 30 H-PEG 4000 basierten Bindersystem. Die benutzten Abkürzungen bedeuten: CE: chemisches Entbindern, TE: thermisches Enbindern, S: Sintern.

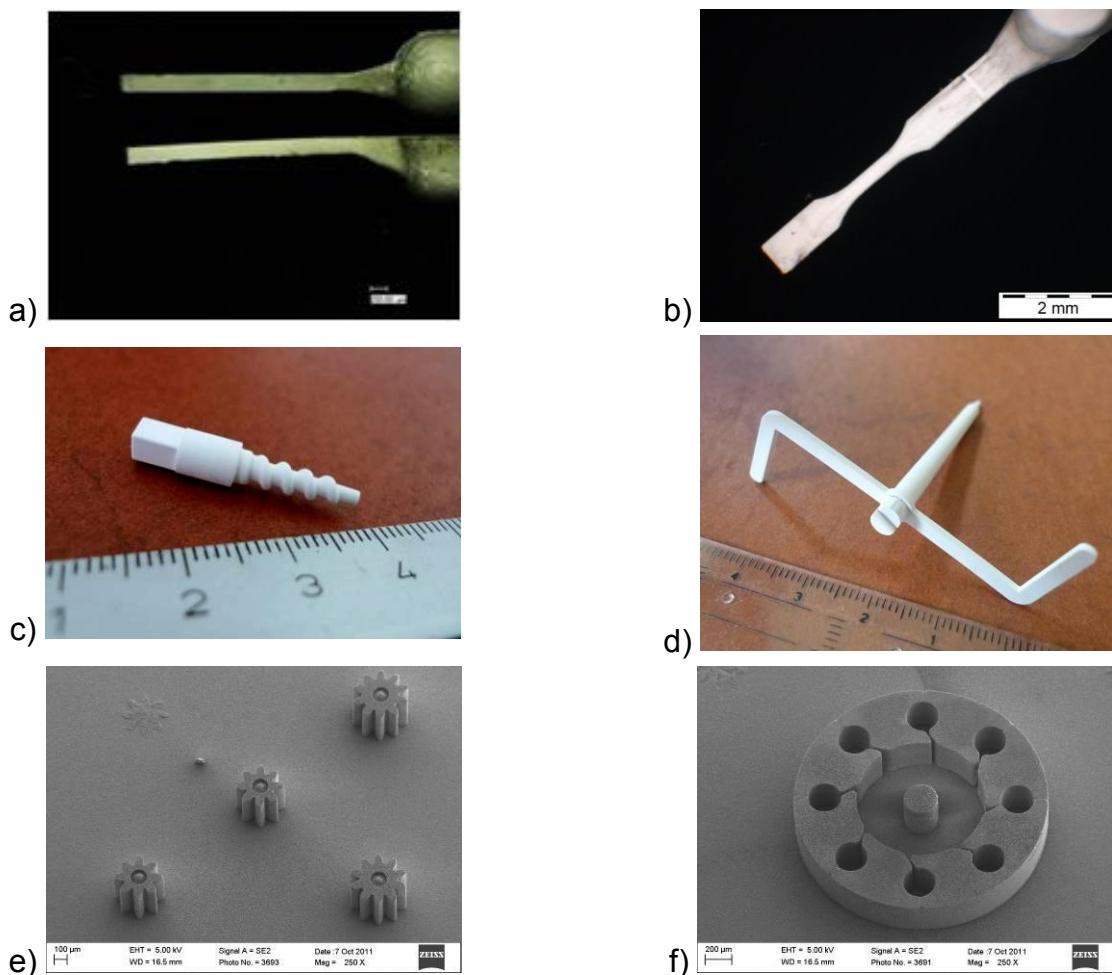


Abb. 9: Unterschiedliche Probengeometrien aus ZrO_2 , die mit dem teilwasserlöslichen PVB-PEG-Bindersystem realisiert wurden: a) Mikrobiegebalken mit einem Querschnitt von $260 \times 260 \mu\text{m}$, b) Mikrozugprobe mit einer Dicke von $130 \mu\text{m}$, c) Dispenserschnecke sog. 1. Design, d) Umlenkung, e) und f) Mikrozahnrad bzw. Mikrodüsenplatte mittels Röntgen-LIGA-Formeinsatz (2. Förderphase).

Durch die oben beschriebenen Untersuchungen war es nun möglich, ein Standardbindersystem für ZrO_2 -Formmassen zu definieren, deren Herstellung prozesssicher und reproduzierbar auch über größere Extrusionschagen hinweg möglich war. Der verarbeitete Pulverfüllgrad konnte entsprechend den Anforderungen an die Bauteilgeometrie und Anwendung zwischen 50 und 52,5 Vol% eingestellt werden. Als Binderkonstellation wurden PVB B 30 H, PEG 4000 und 4,4 mg/m² Stearinsäure als Dispergiermittel gewählt, wobei die Fließeigenschaften der Formmasse durch das Rezept I oder II gezielt beeinflusst werden konnten.

Um das mögliche Potential des neuen Bindersystem umfassend zu charakterisieren, wurden neben den Abformversuchen an den Bauteilen mit Strukturdetails von einigen Mikrometern (Abb. 8 sowie Abb. 9a und 9b)

Spritzgießtests mit diversen Geometrien an den Spritzgießmaschinen mit Schließkräften von 500 kN durchgeführt. Dabei konnten Bauteile mit eher makroskopischen Dimensionen wie eine mit dem Ausdrehprinzip entformte Dispenserschnecke (Abb. 9c) oder rechtwinklige Umlenkung (Abb. 9d) realisiert werden. In beiden Fällen sind auf Seite der Formmassenentwicklung hohe Anforderungen an die Fließeigenschaften, homogene Verarbeitungsschwindung und die Grünfestigkeit für eine zerstörungsfreie Entformung gestellt, welche das neue Bindersystem auch für Formmassen mit um 2,5 vol% höheren Füllgraden (verglichen mit dem Standard-Feststoffanteil) einwandfrei erfüllt. Darüber hinaus konnten im Gegensatz zu einem wachsbasierten Binder feinste Strukturdetails über einen mittels LIGA-Technik hergestellten Formeinsatz reproduzierbar und defektfrei realisiert werden. So beträgt beispielsweise der Außendurchmesser eines Mikrozahnrades 366 µm bei einer Höhe von 350 µm (Abb. 9e) sowie die kleinste Breite der Düsenkanäle (Abb. 9f) 10 µm mit einem Aspektverhältnis von 35.

AP3: Untersuchungen zur Minimierung von Entmischungsverhalten von PIM-Feedstocks

Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket wurden zusammen mit dem TP B1 geplant und durchgeführt. Aus Platzgründen sind detaillierte Ergebnisse im Abschlussbericht des TP B1 aufgeführt.

AP4: Mikrospezifische Optimierung der Sintergefüge

Bereits in vergangenen Förderphasen kam der Edelstahl des Typs 17-4PH mit einem d_{50} -Wert von 3-4 µm (Fa. Sandvik Osprey) als metallischer Werkstoff zum Einsatz. Die dabei durchgeführten Versuche zur Optimierung der Werkstoffgefüge konzentrierten sich aufgrund der erst zum Ende der letzten Phase verfügbaren verbesserten Ofentechnik auf wenige Tests zur thermischen Prozessführung während des Sinterschritts.

Zusätzlich zu einer weiteren Variation der Sinterzeiten wurden in der vergangenen Förderperiode auch die Heizraten während der thermischen Entbinderung sowie verschiedene Atmosphären und Restdrücke im Ofen während des Sinters betrachtet. Als Probekörper kamen dabei makroskopische Triboscheiben zum Einsatz, an denen mittels geätzter Schritte Gefügeuntersuchungen durchgeführt wurden. Eine weitere verwendete Probengeometrie waren Mikro-Zugproben, an denen in Zusammenarbeit mit Teilprojekt D2 mechanische Festigkeiten in Abhängigkeit der eingestellten Parameter ermittelt wurden.

Im Entbinderungsschritt wurde die Heizrate in den vier Stufen 1; 1,5; 2 und 3 K/min variiert, der Sinterschritt wurde konstant mit einer Heizrate von 15 K/min durchgeführt. Dabei zeigte sich bei schnellen Heizraten eine deutliche Blasenbildung durch den zu schnellen Übergang der Binderkomponenten in die Gasphase (Abb. 10). Die Sinterdauer wirkt sich, wie in der vorherigen Phase bereits gezeigt wurde, auf das sich ausbildende Gefüge aus. Während sich bei einer kurzen Haltezeit von 1 min zwar eine sehr geringe mittlere Korngröße von ca. 10 µm einstellt (Abb. 11, links), verbleibt ein hoher Anteil von inter- und intragranularen Poren im Gefüge, die sich negativ auf die mechanische Belastbarkeit der so produzierten Bauteile auswirken. Im Fall der langen Sinterhaltezeit von 120 min kann insbesondere die Zahl der intergranularen Poren verringert werden (Abb. 11, rechts), allerdings stellt sich eine mittlere Korngröße > 40 µm ein, was beim Einsatz im Mikrobereich eine zu grobe Kornstruktur darstellt. Eine Haltezeit von 30 min liefert hingegen einen guten Kompromiss zwischen ausreichender Bauteildichte (Tab. 6) und kleiner Korngröße (Abb. 11, Mitte). Obwohl die Sinteratmosphäre (Gasart, Durchflussrate und Restdruck) in einem sehr breiten Spektrum variiert wurde, zeigten sich bei der Charakterisierung der Proben nur geringe Unterschiede.



Abb. 10: Blasenbildung bei schnellen Heizraten während der thermischen Entbinderung.

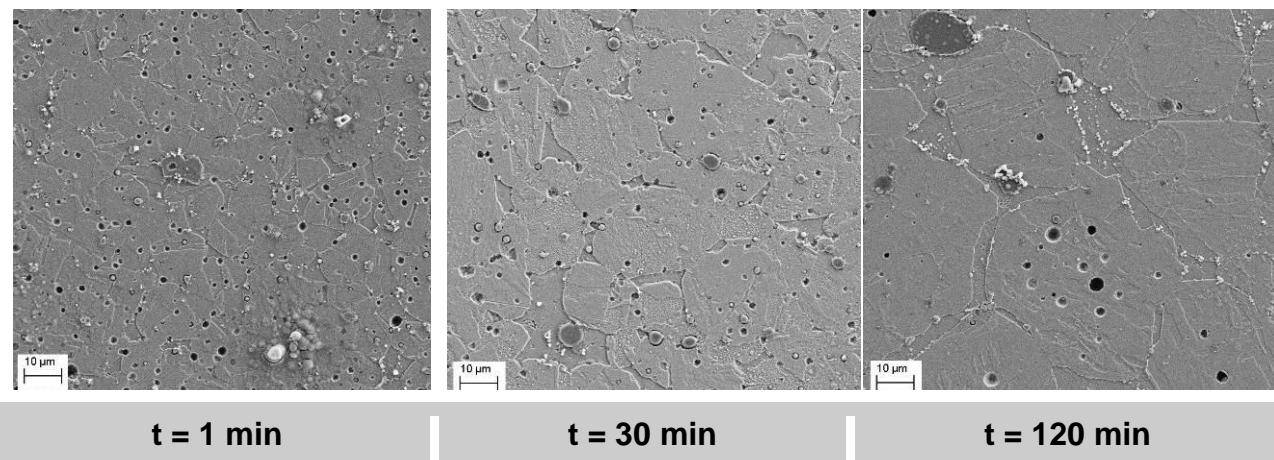


Abb. 11: Einfluss der Sinterhaltezeit auf das Korngefüge in pulverspritzgegossenen 17-4PH Stahlproben.

Bei der Betrachtung der mechanischen Eigenschaften (Tab. 6) fällt auf, dass sich die Festigkeitswerte von den in der Literatur zu findenden (> 800 MPa ja nach Art der Wärmebehandlung) teils deutlich unterscheiden. Dies ist in erster Linie auf den größeren Einfluss eingeschlossener Poren zurückzuführen, die im Vergleich zu makroskopischen Proben im sehr kleinen Prüfquerschnitt ein entsprechend großes Volumen besetzen.

Tabelle 6: Mechanische Eigenschaften pulverspritzgegossener 17-4PH Bauteile.

Sinterdauer [min]	1	30	120
Dichte [g/cm ³]	7,52	7,56	7,56
Porosität [%]	0,90	0,75	0,70
Zugfestigkeit [MPa]	760	836	873
rel. Dehnung bis Versagen [%]	7,13	7,87	5,58

Insgesamt konnte der bisher bestehende thermische Prozessschritt durch die Untersuchungen deutlich verkürzt werden ohne dabei eine Verschlechterung der Bauteilqualität in Kauf nehmen zu müssen.

AP5: Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch gezielte Ausheilung von Oberflächendefekten

Während der dritten Förderphase wurden im Teilprojekt A3, Prototypenfertigung, durch Niederdruckspritzgießen hergestellte keramische Biegeproben auf deren Festigkeit untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen der während der thermischen Entbinderung auftretenden Verrundung der Kanten und Ausheilung von Defekten der Probenoberfläche auf die erreichbaren mechanischen Kennwerte besteht.

Durch eine Modifikation des bestehenden Polyolefin-Wachs-Binders sollten diese Erkenntnisse auch auf das Hochdruckspritzgießen übertragen werden. Dazu wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt B1 die Einflüsse der Binderzusammensetzung auf die Verrundung der Kanten und Festigkeit untersucht.

Variiert wurde dabei das Verhältnis Polyolefin:Wachs sowie der Dispergatortyp und -gehalt. Als zu untersuchende Geometrie kam eine Mikrobiegeprobe mit 260 μm Dicke und 3,25 mm Gesamtlänge zum Einsatz.

Da die im Hochdruckspritzgießen mit dem Polyolefin-Wachs-Bindersystem hergestellten Proben im Gegensatz zu den im Niederdruckspritzgießen gefertigten üblicherweise in einem zweistufigen Prozess entbindert werden, wurde der Einfluss des Entbinderungsschrittes ebenfalls untersucht. Die abgeformten Biegeproben wurden zum Einen erst chemisch und anschließend thermisch, und zum Anderen rein thermisch entbindert. Während der rein thermischen Entbinderung wurden Veränderungen der Probenoberfläche mittels einer mit einer Kamera ausgestatteten Versuchsanordnung beobachtet. Dabei ist im Bereich des Schmelzpunktes der Wachskomponente eine deutliche Glättung der Probenoberfläche zu erkennen (Abb. 12), die sich im weiteren Verlauf der Entbinderung teilweise wieder verliert.

Die auf diese Weise prozessierten Biegeproben wurden in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt D3 mit dem im SFB499 entwickelten 3-Punkt-Biegeversuchsstand für Mikrogeometrien auf ihre Festigkeit untersucht. Die Einflüsse der jeweiligen Feedstockzusammensetzung und Entbinderungsart sind in den Abbildungen 13 und 14 dargestellt. Ein signifikanter Einfluss der Stearinsäurekonzentration ist bei Formmassen mit Stearinsäure als Dispergator nur bei Proben des zweistufigen Entbinderungsprozesses erkennbar. Da die ungesättigten Fettsäuren sowohl in Paraffin als auch Polyethylen vollständig löslich sind, kommt es zu einer homogenen

Verteilung der Moleküle in der Pulver-Binder-Matrix und somit zu einer direkten Wechselwirkung mit der Pulveroberfläche. Die niedrigeren Viskositäten mit erhöhtem Dispergatorgehalt begünstigen die Bildung eines dünnflüssigen Films auf der Oberfläche der Biegeproben während der Abformung, wodurch wiederum eine Mobilität der oberflächennahen Partikel erleichtert und die Defektausheilung verbessert wird. Bei einer rein thermischen Entbinderung kommt dieser Effekt aufgrund der homogenen Erwärmung im gesamten Probenvolumen weniger stark zur Ausprägung, was sich in starken Schwankungen ohne erkennbare Tendenzen in den gemessenen Festigkeitswerten äußert. Formmassen mit Brij72 als Dispergator zeigen einen gegenläufigen Trend. Mit steigendem Dispergatorgehalt werden tendenziell niedrigere Festigkeiten erreicht. Dies ist durch die Desorption der Brij-Moleküle nach der Formgebung zu erklären, welche eine Erhöhung der Viskosität und eine geringere Möglichkeit der Defektausheilung durch rein thermische oder chemische Behandlungsmethoden bedingt.

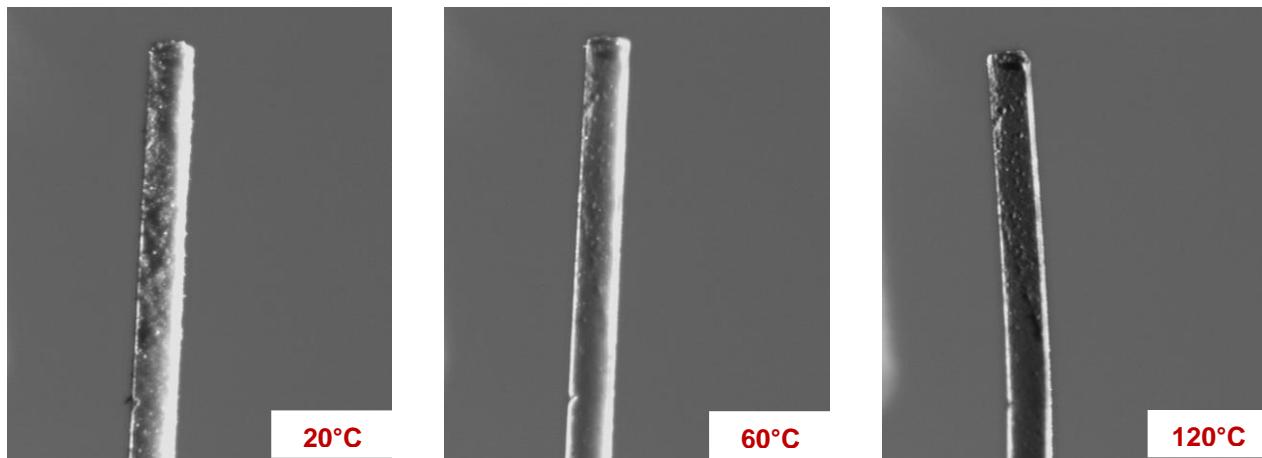


Abb. 12: Veränderung der Probenoberfläche während der therm. Entbinderung.

Es zeigt sich, dass sich alle gemessenen Werte in einem für das Zirkoniumoxid typischen Bereich bewegen. Es wurden mechanische Festigkeiten von bis zu 1500 MPa erreicht, was deutlich unter den Werten liegt, die mit den im Niederdruckspritzgießen hergestellten Proben im TP A3 erreicht wurden. Dabei ist jedoch anzumerken, dass die Geometrie der im Hochdruckspritzgießen hergestellten Proben im Grünlingszustand sehr scharfe Kanten aufweist, was wie an den verrundeten Proben im Teilprojekt A3 gezeigt wurde einen wesentlichen Einfluss auf die erreichbare Festigkeit hat. Die Vermessung der Kantenverrundung bestätigt, dass durch das Aufschmelzen der Wachskomponente zwar eine kurzzeitige Verbesserung der Probenoberfläche erreicht wird, eine Kantenverrundung wird jedoch durch die zusätzliche höhermolekulare Komponente im Binder verhindert. So ergeben sich an gesinterten Proben immer noch scharfe Kanten mit Radien um 1-2 µm. Diese verhindern eine deutliche Steigerung der erreichbaren Festigkeit.

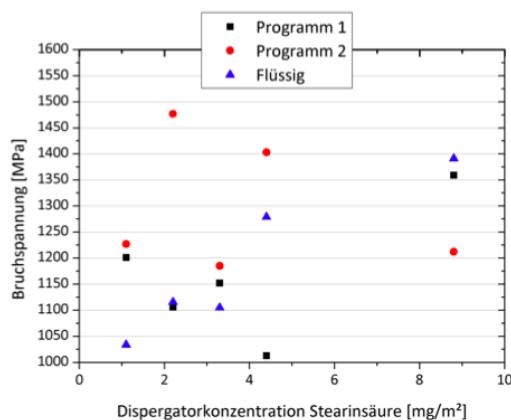


Abb.13: Bruchspannung Mikrobiegeproben mit Stearinsäure.

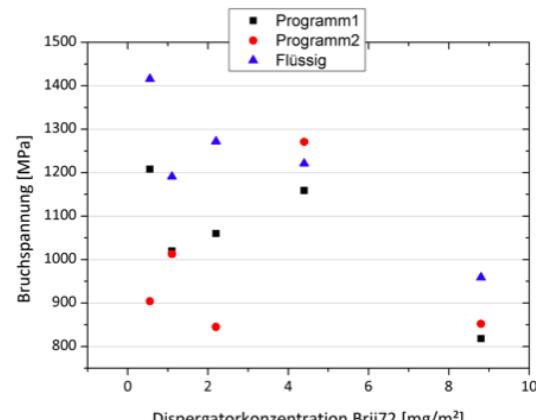


Abb.14: Bruchspannung Mikrobiegeprobe mit Brij72.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass sich in den durchgeführten Versuchen nur eine geringe Verbesserung der mechanischen Kennwerte keramischer Mikrobiegeproben gezeigt hat. Das im Niederdruckspritzgießen angewandte Prinzip der Ausheilung von Oberflächendefekten und Verrundung der Kanten ist durch den

hohen Anteil der hochmolekularen Binderbestandteile in Formmassen für das Hochdruckpulverspritzgießen nach derzeitigem Stand nur bedingt anwendbar.

AP6: Herstellung von Probekörpern und Demonstratorkomponenten sowie Durchführung von Testabformungen

Im Rahmen des Teilprojekts C1 wurden verschiedene Bauteilgeometrien abgeformt, die anderen Teilprojekten für die dort durchzuführende Charakterisierung zu Verfügung gestellt wurden. So wurden für das Teilprojekt C2, Mikrogießen, Bauteile aus Kunststoff für das Gießen mit verlorenen Formen, sowie keramische Bauteile für den Verbundguss gefertigt. Das TP Z3 wurde u.a. bei der Herstellung von keramischen und metallischen Scheiben für TP D3 zur Untersuchung der Verschleißfestigkeit mittels tribologischer Tests unterstützt. Ferner wurden keramische Biege- und metallische Zugproben in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt D2 auf erreichbare Festigkeiten untersucht. Für den Demonstrator „Mikroturbine“ der vierten Förderphase wurden in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten A1 und Z3 Formeinsätze für Leit- und Laufrad entwickelt, die Formfüllung simuliert und keramische Bauteile gefertigt.

5.2.1.3 Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Bei der Konzeption des Werkzeuges zur Untersuchung der Maßhaltigkeit waren mehrere Probleme zu lösen. Es musste ein möglichst verlustfreier Antrieb für die Kolben gefunden werden, gleichzeitig musste eine sehr hohe Positioniergenauigkeit derselben gewährleistet werden. Die Abtrennung des Angussystems musste ohne hohe Kräfte auf den Grünling geschehen, um einen Einfluß auf die Bauteilgeometrie zu verhindern. Weiterhin war eine Temperierung entlang der zylindrischen Kavität zu integrieren um ein Temperaturprofil entlang des Bauteils einzustellen.

Für den Einsatz der neu entwickelten Feedstocks auf Basis eines wasserlöslichen Bindersystems waren die entsprechenden Abformparameter sowie Entbinderungs- und Sinterregime zu entwickeln. Dabei mussten die besonderen Eigenschaften wie veränderte Temperatureinflüsse und Grünlingsfestigkeiten in Betracht gezogen werden. Die ausführlichen Arbeiten im TP B1 (Viskositätsmessungen, DSC-Analysen) erwiesen sich dabei als sehr hilfreich.

Die Untersuchung der Entmischungerscheinungen wurde ebenfalls in enger Zusammenarbeit mit dem TP B1 durchgeführt. Dabei erwies sich die Auflösung der sehr kleinen Partikel mittels CT und anschließender Bildverarbeitung der enormen Datenmengen als schwierig. Zurzeit ist eine entsprechende Auswertung und Interpretation der Ergebnisse nur mit sehr hohem personellem Aufwand möglich, eine entsprechende Software-seitige Lösung besteht nicht.

Die erwünschte Festigkeitssteigerung pulverspritzgegossener Mikrobauteile konnte nur in begrenztem Maß erreicht werden. Der im Vergleich zum Niederdruckspritzgießen komplexere Aufbau des Bindersystems mit der zusätzlichen, höhermolekularen Komponente verringert die Auswirkungen der rein thermischen Entbindungen und limitiert den Einfluss auf evtl. Defekte nach dem Spritzgießen.

Bei der Herstellung der Demonstratorkomponenten lag die wesentliche Schwierigkeit in der sehr komplexen Geometrie der Leit- und Laufräder. Dies erforderte ein kompliziertes Werkzeugkonzept mit gegeneinander rotierbaren Formeinsätzen, die ihrerseits mit sehr kleinen Toleranzen gefertigt werden mussten, um eine exakte Positionierung und ein formschlüssiges Verbinden der Formeinsatzhälften während des Abformprozesses zu gewährleisten.

5.2.1.4 Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Das TP C1 war aufgrund der zentralen Rolle stark mit anderen Teilprojekten verknüpft.

Mit dem TP A1 erfolgte ein Austausch bzgl. PIM-gerechter Konstruktion, insbesondere bei der Auslegung der Demonstratorbauteile Leit- und Laufrad. Die Ausheilung von Oberflächendefekten und die damit verbundenen Faktoren wie Prozessführung, Pulver- und Bindercharakteristika waren enge Verbindungspunkte und Gegenstand intensiven Informationsaustauschs mit dem TP A3. Eine enge Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt B1 bei der Entwicklung umweltfreundlicher Bindersysteme, der Untersuchung von Entmischungerscheinungen und der Optimierung der Prozessparameter bestand über die gesamte Dauer der zurückliegenden Förderphase. Für das Mikrogießen (TP C2) wurden Kunststoffmodelle für die anschließende Verwendung als Urmodelle abgeformt. Mit den Teilprojekten C3 und C5 bestand ein ständiger Austausch über Prozessdaten, sowohl für den Abform- als auch für die Entbinderungs- und Sinterprozesse. Gemeinsam mit den Teilprojekten D1, D2 und D3 wurden an den durch das TP C1 hergestellten Testkörpern die Ermittlung der Prozess-Gefüge-Eigenschaftsbeziehung durchgeführt und als Rückkopplung die gewonnenen Erkenntnisse in den Abformprozess übernommen. Darüber hinaus war das Teilprojekt C1 am Aufbau des Zentrums

für integrierte Mikrofertigung (ZIM) sowie den Arbeitskreisen „Formeinsätze“, „Dimensionierungskonzept“ und „Qualitätssicherung“ beteiligt.

5.2.1.5 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Aufgrund der enormen wirtschaftlichen Möglichkeiten werden weltweit Arbeiten zum Thema MicroPIM durchgeführt. Die Arbeiten des Teilprojektes C1 decken dabei die gesamte Prozesskette unter spezieller Fokussierung auf wissenschaftlich und industriell besonders interessante Teilbereiche ab. So werden im Gegensatz zu anderen Instituten wesentlich komplexere und kleinskaligere Bauteile untersucht. Zum Thema der Maßhaltigkeit wurde neben den Arbeiten am IAM-WPT trotz der enormen Bedeutung nur wenig publiziert. Die Arbeiten fokussieren sich dabei auf Einflüsse der Pulvermorphologien (Penn State University), der Werkzeugtechnik (Taisei Co, Osaka) und der Feedstockzusammensetzung (Fa. Schunk, Gießen). Dabei wurden tendenziell schlechtere Toleranzen als mit dem speziell konstruierten Doppelkolben-Werkzeug erreicht. Die enge Zusammenarbeit im Rahmen des SFB ermöglicht zudem die Kombination verschiedener Abformtechnologien (2K-PIM, Sinterfügen, Verbundguss) welche in anderen Forschungsverbünden nur begrenzt bzw. gar nicht zur Verfügung stehen. Zusätzlich erlaubt die Möglichkeit, auf verschiedene Arten der Formeinsatzfertigung zurückzugreifen, eine Diversität bei der Untersuchung entsprechender Formeinsätze, die nur wenige Institute weltweit vorweisen können. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal ist der Einsatz verschiedener metallischer und keramischer Werkstoffe, was an anderen Forschungsinstituten nicht oder in geringerem Ausmaß stattfindet.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

5.2.2.1 Publikationen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung

- [1] Tobias Mueller, Volker Piotter, Klaus Plewa, Markus Guttmann, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Jürgen Haußelt: Ceramic micro parts produced by micro injection molding: latest developments; *Microsystem Technologies*, 16 (2010) S. 1419-1423
- [2] Albert Albers, Tobias Deigendesch, Tarak Turki, Tobias Mueller: Patterns for design in microtechnology; *Microsystem Technologies* , 16 (2010), S. 1537-1545
- [3] Volker Piotter, Werner Bauer, Regina Knitter, Markus Mueller, Tobias Mueller, Klaus Plewa: Powder injection molding pf metallic and ceramic microparts; *Microsystem Technologies*, 17 (2010), S. 251-263
- [4] Volker Piotter, Tobias Mueller, Klaus Plewa, Andreas Ruh, Elvira Vorster, Hans-Koachim Ritzhaupt-Kleissl, Jürgen Haußelt: Manufacturing of high-grade components by powder injection molding; *Key Engineering Materials*, 447-448 (2010) S. 351-355.
- [5] Volker Piotter, Tobias Mueller, Klaus Plewa, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Andreas Ruh, Jürgen Hausselt: One- and two-component micro powder injection moulding derived from thermoplastic microreplication; *Plastics, Rubber and Composites* 39 (2010) S. 287-292.
- [6] Volker Piotter, Thomas Hanemann, Richard Heldele, Marcus Mueller, Tobias Mueller, Klaus Plewa, Andreas Ruh: Metal and Ceramic Parts fabricated by Microminiature powder injection molding; *Intern. J. Powder Metallurgy* 46(2), (2010), S. 21-28
- [7] Thomas Hanemann, Kirsten Honnef, Tobias Mueller, Oxana Weber: New methacrylate-based feedstock systems for micro powder injection moulding; *Microsystem Technologies*, 17, (2011) S. 451-457, doi: 10.1007/s00542-011-1243-9
- [8] Thomas Hanemann, Richard Heldele, Tobias Mueller, Jürgen Haußelt: Influence of stearic acid concentration on the processing of ZrO₂-containing feedstocks suitable for micro powder injection molding; *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 8(4) (2011), S. 865-872, doi: 10.1111/j.1744-7402.2010.02519.x

5.2.2.2 Andere Publikationen

- [9] Volker Piotter, Tobias Mueller, Klaus Plewa, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Andreas Ruh, Elvira Vorster, Juergen Hausselt: Special Variants of Metal and Ceramic Micro Injection Molding; *International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials*, 18.-21.5.2011, San Francisco, Part 4, S.04-113 – 04-119.

- [10] Volker Piotter, Tobias Mueller, Klaus Plewa, Andreas Ruh, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Juergen Hausselt: MicroPIM – Present Status and Perspectives; Proceedings of EURO PM2009 Conference, Vol. 2, EPMA, ISBN 978 1 899072 07 1 (2009); S. 319-324.
 - [11] Volker Piotter, Tobias Mueller, Klaus Plewa, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Juergen Hausselt: Powder Injection Moulding for the Fabrication of Micro Components; Proceedings of PM2010 World Congress, Vol. 4, EPMA, ISBN 978 1 899072 132 (2010); S. 437-444.
 - [12] Volker Piotter, Tobias Mueller, Klaus Plewa, Juergen Prokop, Andreas Ruh, Elvira Vorster: Production of Multi-Material Micro Parts by Powder Injection Moulding; Proceedings of EURO PM2011 Conference, Barcelona, Vol. 2, European Powder Metallurgy Association, ISBN 978-1-899072-21-7 (2011); S. 165-170.

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit Januar 2006 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1.	Piotter, V., Dr.-Ing., GL	pzt	IAM-WPT, ehemals IMF III	5	
	2.	Hanemann, Thomas, Prof., AL, GL	mst	IAM-WPT, ehemals IMF III	5	
	3.	Haußelt, J., Prof. Dr.-Ing., IL	wrt	IAM-WPT, ehemals IMF III	3	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	4.	Plewa, K.		IAM-WPT, ehemals IMF III	33,5	
	5.	Vouriot, R.		IAM-WPT, ehemals IMF III	4	
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftleroff	6.	Müller, T., Dipl.-Min.	wer1	IAM-WPT, ehemals IMF III	39	EG13
	7.1.	Kleine, A.	wer2	IAM-WPT, ehemals IMF III	19,25	SH
	7.2.	Horodynski, M.	wer2	IAM-WPT, ehemals IMF III		SH
	7.3.	Kristianto, A.	wer2	IAM-WPT, ehemals IMF III		SH
	7.4.	Inderawan, F.	wer2	IAM-WPT, ehemals IMF III		SH
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	8.	Walter, H.		IAM-WPT, ehemals IMF III	19,5	EG 9

Kürzel	Beschreibung
AL	Abteilungsleiter
GL	Gruppenleiter
IL	Institutsleiter
mst	Werkstoffe der Mikrosystemtechnik, Chemie von Festkörper-Fluid-Grenzflächen

pzt	Prozesstechnik
wer1	Dipl. Min.
wer2	wissenschaftliche Hilfskraft
wrt	Werkstoffe, Werkstoffprozesstechnik

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

1. Dr.-Ing. V. Piotter, Gruppenleiter Prozesstechnik in der Abteilung Material- und Prozessentwicklung (MPE) am Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT; ehemals: Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung III) leitet die Arbeiten im Rahmen der Gruppe und koordiniert die Arbeitsabläufe mit dem Teilprojektbearbeiter (5.) C1.
2. Prof. T. Hanemann betreut als Gruppenleiter „Werkstoffe und Verfahren der Mikrosystemtechnik“ die Arbeiten des Teilprojekts B1 mit neu entwickelten Formmassen. Weiterhin ist er in seiner Funktion als Leiter der Abteilung Material- und Prozessentwicklung verantwortlich für die Koordination der Teilprojekte B1, C1, C2 und C5.
3. Prof. Dr.-Ing. J. Haußelt, Leiter des Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT; ehemals: Instituts für Materialforschung III am Karlsruher Institut für Technologie) sowie des Lehrstuhls Werkstoffprozesstechnik in der Mikrosystemtechnik am IMTEK, Universität Freiburg, betreut das Teilprojekt insbesondere hinsichtlich der wissenschaftlichen Fragestellungen sowie die organisatorische Verbindung zum TP A4 „Simulation MicroPIM“ an der Universität Freiburg.
4. K. Plewa, ist für die Auslegung und Konstruktion neuer Spritzgießwerkzeuge sowie deren Adaption auf die Spritzgießmaschinen verantwortlich. Er unterstützt den wissenschaftlichen Mitarbeiter 6 bei der Entwicklung neuer Prozessführungen für das Mikropulverspritzgießen.
5. R. Vouriot, Versuchstechniker, unterstützt die Versuchsauswertung durch Rasterelektronenmikroskopie (REM). Er führt darüber hinaus auch Untersuchungen am REM für die Teilprojekte B1, C2 und C5 aus.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

6. Dipl.-Min. T. Müller ist als Teilprojektbearbeiter für die Durchführung und Auswertung aller vorgesehenen Versuche des Teilprojektes verantwortlich. Ferner soll der wissenschaftliche Mitarbeiter die für dieses Teilprojekt spezifischen Fragestellungen bezüglich der materialwissenschaftlichen Aspekte und der notwendigen werkzeugtechnischen Auslegung bearbeiten. Aufgrund des zeitlichen Aufwands und des interdisziplinären Charakters des Teilprojekts ist eine Vollzeitstelle erforderlich.
- 7.1-7.4 N.N. (studentische Hilfskraft, Fachgebiete: Mikrosystemtechnik, Maschinenbau, Werkstoffwissenschaften, Chemie oder verwandte Disziplinen): Die studentische Hilfskraft ist für die Durchführung von grundlegenden, routinemäßigen Arbeiten im Bereich der Versuchsvorbereitung, -durchführung und -auswertung zuständig, insbesondere den Entbinderungs- und Sinterläufen. Hinzu kommen die Charakterisierung der Proben (Mikroskopie, Maße, Dichte etc.) in den einzelnen Prozessschritten und die Dokumentation der Ergebnisse.
8. H. Walter führt nach Vorgabe des wissenschaftlichen Mitarbeiters 6 die Spritzgießversuche zur Herstellung dimensionsoptimierter MicroPIM-Bauteile, zum Einsatz neuer Bindersysteme und zur Defekttausheilung durch. Ferner ist er für die Werkzeugmontage, die Umrüstung der Spritzgießeinheiten sowie die Werkzeugauf- und -abbauvorgänge verantwortlich.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt C2

5.1.1 Titel

Verfahrensentwicklung zum Gießen von Mikrokomponenten aus Metalllegierungen

Development of a casting process for micro components made of metal alloys

5.1.2 Projektleitung

Haußelt, Jürgen, Prof. Dr.-Ing., geb. 21.05.1946

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT)

Postfach 3640

76021 Karlsruhe

Telefon: 07247 / 608-22518

Telefax: 07247 / 608-23956

E-Mail: juergen.hausselt@kit.edu

Ritzhaupt-Kleissl, Hans-Joachim, Dr.-Ing., geb. 10.07.1946

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT)

Postfach 3640

76021 Karlsruhe

Telefon: 07247 / 608-23727

Telefax: 07247 / 608-22095

E-Mail: hans-joachim.ritzhaupt-kleissl@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

5.2.1.1 Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

In Rahmen des SFB-499 hat sich der Mikroguss (Teilprojekt C2) als erfolgreiches Verfahren zur Herstellung komplexer Mikrobauteile aus unterschiedlichen Legierungen erwiesen. In der letzten Projektphase wurde der Einfluss der Prozessparameter auf das entstehende Gefüge und die mechanischen Eigenschaften in Mikrozugproben untersucht. In Fortführung dieser Arbeiten wurden an Mikrozugproben, die hinsichtlich der Formfüllung mit am besten geeigneten Formtemperaturen gegossen wurden, ein Ziele verfolgt, nämlich die Homogenisierung vom Gefüge sowohl innerhalb einer Probe als auch innerhalb eines Gießbäumchens.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen im Mikroguss wurde in der letzten Projektphase in zwei völlig neue Themenbereiche gelegt: Zum einen stand die Optimierung des Verbundgießens als Herstellungsmethode zur Herstellung von komplexen Mikrobauteilen bzw. Mikrosystemen im Fokus. Mit dieser Methode lässt sich während des Gießprozesses ein Mikrobauteil durch Angießen an ein anderes Mikrobauteil integrieren. Die hergestellten Kombinationen können komplexe Anforderungen an mechanische oder Funktions-eigenschaften durch die gezielte Anwendung der Verbundwerkstoffe erfüllen. Auf diese Weise könnten beispielsweise auch aufwändige Montageprozesse vermieden werden. Zum anderen stand die Entwicklung und Herstellung von Dauerformen bzw. Gießkokillen für den Mikroguss im Mittelpunkt. Der Kokillenguss als Gießverfahren sollte ein einfaches und kostengünstiges Verfahren zur Fertigung von Mikrobauteilen und -strukturen darstellen. Ziel der Untersuchungen war die Suche nach geeigneten Werkstoffen für die Entwicklung und Optimierung einer Gießkokille und die Auswahl dafür geeigneter Gießparameter und -werkstoffe.

5.2.1.2 Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

Homogenisierung von Mikrobauteilen

Der Einfluss der Prozessparameter auf das entstehende Gefüge und die mechanischen Eigenschaften wurde in der letzten Projektphase durch selektives Vorgehen bei der Auswahl der Formtemperatur und der angewandten Gießtechnik am Beispiel von Al-Bronze untersucht. Hierfür wurden Gießbäumchen aus jeweils etwa 18 einzelnen Mikrozugproben auf einem T-förmigen Angussystem hergestellt (Abb. 1a,b). Die detaillierte Untersuchung des Gefüges an Mikrozugproben zeigte mit steigender Formtemperatur ein zunehmendes größeres Gefüge. Generell fiel auf, dass die Morphologie des Gefüges sowohl innerhalb der einzelnen Mikrozugproben als auch innerhalb eines Gusses umso stärker variiert, je kälter die Formtemperatur war. Die Aufgabe in der jetzigen Phase war, ein homogenes Gefüge innerhalb einer Probe als auch innerhalb der Einzelproben einer Gießcharge zu erreichen. Das hier aufgetretene inhomogene Gefüge ist bei einem vorgegebenen konstanten Druck (Vakuumdruckguss 4 bar, Schleuderguss 25 bar) als Folge von Temperaturgradienten, die in der Gießform während des Gieß- und Abkühlprozesses geherrscht haben, zu interpretieren. Die Wirkung des lateralen Temperaturgradienten auf das Gefüge innerhalb eines Gusses kann vermieden werden, indem alle Mikrozugproben (Bauteile) entlang einer Zone gleicher Temperatur bzw. auf eine Isotherme positioniert werden (Abb. 2a). Hierfür wurde ein neues ringförmiges Angussystem konzipiert (Abb. 2b), in dem die breite Seite der Mikrozugproben entlang des Ringes verläuft. Auf diese Weise kann der laterale Einfluss des Temperaturgradienten auf die Mikrozugprobe mit einer Dicke von 130 µm vernachlässigt werden. So kann angenommen werden, dass die Mikrozugproben auf einer Isotherme liegen. Durch diese Anordnung haben alle Mikrozugproben im Gießbäumchen gleiche Abkühlbedingungen

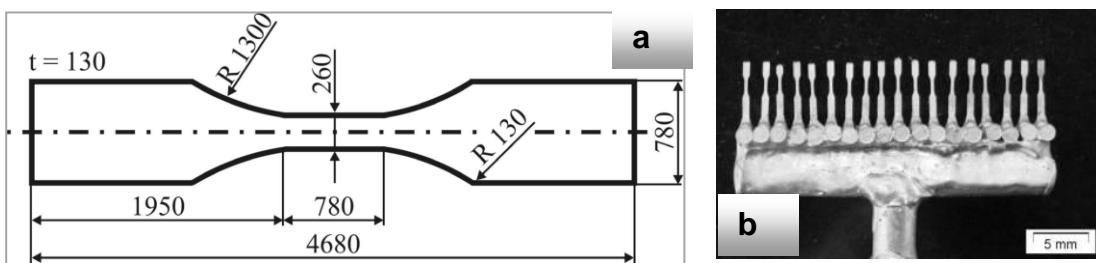


Abb.1: a) Geometrie der Mikrozugprobe, Abmessungen in µm; b) Mikrozugproben: T-förmiger Angussystem

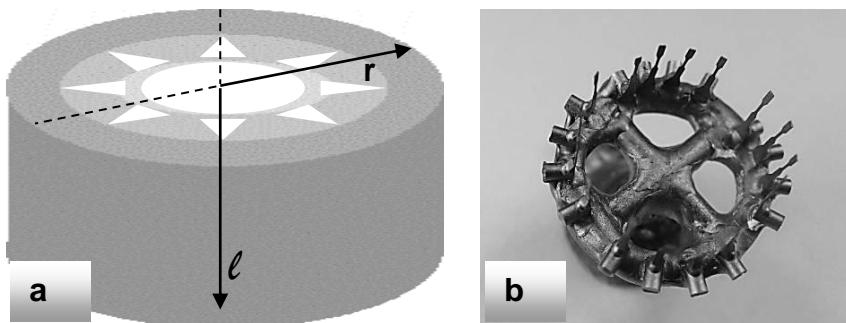


Abb.2: a) Schematische Darstellung des Temperaturgradienten in zylindrische Formen; b) Mikrozugproben in runden Angussystem.

Auf einem ringförmigen Anguss wurden je 16 Kunststoffmodelle von Mikrozugproben aus POM angeordnet. Die Gießversuche wurden im Wachsaußschmelzverfahren bei Vorwärmtemperaturen der Gießform von 850°C und 1000°C ausgeführt. Die Durchführung der Versuche wurde auf die Vakuumdruckgießtechnik beschränkt. Die metallographisch untersuchten Mikrozugproben aus Al-Bronze, die bei einer Formtemperatur von 850°C hergestellt wurden, zeigen identische Gefüge innerhalb eines Gusses und lassen sich sehr gut reproduzieren. Außerdem ist das Gefüge entlang der Mikrozugprobe relativ homogen verteilt. In Abb. 3a,b sind Gefügebilder der Mikrozugproben aus demselben Guss und zum Vergleich in Abb. 3c,d aus anderen Abgüssen zu sehen. Vergleichbare Gefügebilder innerhalb eines Gusses zeigen auch die Mikrozugproben die bei einer Formtemperatur von 1000°C hergestellt wurden (Abb. 4).

Fazit: Durch die Herstellung von Mikrobauteilen mit einem ringförmigen Anguss der Gießbäumchen wurde bei vorgegebener Formtemperatur der Einfluss von Temperaturgradienten auf die Gefügeausbildung deutlich eingeschränkt.

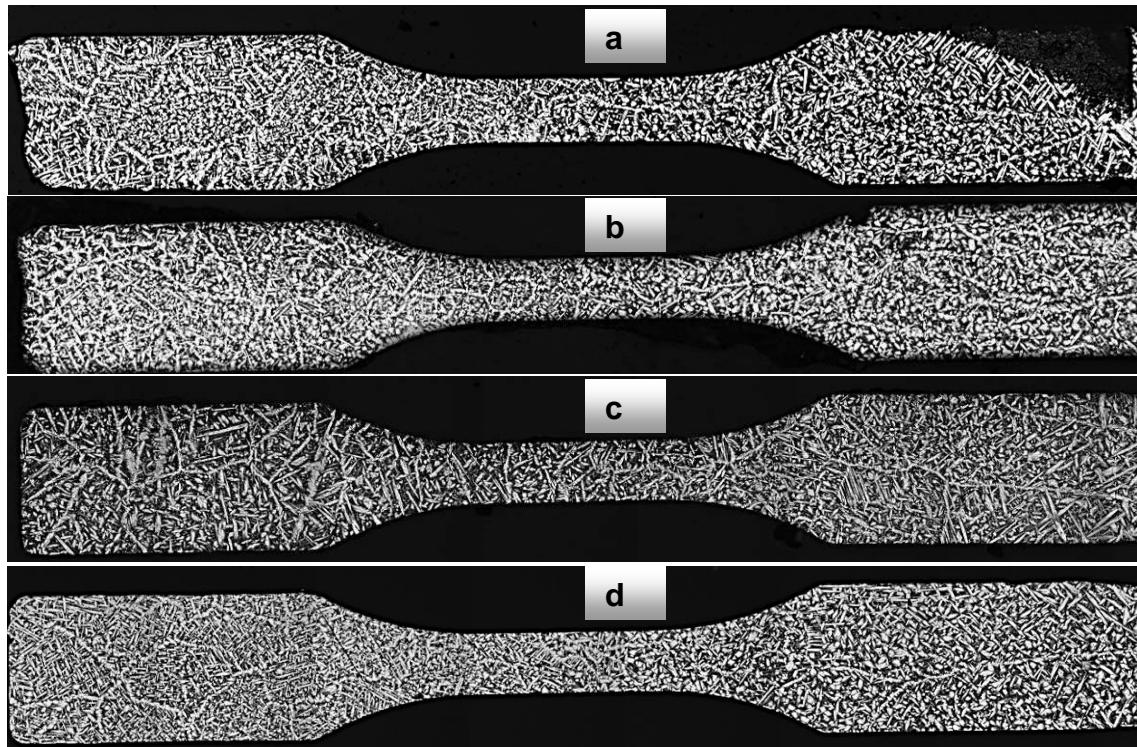


Abb.3: Mikrozugproben hergestellt im Vakuumdruckguss bei Formtemperatur von 850°C: a,b) Mikrozugproben aus demselben Guss; c,d) Mikrozugproben aus einem anderen Guss

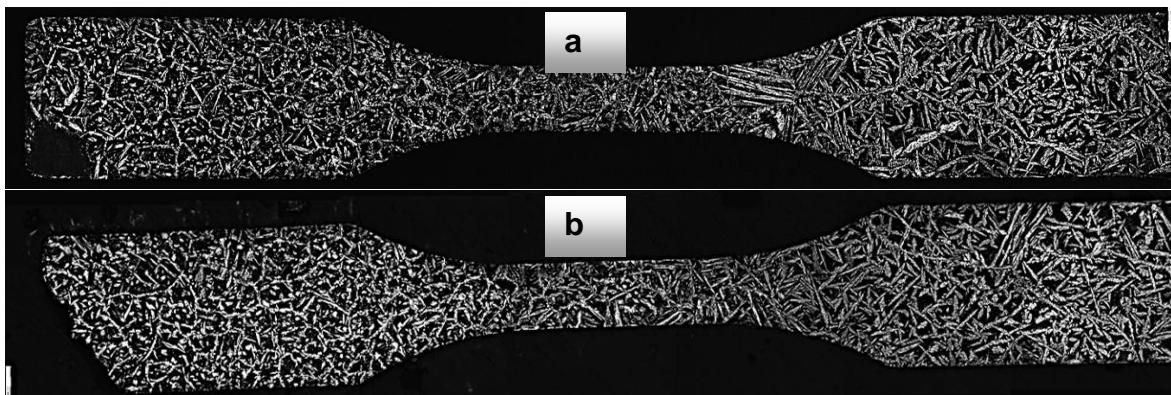


Abb.4: Mikrozugproben hergestellt im Vakuumdruckguss bei Formtemperatur 1000°C:

Verbundguss

Verbundguss bedeutet das Umgießen eines metallischen oder keramischen Mikroteils mit einem weiteren metallischen Material. Auf diese Weise können nicht nur komplexe Teile hergestellt werden, sondern das Verfahren kann auch zur Erleichterung von Assemblierungs- oder Montageschritten genutzt werden. Beim Verfahren des Verbundgusses lassen sich die physikalischen Eigenschaften der zu kombinierenden Werkstoffe wie thermische Ausdehnung und Benetzbarkeit der Einlegeteile und des Gießwerkstoffes, sowie dessen Schrumpf von Gieß- auf Raumtemperatur nutzen, um form- und kraftschlüssigen Verbund zwischen Metall und Keramik sowie kraft- und stoffschlüssige Verbunde zwischen Metall und Metall herzustellen. Die Zielsetzung der Arbeiten zum Verbundguss im Mikrobereich war die Untersuchung von Werkstoffkombinationen mit unterschiedlichen physikalischen und mechanischen Eigenschaften. Es wurden Verbundkombinationen Metall-Keramik und Metall-Metall vorgesehen.

Verbundguss Metall-Keramik

Zielsetzung der Metall-Keramik Verbundgusskombinationen war die Herstellung sowohl fester als auch beweglicher Verbindungen. Die geringe Benetzbarkeit der keramischen Einlegeteile aus ZrO_2 und Al_2O_3 mit Metalllegierungen z.B. Al-Bronze, der Schrumpf von Gieß- auf Raumtemperatur von metallischen Werkstoffen sowie die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (Tab. 1) und die daraus resultierenden

de unterschiedliche Schwindung der Verbundmaterialien erlauben es wahlweise form- und kraftschlüssigen Verbund zu erzeugen. Für die Durchführung der Gießversuche zur Herstellung einer Verbindung zwischen Metall und Keramik sind Al-Bronze (Werkstoff-Nr.2.0966) vom Typ CuAl10Ni5Fe4 mit einem Schmelzintervall zwischen 1020-1040°C und Wironit (ISO 22674), eine CoCrMo-Legierung (63Co30Cr5MoSi) mit einem Schmelzintervall 1330-1350°C, als Gießwerkstoffe verwendet worden. Keramische Mikrobauteile aus ZrO_2 -, Al_2O_3 - und Si_3N_4 -Keramik wurden als Einlegeteile eingesetzt. Der Verbundguss Metall-Keramik wurde nach dem Prinzip des Wachsausschmelzverfahrens in Festformen mit verlorenen Modellen realisiert. Dieses Verfahren wurde im Laufe des SFB 499 auf die Anforderungen des Mikrogießens abgestimmt. Hierbei wird ein keramisches Einlegeteil auf einem Wachs oder Kunststoffmodell montiert, auf eine Gießform angebracht, und anschließend in einem keramischen Schlicker eingebettet. Als Schlicker wurde die im Rahmen des SFB entwickelte Einbettmasse mit einer Zusammensetzung von 80Gew% feiner Quarzsand und 20Gew% Hartgips verwendet. Nach der Trocknung folgt wie üblich das Sintern der Einbettmasse, in dem die Wachsmodelle Ausschmelzen und rückstandslos verbrennen. Anschließend findet das Vorwärmnen der Gießform bei einer vorgegebenen Temperatur für 2 Stunden statt, welches die Formfüllung der Mikrobauteile begünstigt. Die Gießversuche wurden sowohl in einer Vakuumdruckgießanlage „Prestomat“ der Firma Degudent als auch in einer Schleudergießanlage Vacutherm 3.3 Titan der Firma Linn High Therm durchgeführt.

Tabelle 1: Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Werkstoffe

Werkstoff	Wärmeausdehnungskoeffizient
Al-Bronze	17×10^{-6} 1/K
ZrO_2 -Keramik	$10-11 \times 10^{-6}$ 1/K
Al_2O_3 -Keramik	$7-8 \times 10^{-6}$ 1/K
Si_3N_4 -Keramik	$4,6 \times 10^{-6}$ 1/K

Das Umgießen keramischer Einlegeteile

Für die ersten Gießversuche wurden Mikrozahnräder aus ZrO_2 -und Al_2O_3 -Keramik (Abb.5a) als Einlegeteile ausgewählt. Die Zahnräder mit einem Durchmesser von 2.5mm wurden in einem, dafür gebauten Werkzeug aus Messing angebracht und mit Wachs modelliert (Abb.5a). Die Gießversuche wurden durch Umgießen der Zahnräder mit Al-Bronze in Vakuumdruckguss und in Schleuderguss mit Wironit (CoCrMo-Legierung) bei Vorwärmtemperaturen der Gießform von 800°C, 850°C und 1000°C realisiert. Anfangs wurden die in Wachs modellierten Zahnräder mit unterschiedlichen Angussystemen (ein Gießkanal in T-Form bzw. mit zwei Gießkanälen in V-Form, Abb. 5b,c). versehen. Hinsichtlich der Ergebnisse der Gießversuche konnte kein Einfluss der Angussysteme festgestellt werden, deshalb wurde für alle Folgeversuche der einfachere T-Anguss verwendet.

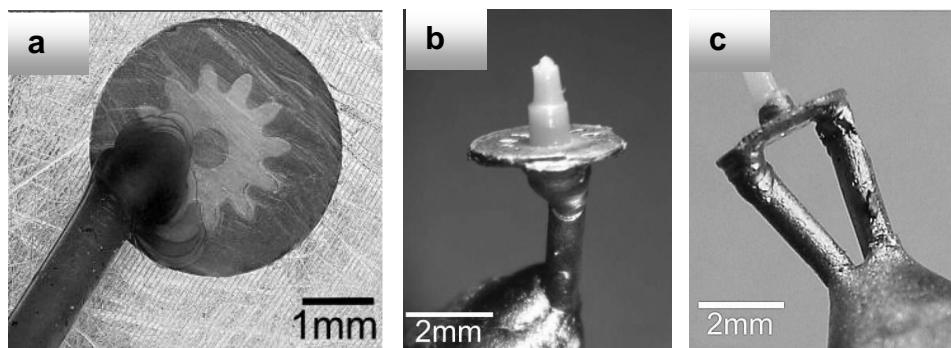


Abb.5: a) Zahnräder aus Keramik in Wachs eingebettet; Verbundguss hergestellt mit: b) V-Angussystem; c) T-Angussystem

Um den Kontakt zwischen Al-Bronze und Keramik zu untersuchen wurden die gegossenen Proben metallographisch präpariert. Die Ergebnisse der Untersuchungen an geschliffenen Proben durch Licht- und Raster-elektronenmikroskopie (Abb. 6a, b, c) dokumentieren in der Regel einen sehr engen Kontakt zwischen Keramik und Al-Bronze. Es zeigte sich, dass das Gefüge der Proben aus Al-Bronze abhängig von der Vorwärmtemperatur der Gießform ist. So zeigen die Proben, die bei einer Vorwärmtemperatur von 1000°C gegossen worden waren, gröberes und inhomogeneres Gefüge als bei 850°C und 800°C. Bei der Herstellung einer Verbindung durch Umgießen von Keramik-Mikrobauteilen mit Al-Bronze war neben einer formschlüssigen Verbindung auch die Entstehung einer kraftschlüssigen Verbindung zu erwarten. Aufgrund des deutlich höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Al-Bronze im Vergleich zur Keramik (Tab. 1) und dem Schrumpf von Gieß- auf Raumtemperatur von max. 2% für Al-Bronze entsteht beim Umgießen der Keramik

hierdurch eine kraftschlüssige Verbindung. Die vom TP D2 vermessenen Eigenspannungen an diesen Proben bestätigen solche Spannungen in den keramischen Zahnrädern (siehe Bericht TP D2).

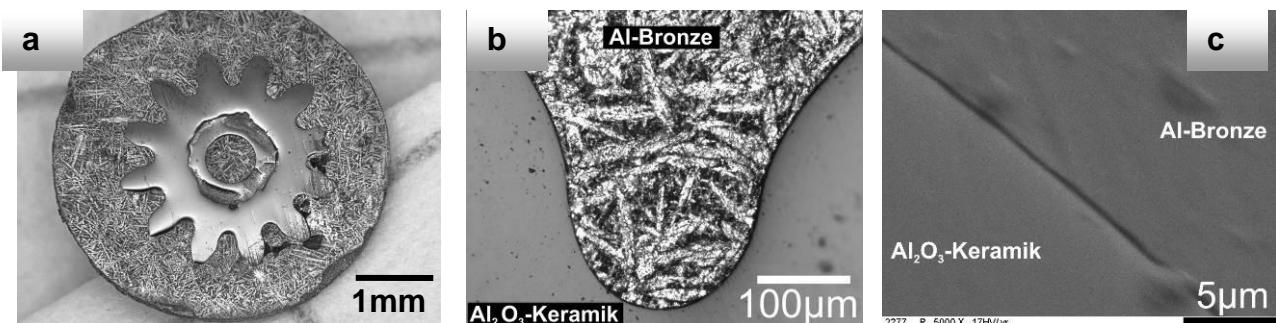


Abb.6: a) Zahnrad aus Al_2O_3 -Keramik mit Al-Bronze umgegossen ($T_F=1000^\circ\text{C}$); b) Querschliffausschnitt; c) REM-Aufnahme der Kontaktflächen

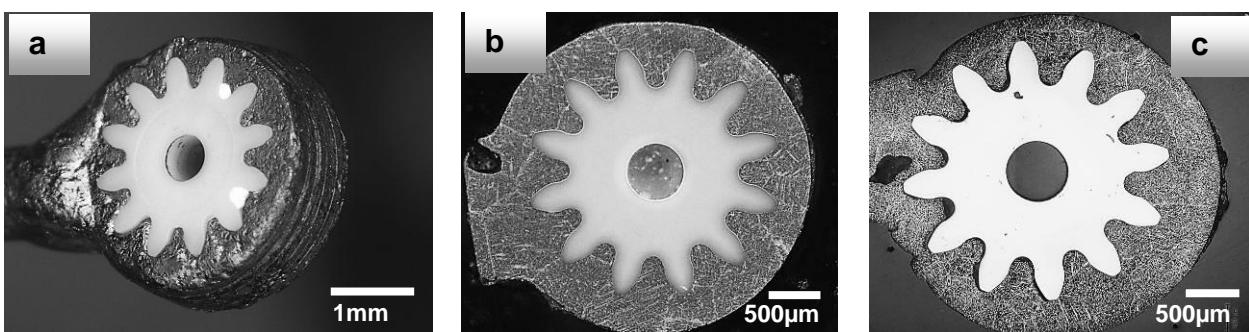


Abb.7: Verbundguss: a) Zahnrad aus Al_2O_3 -Keramik mit Al-Bronze umgegossen b) Querschliffausschnitt Vakuumdruckguss $T_F=1000^\circ\text{C}$; c) Querschliffausschnitt Schleuderguss $T_F=700^\circ\text{C}$

Für eine weitere Reihe von Gießversuchen wurden breitere Zahnräder aus Al_2O_3 -Keramik mit einer Breite $b=0.8$ mm, einem Durchmesser von 2.4 mm und einem Bohrungsdurchmesser von 0,54 mm verwendet (Abb. 7). Die Durchführung der Gießversuche fand bei einer Vorwärmtemperatur der Gießform von 700°C und 1000°C statt. Die Al-Bronze weist hier meist ein inhomogenes Gefüge auf. Jedoch konnte bei einer Vorwärmtemperatur von 700°C ein feineres Gefüge homogen eingestellt werden. Die Ergebnisse der Gießversuche in Vakuumdruckguss fallen grundsätzlich besser auf als die im Schleuderguss (Abb. 7c), hier ist eine durchgehende Verbindung zwischen Al-Bronze und Keramik zu beobachten (Abb. 7b). Die CT-Aufnahmen belegen dies ebenfalls, neben den Fehlstellen auf dem hergestellten Kontakt sind zugleich die Poren bzw. Lunker auf der Al-Bronze zu sehen (siehe Bericht TP D2).

Bei Verwendung der biokompatiblen CoCrMo-Legierung kommt es zu chemischen Reaktionen mit der Einbettmasse, so dass in der Regel nach dem Gießprozess die Einbettmasse mechanisch (Sandstrahlen) vom Bauteil entfernt werden muss. Für die Herstellung einer Verbindung mit Wironit wurden ebenfalls Zahnräder aus ZrO_2 - und Al_2O_3 -Keramik bei gleichen Vorwärmtemperaturen der Gießform wie beim Umgießen mit Al-Bronze umgegossen. Die Durchführung der Gießversuche erfolgte in Schleuderguss-technik sowohl im Vakuum als auch unter Ar-Atmosphäre. Im Laufe der Versuche zeigte es sich, dass im Vergleich zu den Al-Bronze Gießversuchen das Angussystem bzw. der Gießkanal breiter angelegt werden musste, so dass die Einlegeteile völlig mit Wironit umschlossen wurden. Die untersuchten Schritte der hergestellten Verbindung zwischen Wironit und ZrO_2 zeigen nicht nur unvollständige Formfüllung, sondern auch eine chemische Reaktion an der Kontaktfläche bzw. auf der Keramik, die zum Teil zerstört wurde. Ähnliches gilt auch für die Verbindung mit Al_2O_3 -Keramik.

Das Gießen in keramische Einlegeteile

Durch Gießen von Al-Bronze in die Bohrung von einfacheren Einlegeteilen mittels Vakuumdruckguss wurden Versuche zur Herstellung einer Verbindung zwischen Keramik und Al-Bronze durchgeführt. Die ersten Versuche wurden an Al_2O_3 -Keramikröhren mit zwei Bohrungen mit Durchmessern von je 0,3 mm und einem Gesamtdurchmesser von 1,2 mm und einer Länge von 5 mm durchgeführt (Abb. 8a). Um eine gute Formfüllung zu realisieren wurde eine hohe Vorwärmtemperatur der Gießform von 1000°C gewählt. Der Anguss wurde beidseitig angelegt so konnte hier neben der Herstellung eines durchgehenden losen Verbundes auch

eine sehr gute Formfüllung und recht homogenes Gefüge ohne Nahtbildung in dem Bereich, in dem die zwei Schmelzfronten aufeinander treffen, erreicht werden (Abb. 8b,c).

Die Herstellung eines einfachen Mikrosystems mit einer beweglichen Verbindung sollte am Beispiel einer gegossenen Welle aus Al-Bronze in die Mittenbohrung von keramischen Zahnrädern demonstriert werden. Als Modelle für die Welle dienten Fasern mit Durchmesser von 0,5 mm aus Polyoximethylen (POM) und Polystyrol. Die Modellwellen wurden mit einem oder zwei Gießkanälen versehen. Das Gießen der Wellen erfolgte durch Vakuumdruckguss bei Vorwärmtemperaturen der Gießform von 850°C und 1000°C in Zahnräder aus ZrO_2 -Keramik mit einer Bohrung von $\phi = 0,54$ mm. Sowohl an schmalen ($\phi = 2,3$ mm, $b = 0,1$ mm, Abb. 9a,b), als auch an breiten ($\phi = 2,4$ mm, $b = 0,8$ mm) Zahnrädern (Abb. 9c) konnte die Herstellung von beweglichen Verbindungen realisiert werden. Es konnte keine Benetzung oder Reaktion der Keramik mit der Al-Bronze beobachtet werden.

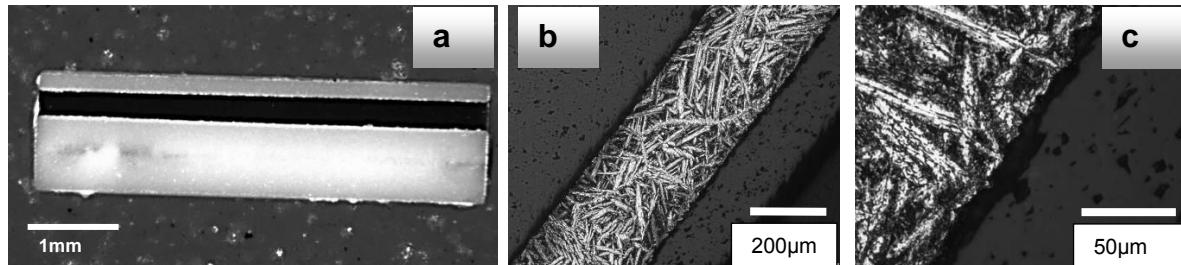


Abb.8: a) Zahnrad aus Al_2O_3 -Keramik mit Al-Bronze umgegossen b) Querschliffausschnitt $T_F=1000^\circ\text{C}$; c) Querschliffausschnitt $T_F=700^\circ\text{C}$

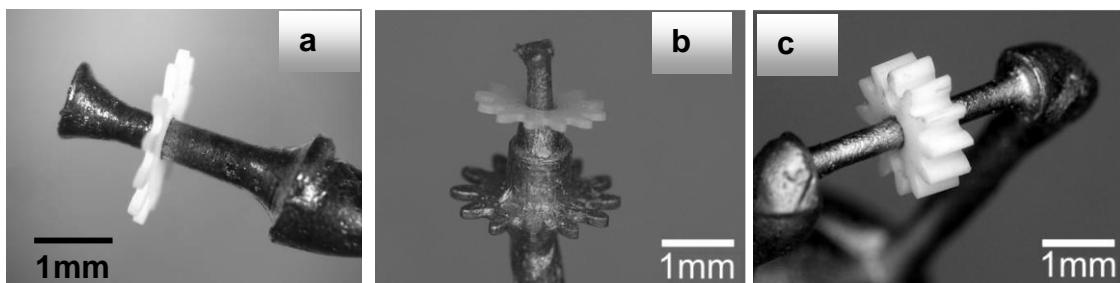


Abb.9: Bewegliche Verbindung zwischen Al-Bronze und ZrO_2 -Keramik

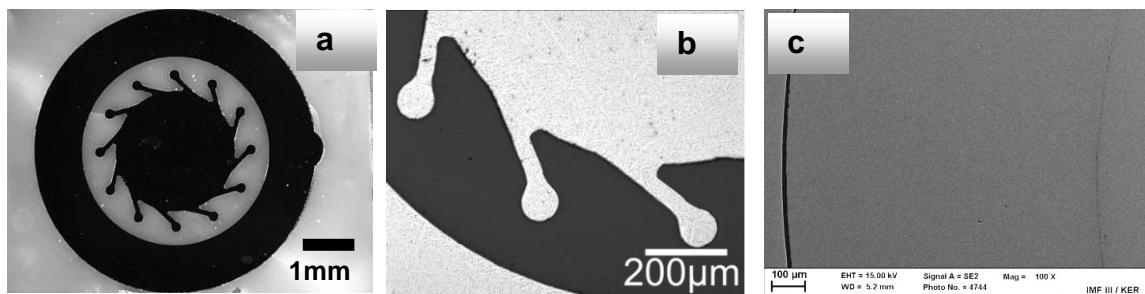


Abb.10: Verbundguss zwischen ZrO_2 -Keramik (Düsenplatte) und Al-Bronze, $T_F=800^\circ\text{C}$: a und b) Querschliffausschnitt; c) REM-Aufnahme der Kontaktflächen

Für weitere Versuche wurden komplexe keramische Mikrobauteile vom TP-A3 des SFB-499 als Einlegeteile zur Verfügung gestellt. Hierbei handelt sich um Düsenplatten aus Si_3N_4 -und ZrO_2 -Keramik (Abb. 10a). Von besonderem Interesse neben der Keramik-Metall Verbindung, sind hier die Details im Hinblick auf die Formfüllung der Gussteile. Das Gießen in die Düsenplatten erfolgte durch Vakuumdruckguss und Schleuderguss (Al-Bronze und Wironit, Formtemperatur 800 und 1000°C). Die Ergebnisse der Gießversuche zeigen einen guten Verbund zwischen Al-Bronze und ZrO_2 -Keramik sowie eine gute Formfüllung der Düsenkanäle (Abb. 10a,b). Auf der inneren Seite des Ringes (Al-Bronze) ist eine durchgehende kraftschlüssige Verbindung zu beobachten. Auf der äußeren Seite des Ringes konnte keine Verbindung hergestellt werden (Abb. 10c). Dies ist auf die Differenz des thermischen Ausdehnungskoeffizienten und dem Schrumpf von Gieß- auf Raumtemperatur der Al-Bronze zurückzuführen. Außerdem konnte keine Benetzung des Außenrings der ZrO_2 -Keramik mit Al-Bronze festgestellt werden. Gießversuche mittels Vakuumdruckguss und Schleuderguss zwischen Si_3N_4 -Keramik und Al-Bronze bei Formtemperaturen von 1000°C ergaben eine

unvollständige Formfüllung der Düsenkanäle sowie eine Rissbildung in den Keramikkomponenten. Daraufhin wurden diese Versuche nicht weiter fortgeführt. Mit Wironit-CoCrMo-Legierung wurde auch in Düsenplatten aus Si_3N_4 -Keramik mittels Schleudergusstechnik bei Vorwärmtemperaturen der Gießform 850°C und 1000°C gegossen, die Ergebnisse der Gießversuche zeigten keinen Verbund zwischen CoCrMo-Legierung und Si_3N_4 -Keramik.

Fazit: Die bisher durchgeführten Untersuchungen konnten die Eignung des Verbundgusses für die Herstellung von Mikrokomponenten eindeutig bestätigen. So konnte z.B. durch Umgießen von keramischen Mikrobauteilen mit Al-Bronze aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und dem Schrumpf von Gieß- auf Raumtemperatur beider Materialien ein kraftschlüssiger Verbund hergestellt werden. So ein Verbund wäre gut denkbar für die Herstellung von Mikrobauteilen mit einem Kern aus harten Keramiken und einer duktilen metallischen Außenschicht. Sehr gute Ergebnisse wurden auch durch das Gießen in keramische Mikrobauteile erreicht, es konnten ein formschlüssiger Verbund und sogar bewegliche Verbindungen hergestellt werden. Die gezielte Weiterentwicklung dieser Verfahrensvariante kann zur Erleichterung bei der Fertigung von Mikrosystemen durch Einsparung von Montageschritten führen.

Kokillenguss

Der zweite Schwerpunkt im Teilprojekt C2 lag im Kokillenguss. Dessen Zielsetzung war die Entwicklung und Optimierung eines effizienten Gießverfahrens unter Anwendung von Gießkokillen zur Fertigung von Mikroteilen. Der Kokillenguss als Gießverfahren sollte ein einfaches und kostengünstiges Verfahren zur Herstellung kleiner Serien darstellen. Die Herausforderung lag primär darin, die aufwändige und zeitintensive Herstellung von mikrostrukturierten Bauteilen mit verlorenen Modellen zu ersetzen, und dabei auch die hohe Abbildungsgenauigkeit mindestens zu erhalten. Für die Herstellung der Kokillen wurden metallische Werkstoffe vorgesehen. Die hohe Wärmeableitung von metallischen Werkstoffen war ausschlaggebend bei der Materialauswahl für die Herstellung der Kokillen, da dadurch die Einstellung eines feinkörnigen Gefüges begünstigt wird. Alternativ wurde Graphit dank seiner hervorragenden Eigenschaften unter Vakuum (extrem hitzebeständig, keine chemische Reaktionen) bei hohen Temperaturen in Betracht gezogen.

Dichte Formkerne bzw. Dauermodelle aus diversen Werkstoffen (Kupfer, Edelstahl, Zirkon- und Aluminiumoxid, Glaskohlenstoff und Graphit) wurden bereits in den vorherigen Projektphasen hergestellt und getestet. Die Herstellung von Mikrobauteilen mit Hilfe von Formkernen aus Edelstahl erwies sich dabei als geeignet, jedoch blieb der Herstellungsprozess im Wachausschmelzverfahren weiterhin sehr aufwändig. Demzufolge konzentrieren sich die aktuellen Untersuchungen zum Mikroguss auf die Entwicklung und Herstellung von mehrfach verwendbaren Dauerformen bzw. Gießkokillen. Die erste Metallkokille wurde aus Kupfer hergestellt und in Rahmen einer Bachelor Arbeit untersucht [1]. Die Ergebnisse zeigen eine unvollständige Formfüllung der Mikrostrukturen mit abgerundeten Kanten. Offensichtlich bewirkt die hohe Wärmeleitfähigkeit des Kupfers ein rasches Erstarren der Schmelze.

Auf der Suche nach geeigneten Werkstoffen für die Herstellung der Gießkokillen fiel die Auswahl auf zwei hochtemperatur- und korrosionsbeständige Metalllegierungen, nämlich die Stahllegierung X32CrMoV3-3 (W.-Nr.: 1.2365) und Inconel NiCr19Fe19Nb5Mo3 (W.-Nr.: 2.4668) sowie auf Graphit. Für die Durchführung der Gießversuche in der vorgeheizten Kokille war es erforderlich, die Schleudergießanlage Vacutherm 3,3 Titan umzubauen. In der Gießkammer der Anlage wurde eine mit Thermoelementen bestückte Heizmanschette aus Inconel 600 (W.-Nr. 2.4816) angebracht. Die Regelung der Vorwärmtemperaturen findet über ein externes Potenziometer statt. Das Vorheizen der Kokille in der Gießkammer ist bis zu einer Temperatur von 850°C möglich. Hier besteht zusätzlich die Möglichkeit, unter Schutzgasatmosphäre (Argon) oder unter Vakuum zu arbeiten.

Mikroguss in Kokillen aus Stahl- und Nickellegierung

Die Kokillen aus Stahl- und Nickellegierung bestehen aus zwei Hälften und aus einem runden Halter auf der Unterseite. Die Kokillenhälften werden durch Passstifte in diagonalen Bohrungen exakt ausgerichtet und fixiert. Das im Wachausschmelzverfahren gut bewährte T-Angussystem (Abb. 11a) wurde für die Kokillen übernommen. Hier wird der Gießtrichter mit einem relativ großen Reservoir verbunden, dadurch soll genügend Schmelze in die Gießstrukturen einfließen können.

Für die Durchführung der ersten Gießversuche wurde in die Stahl-Kokille (X32CrMoV3-3) eine grobe Struktur in Kombination von Fräsen und Senkerodieren gefertigt. Die Dimensionen und die Formen der Strukturen wurden ausgelegt, um möglichst viele Informationen aus einem einzigen Gießvorgang zu erhalten, insbesondere hinsichtlich der Gestaltoptimierung bzw. Kombination von Makro- und Mikrostrukturen und der Passung der Kokillenhälften. Die Struktur besteht aus sieben runden Stäben, deren Enden eine senkrechte Fläche mit scharfer Kante darstellen (Abb. 11a). Die Dimensionen der Stäbe nehmen von der Mitte nach außen ab, die Maße sind in Tabelle 2. dargestellt. Die mittels Senkerodieren gefertigten Strukturen konnten materialbedingt nicht einwandfrei hergestellt werden, d.h. die Strukturen sind zum Teil versetzt, so dass die Geometrie von den Sollmaßen abweicht.

Tabelle 2: Dimensionen der Stäbe in der Kokille aus Stahllegierung X32CrMoV3-3 (W.-Nr.: 1.2365)

Kokille: W.-Nr.: 1.2365	Länge [mm]	Radius [mm]	Kokille: W.-Nr.: 2.4668	Länge [mm]	Breite [mm]	Stärke [mm]
Struktur: 1 und 7	9,3 / 2,25	0,25 / 0,5	Struktur: 1 und 7	6,42 / 2,0	1,0	0,5 / 0,25
Struktur: 2 und 6	9,5	0,5	Struktur: 2 und 6	8,3	1,0	0,5
Struktur: 3 und 5	19,3	1,0	Struktur: 3 und 5	17,1	2,0	1,0
Struktur: 4	29,0	1,5	Struktur: 4	25,0	3,0	1,5

Die Gießversuche (Abb. 11a) wurden in der kalten Kokille bei Raumtemperatur (ca. 25°C), im Vakuum und in der bei 200°C beheizten Kokille in Ar-Atmosphäre mit Al-Bronze durchgeführt. Makroskopisch ist deutlich zu sehen, dass die Passung der Kokillenhälften nicht optimal ist, was eine Fahnenebildung bzw. das Ausfließen von Al-Bronze zwischen zwei Kokillenhälften zur Folge hat. Die Oberflächen der Strukturen zeigen ein Relief auf, was auf eine turbulente Schmelze hindeutet. Bei den Gießversuchen in der kalten Kokille konnte eine bessere Formfüllung und Oberfläche der Strukturen erreicht werden. Durch die Präsenz der Gießfahnen konnte der Schrumpf der Gießstrukturen in der Kokille nicht bestimmt werden.

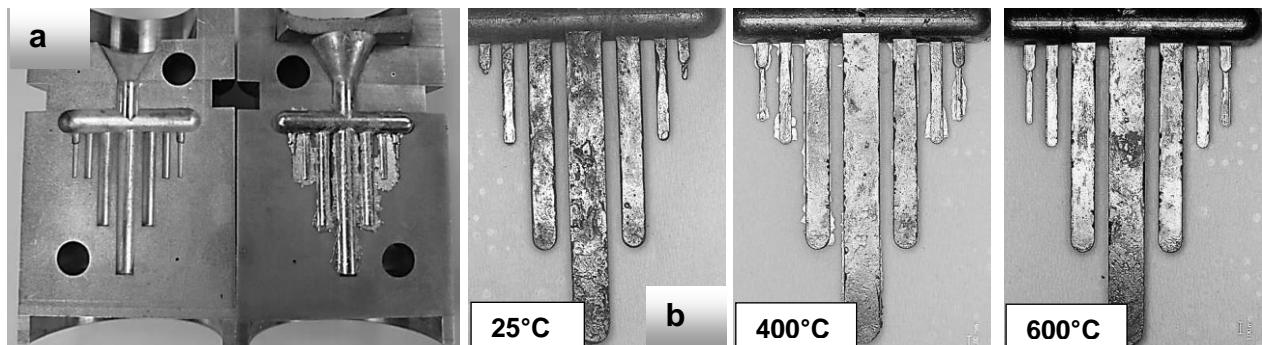


Abb.11: a) Kokille aus Stahllegierung X32CrMoV3-3 (W.-Nr.: 1.2365), nach dem Guss bei $T_F=200^\circ\text{C}$ in Ar-Atmosphäre; b) Gießstrukturen in Kokille aus Inconel, W.-Nr.: 2.4668 hergestellt bei vorgeheizten Kokille

Zur Weiterführung der Untersuchungen vom Kokillenguss wurde eine zweite Kokille aus Inconel, W.-Nr.: 2.4668, optimiert. Die Produktion von Kokillen zeigte sich generell sehr anspruchsvoll, dies ist auf Materialeigenschaften hinsichtlich der Zerspanbarkeit zurück zu führen. Die Strukturen und das Angussystem entsprachen der vorherigen Kokille. Um planparallele Flächen zu erzeugen, wurden die Kontaktflächen der Kokillenhälften geschliffen und poliert. Die Gießversuche wurden mit Al-Bronze in unbeheizter Kokille bei Raumtemperatur gestartet und an beheizten Kokillen bei 200°C, 300°C, 400°C, 500°C und 600°C fortgesetzt. In Abb. 11b,c,d sind beispielhaft drei Gießversuche dargestellt. Das Ergebnis des Gießversuchs in unbeheizter Kokille zeigt eine unvollständige Formfüllung der Strukturen. Die zwei äußeren Strukturen sind nicht komplett ausgeflossen. Dies ist auf ein zu schnelles Erstarren der Schmelze zurückzuführen. Bei der Durchführung der Gießversuche in die beheizte Kokille bei 200° und 400°C machte sich abermals die nicht exakte Passung der Kokillenhälften durch ein Ausfließen der A-Bronze bemerkbar. In allen Versuchen ist eine deutliche Kantenverrundung der gegossenen Strukturen zu beobachten. Außerdem weisen die Oberflächen der Strukturen ein Relief auf, was auf eine turbulente Schmelze hindeutet. Die untersuchten Strukturen an der Kokille selber zeigten schon nach dem ersten Gießversuch Veränderungen an der Oberfläche. Stellenweise sind neben den Verfärbungen auch chemische Reaktionen an den Strukturen zu beobachten. Vor allem am Gießtrichter kam es zu Legierungsbildung bzw. Verschweißung zwischen Al-Bronze und der Kokille (Abb. 12a). Aus diesem Grund erwies sich die Entnahme der Gießstrukturen aus der Kokille als schwierig. An manchen Stellen führte die erforderliche Entnahmekraft zur Materialzerstörung im Bereich der Gießöffnung (Abb. 12b). Ab einer Temperatur von 300°C wurde in die Kokille auf dem Gießbereich Ruß aufgetragen und ein Graphitring von 3mm Stärke angebracht, um die Verschweißung zu verhindern. In einer Ausführung der Kokillen aus Stahl- und Nickel-Legierung wurden die Mikrostrukturen mittels Senkernodieren hergestellt. Auf einen T-Anguss wurden je 8 Zugproben angebracht mit einer Länge von 6,8 mm, einer Breite von 0,7 mm bzw. 0,25 mm (Abb. 13). Auch hier wurde ein Graphitring eingesetzt, um eine Legierungsbildung im Gießbereich zu vermeiden. Um eine gute Formfüllung von Mikrozugproben sicher zu stellen, wurde die Kokille bei einer höheren Temperatur von 700°C beheizt. Dadurch sollte das zu schnelle Erstarren der Schmelze an dünnwändigen Strukturen vermieden werden. Nach dem ersten Gießversuch konnten beide Kokillen nur unter starker Kraftanwendung geöffnet werden, wobei die Stahlkokille sich etwas

leichter öffnen ließ. In der Stahlkokille die Mikrozugproben sind nicht ausgeflossen. In der Kokille aus der Nickel-Legierung waren Teile vom Gießreservoir sowie der gesamte Gießtrichter mit der Al-Bronze verschweißt bzw. legiert, dies ist in den Abb. 13a und c als rauе Flächen im Angussystem zu sehen. Die Mikrozugproben zeigen eine gute Formfüllung und sind fast vollständig ausgeflossen, wie aus Abb.13a bzw. Abb.13b (Ausschnitt vergrößert), zu entnehmen ist.

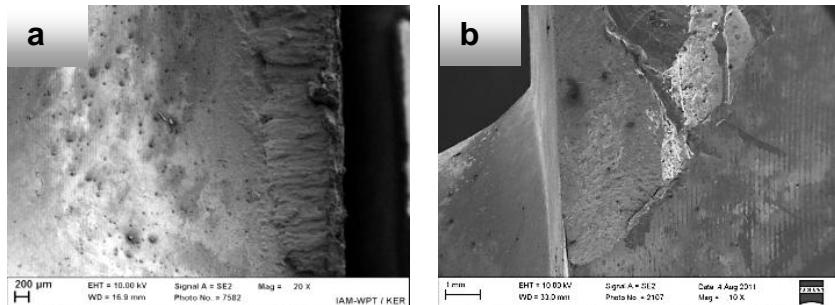


Abb.12: Gießtrichter - Ausschnitt vom Kokille aus Inconel, W.-Nr.: 2.4668: a) Legierter Bereich nach dem Gießversuch bei $T_F=200^\circ\text{C}$; b) Bruchstelle nach dem Gießversuch bei $T_F=25^\circ\text{C}$

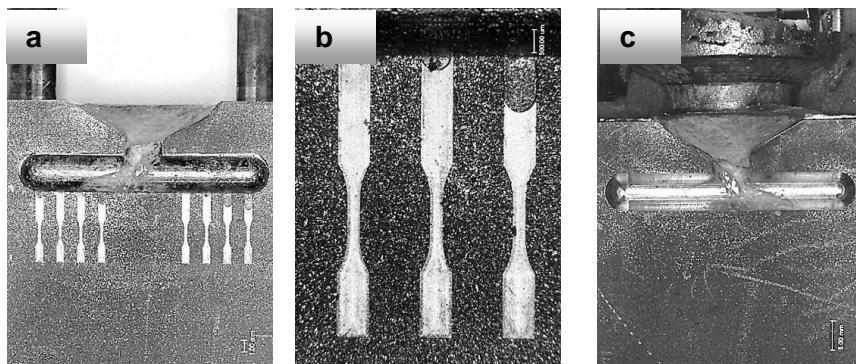


Abb.13: a) Ausschnitt: Kokille aus Inconel, W.-Nr.: 2.4668 mit Mikrozugproben aus Al-Bronze ($T_F=700^\circ\text{C}$); b) Mikrozugproben fast vollständig ausgeflossen; c) Kokillenhälfte Anguss mit Graphitring

Fazit: Aus den Versuchen konnten wichtige Erkenntnisse gesammelt werden, insbesondere hinsichtlich der Gestaltoptimierung (Kombination von Makro- und Mikrostrukturen, Anpassung der Kokillenhälften). Außerdem fallen die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten an der mikrostrukturierten Kokille positiv auf. Hier wäre eine Fortführung der Versuche erforderlich um einen Gießprozess für Al-Bronze in Bezug auf die Materialauswahl für die Kokille unter Berücksichtigung der jeweiligen Materialeigenschaften zu optimieren.

Graphitkokille

Graphit als Material ist im Vakuum und unter Schutzgasatmosphäre extrem hitzebeständig und gegenüber vielen Werkstoffen inert, zudem besitzt Graphit einen relativ niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $4.2\text{--}5.7 \times 10^{-6}$ 1/K. Parallel zu den Untersuchungen an Kokillen aus Metall im Mikrobereich wurden daher zwei Typen (Abb. 14 und 15) von Kokillen aus Graphit entwickelt. Der erste Typ der Graphitkokille ist eine rechteckige Kokille, die aus zwei Hälften angefertigt wurde. Auf einer Hälfte (Abb. 14.a), sind neben dem Gießtrichter und der Makrostruktur bzw. der Negativform eines runden Stabs auch Mikrostrukturen geprägt (Ausschnitt in Abb. 14b). Die Makrostruktur ist seitlich mit je einen 0,2 mm breiten Entlüftungskanal versehen. Am kegelförmigen Ende des Stabes sind sieben 0,200 mm breite stabförmige Mikrostrukturen (Ausschnitt in Abb. 14b) angebracht. Um das Verhalten der Graphitkokille zu prüfen, wurden Gießversuche mit Al-Bronze in Vakuum und in Ar-Atmosphäre durchgeführt. Die Graphitkokille wurde in 5 Minuten auf 400°C aufgeheizt. Die gegossenen Strukturen zeigen eine sehr gute Abbildung, die Mikrostrukturen sind jedoch in beiden Fällen nur partiell ausgefüllt (Abb. 12b). Außerdem waren sie gerissen und ein Teil der Mikrostrukturen blieb an der Kokille haften. Das Reißen der Mikrostrukturen ist auf lokale schnelle Erstarrung der Schmelze zurückzuführen. Während die Schmelze oberhalb der Mikrostrukturen noch flüssig ist, sind die Mikrostrukturen bereits erstarrt. Der Erstarrungsschumpf führt dann zu Rissbildung. Weiterhin sind auf der Kokille selber bzw. auf den Kanthen der Strukturen, vor allem aber zwischen Makrostruktur und Entlüftungskanälen, Graphitteile abgebrochen. Die Ausführung der Kombination von Makro- und Mikrostrukturen in Graphit in dieser Form erwies als ungeeignet.

Der zweite Typ der Graphitkokille (Abb. 15b) ist eine dreiteilige zylindrische Kokille, sie besteht aus einem Korpus (Durchmesser 25 mm), Gießtrichter (14 mm) einem Stempel (d=10 mm) und einem Kupferadapter. Für die Durchführung von Gießversuchen mit Al-Bronze in diese Graphitkokille wurden zunächst Stempeln mit Mikrostrukturen gefräst (Abb. 15b). Die Kokillen wurden auf 400°C aufgeheizt, hier wurde eine sehr gute Abbildung der Oberflächen der Mikrostrukturen erreicht (Abb. 15c). Eine vollständige Formfüllung von Mikrostrukturen konnte jedoch auch hier nicht erreicht werden. Wiederum kann das Abbrechen vom Graphitstückchen in diesen Bereichen (innerhalb eines konzentrisches Rings) vermutlich auf auftretende Zugspannungen als Resultat der unterschiedlichen Wärmeausdehnung zwischen Graphit ($4,2-5,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) und Al-Bronze ($17 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) sowie auf den Schrumpf von Al-Bronze von Gieß- auf den Raumtemperatur zurückgeführt werden. Trotz dieser auftretenden Unzulänglichkeiten wurde dieser Typ Graphitkokille bei den Versuchen zum Verbundguss mit Einlegeteilen verwendet.

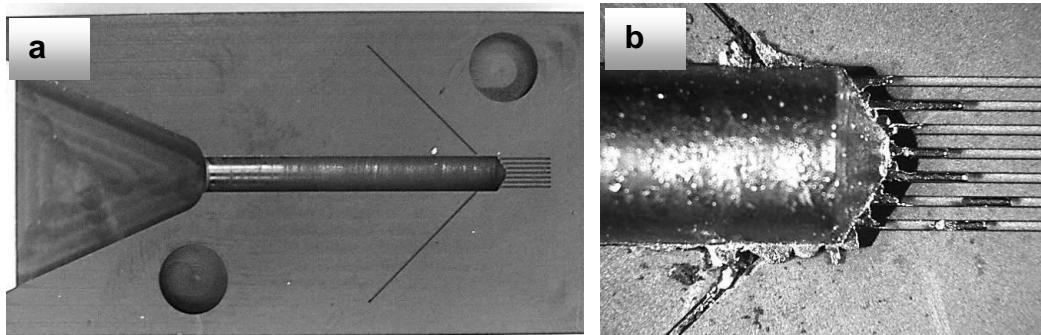


Abb.14: a) Zweiteilige Eckige Graphit Kokille mit Mikrostrukturen und Entlüftungskanälen; b) Gussteil: Staqb mit Mikrostrukturen in Graphitkokille mit Entlüftungskanälen ($T_F=400^\circ\text{C}$)

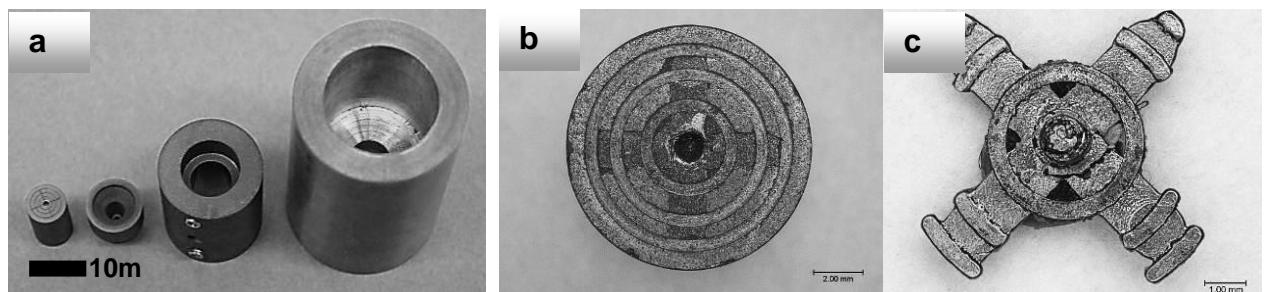


Abb.15: a) Dreiteilige Grafit Kokille mit Adapterring aus Kupfer; b) Stempel Graphit mit gefrästen Mikrostrukturen; c) Gegossen Mikrostrukturen in Graphitkokille

Verbundguss Metall-Metall, hergestellt in Graphitkokillen

Für die Durchführung der Gießversuche mit dem Ziel, einen kraftschlüssigen- und/oder stoffschlüssigen Verbund zwischen zwei metallischen Werkstoffen herzustellen, wurde das Verfahren der Schleuderguss-technik in Graphitkokillen angewandt. Die ersten eingesetzten metallischen Einlegeteile waren Bohrerköpfe mit Durchmessern von 1,5 mm und 1 mm, aus Werkzeugstahl-HSS. Sie wurden in der vorgeheizten Graphitkokille bei 700°C und 850°C mit Al-Bronze umgossen. Der hergestellte Verbund lässt eine Stoffschlüssige Verbindung mit klarer Phasengrenze erkennen (Abb. 16).

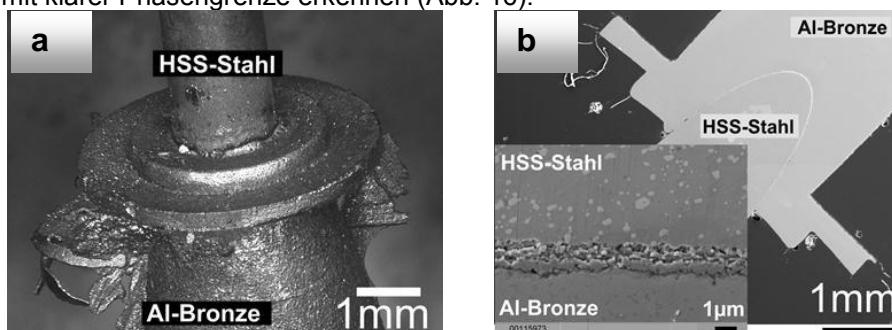


Abb.16: a) Verbundguss Werkzeugstahl-HSS mit Al-Bronze umgegossen; b) REM Aufnahmen der Kontaktfläche

Zur Durchführung weiterer Gießversuche wurden eigens dafür Einlegeteile aus Al-Bronze, Titan (Grade I) und V2A-Stahl hergestellt (Abb. 17). Die Einlegeteile zeichnen sich durch eine komplexe Form aus, die große Kontaktfläche zwischen den kombinierten Werkstoffen lässt eine gründliche Charakterisierung der hergestellten Verbindungen zu. In Tabelle 3 sind die Kombinationen zwischen Einlegewerkstoff und Gießwerkstoff der durchgeföhrten Versuche aufgelistet.

Tabelle 3: Realisierte Metall-Metall Kombinationen

Gießwerkstoffe	Einlegeteil	Gießatmosphäre / Vorwärmtemperatur	
Al-Bronze		Vakuum:	RT; 200°C, 400°C, 450°C, 600°C, 750°C
Schmelztemperatur: 1020°C- 1040 °C	Titan (Grade I) V2A	Argon:	450°C 450°C
Titan (Grade I)		Vakuum:	RT; 200°C, 400°C, 450°C, 600°C, 750°C
Schmelztemperatur: 1668 °C	Al-Bronze V2A	Argon:	550°C 450°C
V2A			
Schmelztemperatur: 1420°C- 1470 °C	Al-Bronze	Argon:	550°C/
Wironit	Al-Bronze	Argon:	450°C, 550°C
Schmelztemperatur: 1330°C- 1350 °C	Titan (Grade I)	Argon:	150°C, 450°C

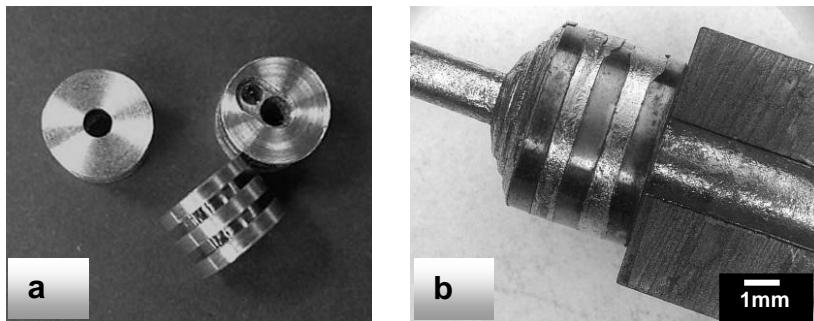


Abb.17: a) Einlegeteile aus Al-Bronze, Titan und V2A; b) Verbundguss: Al-Bronze gegossen in Einlegeteil aus Titan ($T_F=450^\circ\text{C}$)

Naheliegend ist, das metallische Einlegeteil mit einem Werkstoff zu umgießen, der einen niedrigeren Schmelzpunkt besitzt. Als Beispiel sei hier das Umgießen von Ti-Strukturen mit Al-Bronze genannt, wie im Folgenden beschrieben. Jedoch, unter den speziellen Bedingungen des Mikrogießens und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten, Wärmekapazitäten, Schmelzpunkte oder –intervalle der Partner und auch der Kokille, liegt die Vermutung nahe, dass auch unter bestimmten Umständen das Umgießen metallischer Einlegeteile mit einem höher schmelzenden Gusswerkstoff möglich sein müsste. Auch hierzu wurden erste empirische Versuche durchgeföhr. Die Herstellung eines Verbundes durch Gießen mit Titan, das eine deutlich höhere Schmelztemperatur (1668°C) besitzt, in Al-Bronze (mit Schmelzintervall von $1020\text{--}1040^\circ\text{C}$) wurde bei unterschiedlichen Formtemperaturen (Tabelle 3) realisiert (Abb. 18). Ziel war hier festzustellen, ob dieses Vorgehen möglich ist, sowie das Bestreben, eine form- oder kraftschlüssige Verbindung herzustellen. Die zur Realisierung dieses Ziels notwendige rasche Erstarrung der Ti-Schmelze wird begünstigt durch die niedrigeren Temperaturen der anderen beteiligten Komponenten (Einlegeteil und insbesondere Kokille). Aus dem Versuchen ist zu entnehmen das die äußeren Seitenkanäle in der Regel nicht ausgeflossen sind, so konnte die Schmelze beim Gießprozess noch die breite Welle durchpassieren und rasch erstarren (Abb. 18b). Die Welle selbst weist keinerlei Reaktionen auf. Eine sehr glatte, metallisch glänzende Oberfläche (Abb. 18a) ist bis 600°C Formtemperatur zu beobachten, oberhalb tritt eine blaue Färbung auf. Eine stoffschlüssige Verbindung konnte auch bei höheren Formtemperaturen nur stellenweise entlang der Welle, vor allem am Bohrungseingang und unten auf dem Wellenansatz, festgestellt werden (Abb. 18c). Ähnliche Ergebnisse zeigte die hergestellte Kombination durch Gießen vom Titan in V2A-Stahl. Abb. 19a. zeigt einen Ausschnitt aus dem Bereich der Wellenspitze. Verbindungen zwischen Einlegeteilen aus Titan, umgossen mit Al-Bronze (Abb. 19b) oder mit Wironit (Abb. 19c) in Graphitkokillen (Tabelle 3), zeigen allgemein eine gute Formfüllung bei Gießvorgängen sowohl unter Vakuum als auch unter Ar-Atmosphäre. Hier konnte die Entstehung einer guten formschlüssigen, und teilweise vor allem in Seitenkanälen die Entstehung einer kraft- und stoffschlüssigen Verbindung festgestellt werden (Abb. 19b,c).

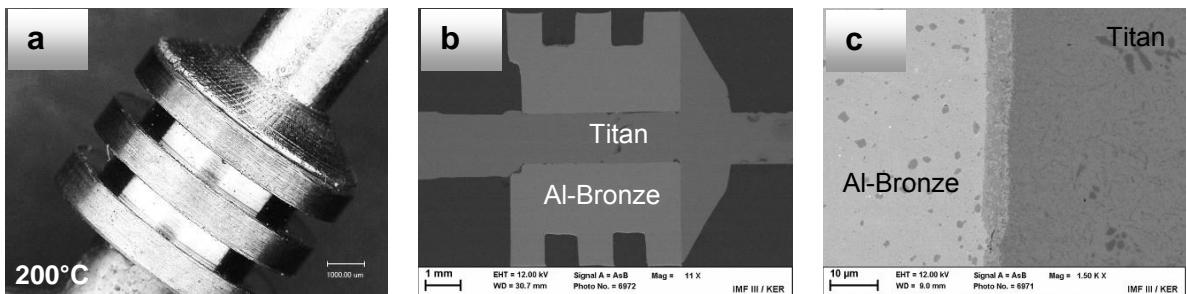


Abb. 18: Verbundguss: a) Titan gegossen in Einlegeteile aus Al-Bronze; b) Querschliff, REM Aufnahme, Titan gegossen in Al-Bronzen ($T_F=450^\circ\text{C}$); c) Ausschnitt (Bild b) im Bereich der Wellenspitze

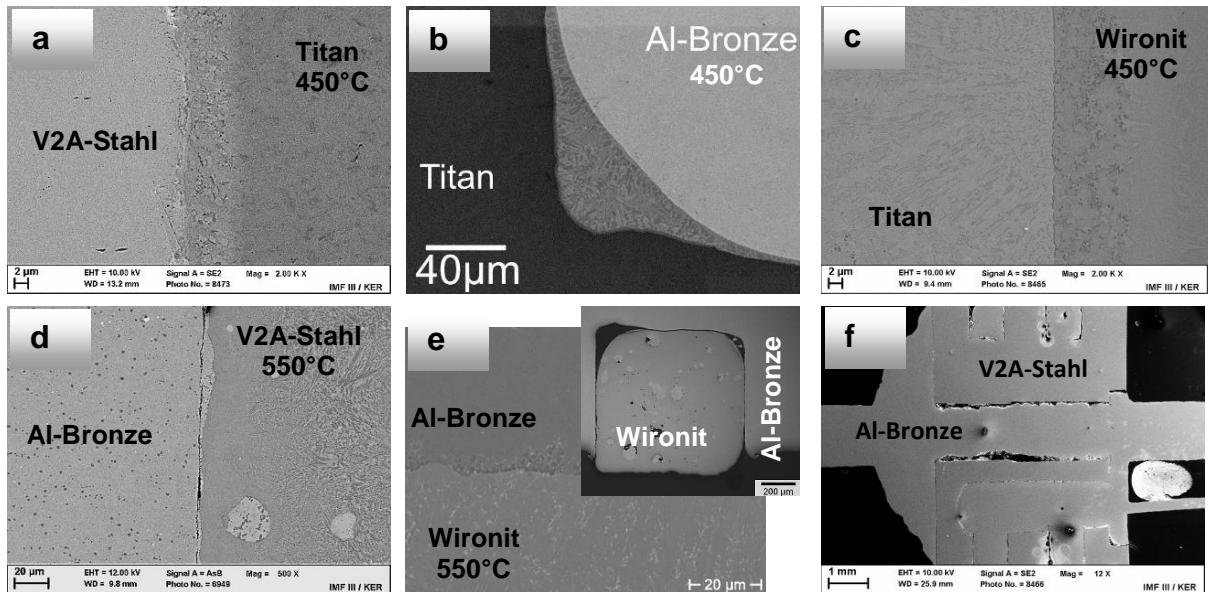


Abb. 19: Verbundguss Metall-Metall - REM-Aufnahmen: a) Titan gegossen in V2A-Stahl; b) Al-Bronze gegossen in Titan; c) Titan gegossen in Wironit; d) V2A-Stahl gegossen in Al-Bronze; e) Wironit gegossen in Al-Bronze; f) Al-Bronzen gegossen in V2A-Stahl

Beim Umgießen von Einlegeteilen aus Al-Bronze mit V2A-Stahl ($T_F=550^\circ\text{C}$) oder Wironit ($T_F=450, 500^\circ\text{C}$) trat partielles Aufschmelzen der Einlegeteile aus Al-Bronze auf (Abb. 19d,e). Dies röhrt daher, dass die Differenz der Schmelztemperaturen zwischen Wironit und V2A-Stahl einerseits und von Al-Bronze andererseits nicht so groß ist, so dass es zu einem raschen Erstarren der Schmelze während des Gießprozesses kommen kann. Hier ist generell ein formschlüssiger Verbund zwischen Wironit bzw. V2A-Stahl und Al-Bronze zu beobachten, mit wenigen Ausnahmen; so ist z.B. in Abb. 19 e im Hintergrund ein kraftschlüssiger Verbund zu sehen. Beim Gießen von Al-Bronze ($T_F=450^\circ\text{C}$) in Einlegeteile aus V2A-Stahl (Abb. 19f) konnte gar kein Kontakt zwischen den beiden hergestellt werden.

Fazit: Der Einbau einer Heizmanschette in die Schleudergießanlage machte es möglich, Gießversuche in Vakuum oder in inerter Atmosphäre nach einer „In-situ“ Vorrwärmung der Gießkokille zu realisieren. Ein Vorteil von Graphitkokillen ist die Vermeidung unerwünschter Reaktionen zwischen Einlegeteilen und Gießmaterial. Aus den unternommenen Kombinationen ließ sich eine Differenzierung hinsichtlich der Kompatibilität feststellen, so konnten sowohl formschlüssige- und kraftschlüssige Verbindungen hergestellt werden.

Mikroguss für komplexe dreidimensionale Mikrobauteile (Welle für den Demonstrator)

Für den Demonstrator der 4. Phase des SFB 499 – Mikro-Gasturbine – war die Fertigung der Turbinenwelle durch Mikrogießen von Al-Bronze vorgesehen. Da bei der Herstellung der Turbinenwelle die engen Maßtoleranzen einzuhalten waren, wurden entsprechende Vorversuche vorgeschaletet. So wurde eine Serie von zehn Gießversuchen mit Al-Bronze in Wachsaußschmelzverfahren an PMMA Stäbchen als Modelle durchgeführt. Um den Schrumpf der Gussteile zu bestimmen, wurden die Längen und Durchmesser der Gussteile und der PMMA Stäbchen vor dem Guss vermessen. Die Versuche zeigten in allen Stäben keinen Längsschrumpf, sondern eine minimale Verlängerung von 0,37% und einen Durchmesserschrumpf von 0,26%, somit die erforderlichen Dimensionen im Mikroguss können eingehalten werden. Die Welle für den Demonst-

rator bzw. die Mikro-Gasturbine mit einer Länge von 17,1 mm besteht aus 6 unterschiedlichen Sequenzen zylindrischer und dreieckiger Querschnitte mit verschiedenen Durchmessern und Kantenlängen (Abb. 20).

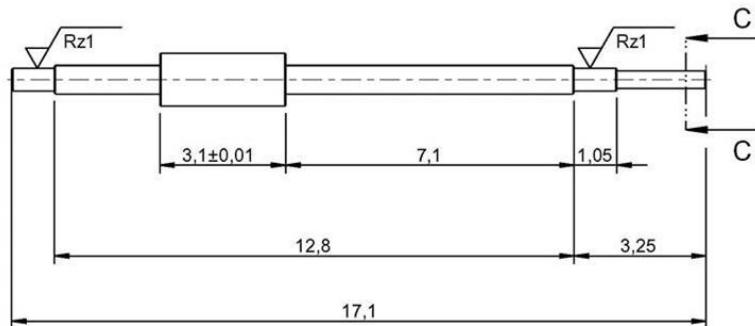


Abb.20: Polygonale Welle für den Demonstrator, Abmessungen in mm

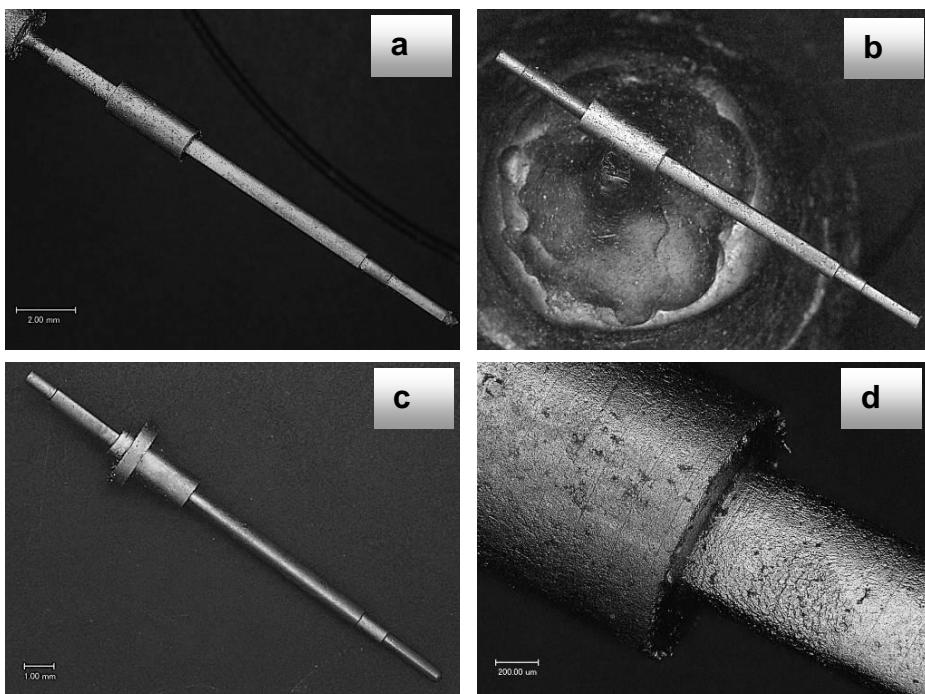


Abb.21: Wellen aus Al-Bronze: a) Im Anguss in senkrechter Position; b) Im Anguss Quer liegend; c) seitlicher Anguss- Ring in senkrechter Position; c) Übergang von einem Formabschnitt in die nächste ($T_F=700^\circ\text{C}$)

Für die Durchführung der Gießversuche zur Herstellung der Welle für den Demonstrator wurden Wellen aus PMMA als Modell eingesetzt. Die polygonale Welle aus PMMA wurde bei Formtemperaturen von 600°C, 700°C und 800°C und 850°C aus Al-Bronze gegossen. Die Herstellung der Welle wurde mit drei unterschiedlichen Angussvarianten realisiert (Abb. 21a,b,c). Der erste Anguss wurde an das eine Ende der Wellen angebracht und in senkrechter Position in der Gießform (850°C) befestigt. Die Welle, die auf diese Weise hergestellt wurde, zeigt eine gute Formfüllung (Abb. 21a), fällt jedoch nach der Trennung vom Anguss kürzer aus. An der hergestellten Welle, die quer in der Gießform (850°C) positioniert wurde, ist eine leichte Verformung zu beobachten (Abb. 21b), die durch die angewandte Kraft beim Ausbetten entstanden ist. In der dritten Angussvariante (Abb. 21c) wurde die Welle senkrecht in der Gießform positioniert, der Anguss wurde aber seitlich angebracht. Anfangs wurde der Anguss in Wachs modelliert. Nach dem Trennen der Welle vom Anguss konnte hier nicht exakt das überschüssige Material vom Angussbereich entfernt werden. Um die Maßhaltigkeit nicht nur in der Länge halten zu können sondern auch im Durchmesser, wurde die Welle auf einen Kunststoffring (Abb. 21c), der als Anguss dient, angebracht. So lässt sich die Welle in diesem Bereich gleichmäßig bearbeiten bzw. das überschüssige Material abtragen. Die besten Ergebnisse in Bezug auf Formfüllung und Abbildungstreue ergaben sich für Wellen, die bei 700°C Formtemperatur hergestellt wurden (Abb. 21d). Auch der Übergang von einem Formabschnitt in die nächste konnte sauber ausgeführt werden.

5.2.1.3 Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Die Versuche zum Verbundguss mit den Gussmaterialien Al-Bronze bzw. Wironit (CrCo-Legierung) einerseits und keramischen Einlegeteilen aus Si_3N_4 zeigten, im Gegensatz zu entsprechenden Versuchen mit ZrO_2 - oder Al_2O_3 -Einlegeteilen, nicht den gewünschten Erfolg, da generell Risse in den keramischen Einlegeteilen auftraten. Die Ursache für diese Risse konnte noch nicht abschließend geklärt werden. Generell waren die Ergebnisse zum Verbundguss Metall-Keramik mit Wironit als Gießmaterial deutlich weniger befriedigend als die mit Al-Bronze, da bei dem Einsatz von Wironit teilweise Reaktionen mit der eingelegten Keramik, aber auch mit der Einbettmasse zu beobachten waren.

Um die geplanten Versuche zum Kokillenguss durchzuführen, war es nicht nur notwendig, entsprechende Materialien für die Gießkokillen auszuwählen und diese Kokillen mit den für die Untersuchungen gewünschten Mikrokavitäten auszustatten. Zusätzlich musste auch für die vorhandene Schleudergießanlage die Gießkammer umgebaut und eine spezielle Heizmanschette angefertigt werden. Hinsichtlich der Kokillenmaterialien ergab sich folgendes Bild: Kupfer als Kokillenwerkstoff erwies sich als unproblematisch bei der Herstellung, jedoch wiesen die abgeformten Mikrostrukturen Deformationen auf. Ebenso trat Legierungsbildung zwischen Gusswerkstoff und Cu-Kokille auf.

Für die als Kokillenmaterialien alternativ ausgewählten hochtemperatur- und korrosionsbeständigen Metalllegierungen war ein deutlich höherer Aufwand zur Mikrostrukturierung (Fräsen und Senkerodieren) notwendig. Auch war die Passung der beiden Kokillenhälften in allen Fällen unbefriedigend, so dass bei den Gießversuchen Metall in die Trennebene auslief. Auch diese Kokillenmaterialien zeigten teilweise Legierungsbildung mit dem Gießmetall. Auch der Einsatz von Graphitkokillen brachte nicht den gewünschten Erfolg, da die in dieses weiche Material eingebrachten filigranen Mikrostrukturen dem Gießverlauf nicht standhielten.

Die Fertigung der Turbinenwellen für den Demonstrator bereitete die wenigsten Schwierigkeiten und konnte erfolgreich bearbeitet werden. Zwar ergaben sich anfängliche Probleme bei der Bereitstellung der PMMA-Modellwellen, da hier der notwendige Anguss anfangs nicht berücksichtigt war, was einen erhöhten Arbeitsaufwand mit sich zog. Aufgrund der geringen Zahl zur Verfügung stehender PMMA-Modellwellen (20 St.) war auch die Anzahl der gegossenen Mikrowellen aus Al-Bronze begrenzt. Eine geplante statistische Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich Dimensionen und Toleranzen konnte somit nicht durchgeführt werden.

5.2.1.4 Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Eine enge Kooperation des Teilprojektes C2 bestand fortlaufend mit den Teilprojekten D1, D2 und der Nachwuchsforschergruppe. Zur Charakterisierung von Prozess-Gefüge-Eigenschaftsbeziehungen wurden Mikroprüfkörper wie Zug- und Torsionsproben, Biegebalken und gekerbte Mikrozugproben unter bestimmten Gießbedingungen vom Teilprojekt C2 hergestellt. Zusätzlich wurden an Teilprojekt D1 für die Charakterisierung von Eigenspannungen Mikrobauteile im Verbundguss Metall-Keramik zur Verfügung gestellt. Für die Herstellung der Gießmodelle aus Kunststoff oder Wachs fand eine Zusammenarbeit mit den Teilprojekten C1 und A3 hinsichtlich geeigneter Werkstoffe, Verfahren und der Auslegung von Angussystemen für die Herstellung der Gießmodelle statt. Das Design für die Herstellung der polygonalen Welle für den Demonstrator der vierten Förderperiode bzw. für die Mikro-Gasturbine in Mikroguss lieferte das TP A1. Für die Herstellung von komplexen Mikrobauteilen bzw. Mikrosystemen im Verbundguss gab es eine weitere Kooperation mit Teilprojekten C1, A3 und C5, die keramische Mikrobauteile lieferten. Eine Gegenüberstellung zur Verfahrensabgrenzung wurde zwischen Teilprojekten C2, C3 und C5 ausgearbeitet. Deren Ergebnisse sind in das AK Kompetenzteam des Zentrums für integrierte Mikrofertigung (ZIM) geflossen. Mit den Teilprojekten B4 und Z3 wurden im Rahmen der Entwicklung einer Gießkokille aus Metall Designs der Gießstrukturen in einer Kokille ausgearbeitet und mittels Senkerodieren hergestellt. Für die Versuche, die Prozesse in Mikroguss zu simulieren, wurden Basisdaten aus den Gießversuchen an das Teilprojekt A4 bereitgestellt.

5.2.1.5 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Verbundguss wird im Allgemeinen durch die gezielte Anwendung von unterschiedlichen Materialien zur Herstellung komplexer Bauteile eingesetzt. Eine breite Anwendung findet Verbundguss im Makrobereich wie z. B. in der Werkzeugindustrie, im Automobil- sowie im Schmuck- und Dentalbereich. Technische Anwendungen sind im Wesentlichen auf größere Bauteile eingeschränkt. Die Verbindung unterschiedlicher Metalle wird meist in Sandform [2,3] mit verlorenen Modellen [3-5] realisiert. Das Gießen der Metalle wird gleichzeitig, aufeinanderfolgend [2,3,6] oder durch Angießen eines Gussteils an ein Einlegeteil [7-10] durchgeführt. Um eine feste Verbindung zwischen den kombinierten Metallen zu erreichen, werden meist Kontaktmittel oder Galvanoschichten mit geringer Oxidationsneigung verwendet [8,9,11,12]. Neben Einlegeteilen aus Metallen werden auch keramische Werkstoffe [3,6] eingesetzt.

Dem Verbundguss in Mikrodimensionen oder für Mikrokomponenten kommt der Verbundguss im Schmuck- oder Dentalbereich am nächsten. Bei der Schmuckherstellung ist das Umgießen von Schmucksteinen mit Edelmetallen als Methode des Fassens [13] bekannt. In der Schmuckherstellung werden auch unterschiedliche Edelmetalle unter Einsatz von Flussmittel Borax Basis oder Galvanoschichten kombiniert [14]. In der Dentaltechnik wird Verbundguss vorwiegend bei der Herstellung prothetischer Konstruktionselemente, z.B. zur Verbindung von Kronen und Brücken eingesetzt [15,16]. Im Bereich der Mikrotechnik ist die Technik des Verbundgusses bisher nicht verbreitet, jedoch gibt es auch hier erste Ansätze; Busse et al. [17] beschreiben die Integration von Kleinstprozessoren und Datenübertragungseinheiten durch Mikroverbundgießen.

Kokillenguss ist ein etabliertes Gießverfahren zur Herstellung von Bauteilen vor allem aus niedrigschmelzenden Legierungen auf Al-, Mg-, Zn-, und Pb-Basis [18,19], aus TiAl- [20] oder Cu-Basis [21].

Über die Anwendung von Kokillenguss als Herstellungsverfahren von Mikrostrukturen sind keine Veröffentlichungen bekannt. In Rahmen der Forschergruppe 702 wird das Verfahren des Mikrokapillardruckgießens entwickelt [22,23]. Im Unterschied zum Kokillenguss, der in Metallformen gegossen wird, ist das Mikrokapillardruckgießen eingeschränkt auf niedrig schmelzende Legierungen (Ag72Cu28, Fe47Sb53) und findet in beschichtete keramische Gießformen statt.

Referenzen

1. Sumeshen, N.: Optimization of micro casting process using a centrifugal casting machine and Aluminum bronze alloy as casting material Bachelor Thesis, 2008
2. Hemmann U., (HARDTOP Gießereitechnologie GmbH): Verringerung von Verscheiß und Abrasion „Guss-Hämmer mit hoher Lebensdauer für die Zement Industrie“ GCL - Global Cement & Lime Magazine, 3/2002
3. Nieman, J.: Method of making an insulated manifold with double cast walls, US Patent 4,243,093 Jan. 6, 1981
4. Northwood, J.E., Crookham, C.: Method of casing a directionally solidified article having a varied composition, united states patent, 3,847.203; Nov.12,1974
5. Osborne, R.: Lost foam casting of dual alloy engine block, US Patent 5,000,244, Mar. 19, 1991
6. Sander, W.; Mielke, S.: Process of joining a ceramic insert which is adapted to be embedded in a light metal casting for use in internal combustion engines; US Patent 4,495,684; Jan.29, 1985.
7. Baur, H.; Busse, P.; Fledersbacher, P.; Bala Wortberg, D.: Method for manufacturing a turbine wheel rotor; US Patent 6,899,522 B2; May 31, 2005.
8. Jorstad J.L., Morley R.A., Overbagh W.H., Steele G.W.: Process for creation of metallurgically bonded inserts cast-in-place in a cast aluminum article, US Patent 5,333,668, Aug.2, 1994
9. Papis,K.J.M., Löffler, J.F., Uggowitz, P.J.: Light metal compound casting, Science in china Series E: technological Science, 52,1,46-51, 2009
10. Thompson, E.A.: Method of forming castings of different metals, US Patent 3,752,212 Aug. 14,1974
11. Papis,K.J.M., Hallsted, B., Löffler, J.F., Uggowitz, P.J.: Interface formation in aluminium-aluminium compound castin, Acta Materialia 56,3036-3043,2008
12. Vishnevsky, C., Graham, L.D.: Method for improving metallurgical bond in bimetallic castings, US Patent 4,008,052, Feb. 15, 1977
13. Bergagnini, N.: Jewelry assembly with dropped stone, US Patent 6,006,547, Dec. 28, 1999
14. Wiesner, K.: Verbundguss für Schmuckanwendungen, C-Hafner GmbH + Co., www.C-hafner.de
15. Lenz, E.: Titan als Werkstoff für kombiniert festsitzenden und abnehmbaren Zahnersatz Sonderdruck aus Innovationen für die Zahnheilkunde, Herausgeber: B.-J. Heinenberg , Balingen Spitta Verlag, ISBN: B0028OJ7PA, Jan. 1998
16. Wagner E.: Werkstoffkunde der Dental-Edelmetall-Legierungen, München, 1980
17. Busse, M.; Wöstmann, F.-J.; Müller, T.; Melz, T.; Spies. P.; Intelligente Gussteile – Einsatz adaptorischer Komponenten in Kombination mit Gussteilen; Gießerei (93) (4) (2006), pp. 48-53.
18. Joshi, V., Srivastava, A., Shivpuri, R.: Intermetallic formation and its relation to interface mass loss and tribology in die casting die, Wear 256 1232–1235, 2004
19. Osório, W.R.; Santos, C.A.; Quaresma, J.M.V.; Garcia, A.: Mechanical properties as a function of thermal parameters and microstructure of Zn-Al castings; Journal of Materials Processing Technology (143-144) (2003), pp. 703-709.
20. Eylon, D.; Keller, M.M.; Jones P.E.: Development of permanent-mold cast TiAl automotive valves; Intermetallics (6) (1998), pp. 703-708.
21. Rasgado, A.M.T., Davey, K.: Thermal models for copper-alloyed dies in pressure die casting, Applied Mathematical Modelling 33, 61–80, 2009
22. Bach, F.-W.; Möhwald, K.; Holländer, U.; Nakhosteen, B.: Entwicklung einer neuen Metallgießtechnik für die Mikrotechnik; Z. Metallkd. (92) (2001), pp. 207-211.
23. Bach, F.-W.; Möhwald, K.; Prehm, J.; Roxlau, C. (2010): Metall-Kapillardruckgießen – Gießen im Mikrometermaßstab. Chemnitz: Eigenverlag (Tagungsband 13. Werkstofftechnisches Kolloquium Chemnitz, 37), S. 307–312.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

5.2.2.1 Publikationsorganen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung

1. Baumeister, G., Buqezi-Ahmeti, D., Glaser, J., Ritzhaupt-Kleissl, H.J.: New approaches in microcasting: permanent mold casting and composite casting; *Microsystem Technologies*, 17(2011) S.289-300
2. Kasanicka, B., Okolo, B., Baumeister, G., Auhorn, M., Beck, T., Wanner, A., Hausselt, J., Löhe, D., Schulze, V.: On the relationship between microcasting process, material states and mechanical properties in the gold alloy Stabilor G; *Materials Science and Engineering A*, 501(2009) S.70-80

5.2.2.1 Andere Publikationen

3. Buqezi-Ahmeti, D., Ritzhaupt-Kleissl, H.J., Glaser, J.: Anwendung von Verbundguss zur Herstellung von Mikroteilen; Schriftenreihe: Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen, ISBN 978-3-00-033801-4, Band 041 (2011) S. 433-440 (Tagungsband18.Symp.Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Chemnitz, 30.März - 1.April 2011)
4. Buqezi-Ahmeti, D., Rögner, J., Kennerknecht, T., Ritzhaupt-Kleissl, H.J., Glaser, J.: Potential des Mikro-gießens als Herstellungsverfahren metallischer Bauteile; Tagungsband Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, Kraft, O.; Haug, A.; Vollertsen, F.; Büttgenbach, S. (Hrsg.), 11.-12.10.2011, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 41-48; ISBN 978-3-86644-747-9.

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit Januar 2000 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außer-universitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	Haußelt, J., Prof. Dr.-Ing.	Werkstoffprozess-technik	IAM-WPT,I		
	Ritzhaupt-Kleissl, H.-J., Dr.-Ing.	Prozess- und Ver-suchstechnik	IAM-WPT,	5	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	Vouriot, R.		IAM-WPT,	4	
beantragte Ergänzungsausstattung					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	Buqezi-Ahmeti, D., Dr.		IAM-VPT	39	TVÖD 13
	N.N.		IAM-WPT		SH
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	Glaser, J.		IAM-WPT	19,25	TVÖD 6

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

- 1 Dr.-Ing. H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, früherer Leiter der Abteilung PVT am IAM-WPT, leitet das Teilprojekt, Koordiniert die Arbeiten im Teilprojekt und ist in dieser Funktion unmittelbarer Betreuer der wiss. Mitarbeiterin.
- 2 Prof. Dr.-Ing. J. Haußelt, Leiter des Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT) sowie des Lehrstuhls Werkstoffprozesstechnik in der Mikrosystemtechnik am IMTEK, Universität Freiburg, betreut das Teilprojekt hinsichtlich der wissenschaftlichen Fragestellungen.
- 3 R. Vouriot, Der technische Mitarbeiter ist für den Aufbau und die Instandhaltung komplexer Versuchseinrichtungen im Bereich Elektrotechnik zuständig. Ferner führt er in Absprache mit der wissenschaftlichen Mitarbeiterin rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen der Gussteile durch.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

- 1 Dr. D. Buqezi-Ahmeti, ist als wissenschaftliche Mitarbeiterin für die Durchführung und Auswertung der vorgesehenen Experimente verantwortlich. Sie pflegt die Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten und verschiedenen Arbeitskreisen.
- 2 N.N. (studentische Hilfskräfte): Die studentische Hilfskraft ist für die Durchführung von grundlegenden, routinemäßigen Arbeiten (Gussmodelle montieren, Einbettmassen anmischen und messtechnische Routinearbeiten) zuständig.
- 1 J. Glaser (Techniker) Der technische Mitarbeiter unterstützt die wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der Durchführung der Laborarbeiten und ist zuständig für die Betreuung der Laborgeräte und ihre technische Anpassung an die speziellen Anforderungen im Mikroguss.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt C3

5.1.1 Titel:

Automatisierung – Sinterfügen

Automation – Thermal Sinter-Joining

5.1.2 Projektleitung

Munzinger, Christian, Dr.-Ing., geb. 17.03.1973 (seit 01.10.2010 nur beratend tätig)

Fleischer, Jürgen, Prof. Dr. Ing., geb. 07.01.1961

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Produktionstechnik (wbk)

Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-44011

E-Mail: juergen.fleischer@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Sinterfügen von Grünlingen

Beim Fügen von Bauteilen mit nachgelagertem Sinterprozess wurden zum Zeitpunkt der Antragsstellung bereits mehrere Technologien auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht. Dazu zählten Sinterfügen, Zwei-Komponenten-Pulverspritzguss (2K-PIM), Foliensintern und Pulversintern. Beispielsweise zu nennen sind die Arbeiten der Bundesanstalt für Materialforschung zur Verbindung von keramischen Komponenten im Grünzustand durch Niederdruckspritzgießen. Dabei werden Komponenten mit unterschiedlichen Pulverpartikelgrößen miteinander im Grünzustand verbunden. Das zur Herstellung der Bauteile verwendete Niederdruckspritzgießen unterscheidet sich jedoch vom Herstellungsverfahren Hochdruckpulverspritzgießen der Bauteile im vorliegenden Projekt, da aufgrund der geringeren Verdichtung der Partikel im Werkzeug andere Entbindungs- und Sintereigenschaften auftreten.

Am ehemaligen Forschungszentrum Karlsruhe existierten bereits fundierte Erfahrungen auf dem Gebiet des 2K-PIM, welches im Rahmen des SFB 499 untersucht wurde. Es handelt sich um ein Pulverspritzgießverfahren (PIM), welches besonders großserientauglich ist [Ruh-07]. Sinterfügen auf der anderen Seite ist ein Verfahren, das für kleine und mittelgroße Serien geeignet ist, da es sehr flexibel auf wechselnde Bauteilkombinationen eingestellt werden kann. Zum Zeitpunkt der Antragstellung, wie auch heute noch, existieren außerhalb des SFB 499 TP C3 keine systematischen Untersuchungen zum Sinterfügen von PIM-Grünlingen, besonders im Mikro- und Kleinstteilebereich. Die einzigen bekannten Arbeiten beschränken sich auf wenige Untersuchungen von Zhang am Singapore Institute of Manufacturing und Miura an der Kumamoto University in Japan, die nicht weiter verfolgt worden sind.

Greif-, Handhabungs- und Spanntechnik von Micro-PIM-Grünlingen

Im Bereich der Mikrogreiftechnik existierten zum Zeitpunkt der letzten Antragstellung zahlreiche Greifentwicklungen seitens Forschung und Technik, die sich sowohl hinsichtlich Aktorprinzipien als auch Applikationsschwerpunkten unterschieden. Die unterschiedlichen Arten, wie sie im Antrag der zweiten Förderperiode vorgestellt wurden, umfassten u.a. Vakuumgreifer, elektrostatische Greifer, Adhäsionsgreifer [Hes-02a] und mechanische Zangengreifer. Arbeiten zu Greif- und Handhabungssystemen, die entsprechende Anforderungen seitens des Prozesses wie der Micro (μ)-PIM-Prozess aufweisen, waren zum Zeitpunkt der Antragsstellung zur 4. Phase außerhalb des SFB 499 nicht bekannt.

Auf dem Gebiet der Spanntechnik waren verschiedene Entwicklungen aus Industrie und Forschung bekannt, die sich mit dem Spannen von Mikrobauteilen oder auch Grünlingen befassten. Dabei blieben jedoch die speziellen Anforderungen an μ -PIM-Grünlinge unberücksichtigt. Arbeiten zur Montage von fragilen Mikrokomponenten mit ähnlichen Material- und Prozesseigenschaften wie μ -PIM-Grünlinge waren nicht bekannt.

Prozessverkettung im Micro-PIM-Prozess

Um eine automatisierte Produktionszelle für das Sinterfügen von μ -PIM-Bauteilen aufzubauen, ist die Verkettung der Formgebung mit der Montage und den thermischen Prozessen des Entbinderns und Sinterns sowie nachgelagerten Prozessen eine wesentliche Voraussetzung. Zum Zeitpunkt der letzten Antragstellung beschäftigten sich die Arbeiten seitens Forschung und Industrie lediglich im Makrobereich mit dieser Themenstellung. Diese Arbeiten wurden im Antrag zur vierten Förderphase dargestellt. Weitere Arbeiten zur Prozessverkettung im μ -PIM-Prozess waren außer den im SFB 499 durchgeführten Arbeiten dem Antragsteller nicht bekannt.

Zielsetzung 4. Phase

Gesamtziel des Teilprojektes C3 in der 4. Förderphase war die Konzeption, Umsetzung und Optimierung einer geschlossenen automatisierten Prozesskette im Bereich des μ -PIM-Prozesses. Aufbauend auf den Ergebnissen zum Sinterfügen von Welle-Nabe-Verbindungen mit verschiedenen funktionalen Eigenschaften sowie des Dosierschneckengehäuses war es in Teilprojekt C3 das Ziel, durch Sinterfügen komplexe Baugruppen mit Hohlräumen, Hinterschneidungen und beweglichen Teilen automatisiert herzustellen. Die innovative Idee des Teilprojekts ist hierbei die Nutzung thermisch induzierter Vorgänge während des Sinterns zur aufwandsreduzierten Herstellung von komplexen Baugruppen, die, wenn überhaupt, nur durch nachgeschaltete Bearbeitungs- und Montagevorgänge und zusätzliche Bauteile darstellbar waren.

Der Ansatz des Projekts ist die Umgestaltung der Prozessabfolge „Spritzgießen, Entbindern, Sintern, Kalibrierung und Montage“ hin zur Prozessabfolge „Spritzgießen, Kalibrierung, Montage, Entbindern und Sintern“, d.h. eine Vorverlagerung von Kalibrierung und Montage. Der im Rahmen des Sintervorgangs durchgeführte Fügevorgang sollte dazu führen, einsatzbereite Baugruppen zu erzeugen. Dieses Prinzip wäre als „ready-to-use“ zu bezeichnen. Damit wird ein System zur Verfügung gestellt mit dessen Hilfe Baugruppen erzeugt werden, deren Funktionsbereitschaft im Rahmen des thermischen Prozesses entsteht. Die Idee und der Ansatz des Projekts lässt sich am Beispiel eines Rückschlagventils erläutern (Abbildung 1 links).

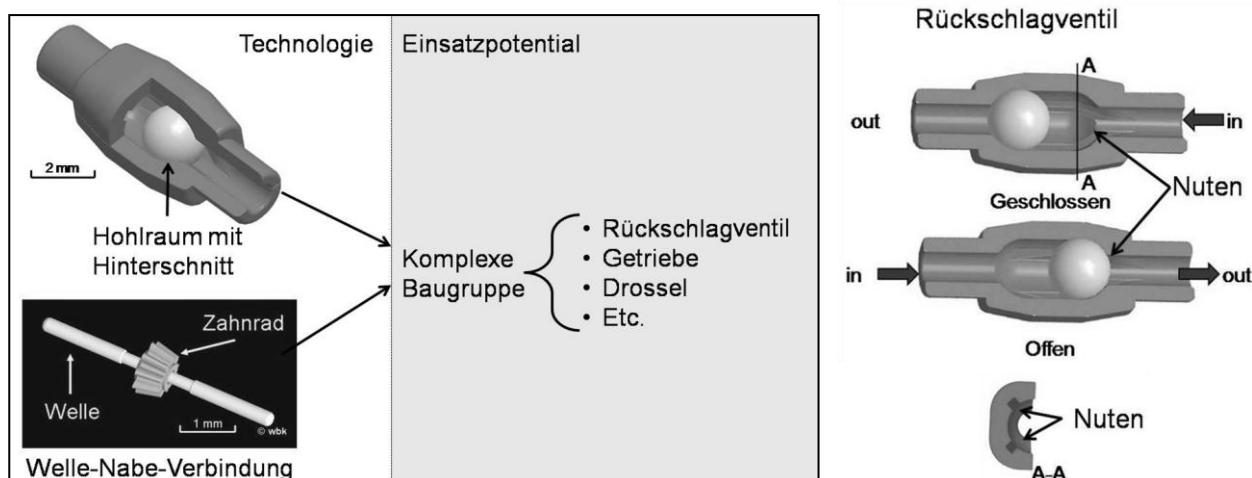


Abbildung 1: links: Herstellung komplexer Baugruppen als Potential des Sinterfügens; rechts: Funktionsweise des Rückschlagventils mit beweglicher Ventilkugel

Ein Rückschlagventil besteht aus einem Gehäuse, einem Dichtsitz und einer Kugel, die in Abhängigkeit von der Strömungsrichtung den Durchfluss sperrt. Im Fertigprodukt muss die Kugel gegen Herausfallen gesichert sein und sich frei im Gehäuse bewegen können (Abbildung 1 rechts). Bei der Herstellung des Rückschlagventils mit einer etablierten Prozesskette würde die Kugel nach dem Sintervorgang in ein zweiteiliges Gehäuse eingebracht und die beiden Gehäusehälften danach in axialer Richtung montiert bzw. zur Sicherstellung der Dichtheit verklebt.

Durch die Vorverlagerung des Montageprozesses in der umgestalteten Prozessführung kann die Kugel in die beiden längs geteilten grünen Gehäusehälften eingelegt werden und die komplette Baugruppe durch den nachgeschalteten Sinterprozess fertig gestellt werden. Durch dieses Vorgehen werden verschiedene Potenziale realisierbar. Einerseits besteht die Möglichkeit, über die Montage von vergleichsweise einfach gestalteten Grünlingen und damit einfachen Werkzeugen und Spritzgießprozessen, komplexe Fertigteile wie Gehäuse mit Hinterschneidungen zu realisieren. Andererseits erlaubt der vorverlagerte Montageprozess beispielsweise die Integration von beweglichen Komponenten, so dass nach dem Sintervorgang funktionsintegrierte Fertigprodukte entstehen.

Zu den zentralen Herausforderungen, die im Verlauf der Arbeiten angegangen werden mussten, zählten die Handhabung, Spannung, ggf. Kalibrierung (z. B. durch Zerspanen, Pressen, Biegen, etc.) und Montage der

Grünlinge nach dem Spritzgießprozess sowie eine geeignete Prozessführung während des Entbinderns bzw. Sinterns zur Herstellung einer fertigen Baugruppe. Ausgehend von den während der dritten Phase gesammelten Erkenntnissen zur Prozessführung wurde der Schwerpunkt der Arbeiten in der vierten Phase auf die Handhabung, Spannung, Kalibrierung und Montage der Grünlinge zur komplexen Baugruppe gelegt. Der derzeitige Stand der Arbeiten zur Prozessführung musste erweitert und vertieft werden, da das Dosierschneckengehäuse der 3. Phase zwar teilweise verbunden aber nicht flüssigkeitsdicht hergestellt werden konnte. Auf den Erfahrungen mit dem Dosierschneckengehäuse konnte in der letzten Förderphase aufgebaut werden. So sollte eine dichte Verbindung der Gehäusehälften des Ventils beispielsweise mit Hilfe von Profilierungen erreicht werden. Insgesamt sollte zum Abschluss des Projekts eine geschlossene automatisierte Prozesskette im μ -PIM-Bereich für komplexe sintergefügte Baugruppen vorliegen und damit das ursprüngliche Gesamtziel des Teilprojekts erreicht werden.

Ergebnisse sowie angewandte und neu entwickelte Methoden

AP1: Montagegerechte Auslegung

Ziel der in diesem Arbeitspaket durchzuführenden Analysen war eine montagegerechte Auslegung von Bauteilen zur Erzeugung sintergefügter Baugruppen. Zu diesem Zweck wurden geometrische Varianten bei der Bauteilauslegung betrachtet. Die Untersuchungen wurden exemplarisch an einem Mikrorückschlagventil vorgenommen [Mun-09b]. Das Ventil sollte die Darstellbarkeit der Herstellung von hohlen, komplexen Bauteilen mit Hinterschneidungen und beweglichen Komponenten mit dem Verfahren Sinterfügen zeigen. In einem ersten Schritt wurden Möglichkeiten zur Ausrichtung der Teilungsebene des Ventilgehäuses verglichen. Zuvor wurde die Geometrie des Ventilgehäuses aus Abbildung 1 für das Pulverspritzgießen optimiert. Abbildung 2 zeigt CAD-Modelle des optimierten Gehäuses und mögliche Teilungsrichtungen.

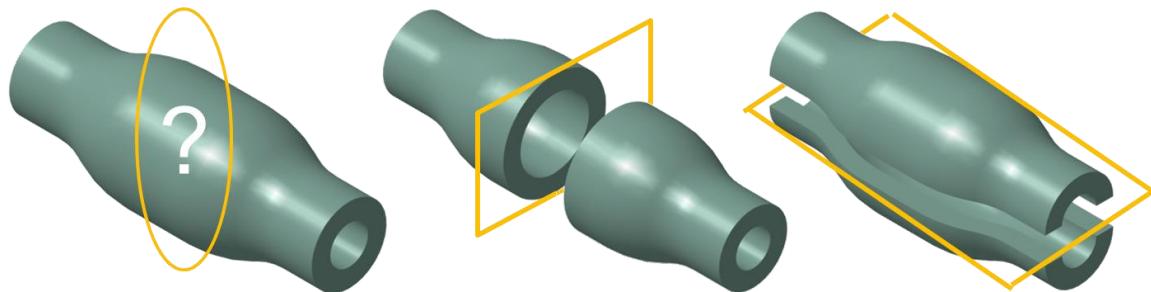


Abbildung 2: CAD-Modelle des optimierten Ventilgehäuses; links: ungeteilt; mittig: Teilung quer zur Bauteilachse; rechts: Teilung längs der Bauteilachse

Bei der Auslegung der Teilungsrichtung sollte das linear zentrische Schwindungsverhalten beim Sinterprozess berücksichtigt werden. Dieses ist am Beispiel einer rotationssymmetrischen Welle-Nabe-Verbindung (WNV) in Abbildung 3 links schematisch dargestellt, die Pfeile deuten die Schwindungsrichtung an. Angestrebt war eine senkrechte Orientierung der Kontaktfläche zur Schwindungsrichtung um Diffusionsvorgänge in der Fügezone zu unterstützen. Um dies zu erreichen wurde das Ventilgehäuse wie in Abbildung 2 mittig dargestellt quer zur Bauteilachse geteilt und mit Profilierungen versehen.

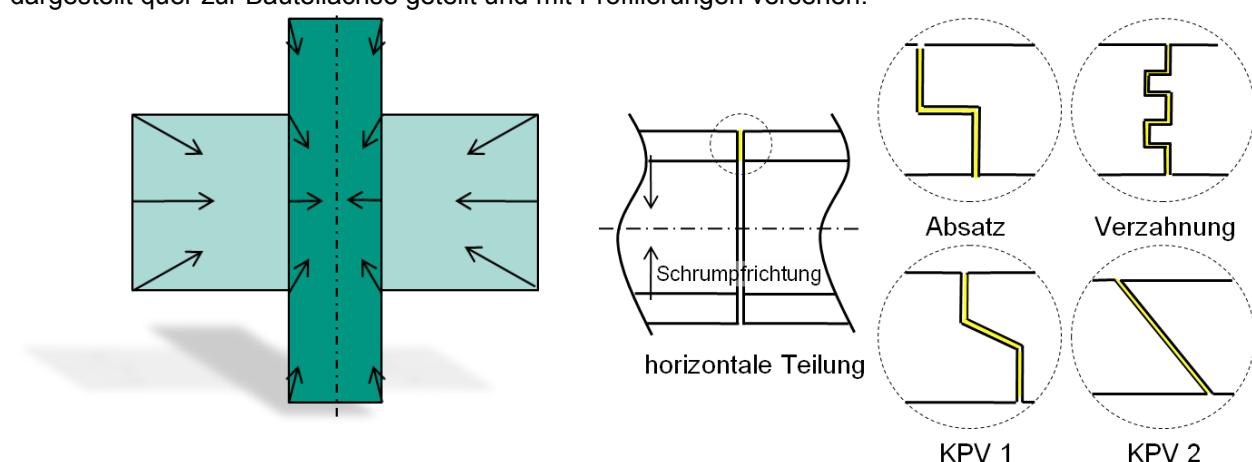


Abbildung 3: li.: linearzentrische Schwindung einer WNV; re.: Konzepte für Profilierungen der Fügeflächen

Für die ausgewählte Teilung - quer zur Bauteilachse (siehe Abbildung 2 mittig) – wurden verschiedene Konzepte für Profilierungen der Fügeflächen betrachtet. In Abbildung 3 rechts werden Beispielkonzepte veranschaulicht. Hinsichtlich einer montagegerechten Gestaltung wurde Konzept „KPV 2“ mit konischen Fügeflä-

chen in Form eines Innen- und Außenkegels am besten beurteilt. Dieses Konzept erfordert auf Grund des passiven Justageeffektes die am besten realisierbaren Anforderungen bezüglich der Positioniergenauigkeit bei der Montage der Bauteilhälften. Zudem ergeben sich für die Fertigung günstige Genauigkeitsanforderungen.

In Vorversuchen wurde die entwickelte Fügeflächengeometrie experimentell auf ihre Eignung hin untersucht. Die Untersuchungen fanden an zylinderförmigen, hohlen Probenkörpern statt, die in Anlehnung an das Ventil an den Enden im Bereich der Fügezone mit Fügekegeln versehen wurden. Die Grundkörper der Proben wurden spanend aus Feedstockvollmaterial hergestellt, um bei den Vorversuchen auf den Einsatz eines kostenintensiven Spritzgießwerkzeugs zu verzichten. Die grünen Grundkörper wurden in einem Nachbearbeitungsschritt mit Hilfe verschiedener spanender Bearbeitungsverfahren mit den Fügekegeln versehen. Nach der manuellen Montage wurden die Proben stehend auf Sinterunterlagen aus Aluminiumoxid entbündert und gesintert. Durch die Gewichtskraft des oberen Probepartners bildete sich ein Kegelpressverband (KPV) aus, der die Stabilität der montierten Baugruppe positiv beeinflusste. Die Proben stützen sich gegenseitig ab. Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt der technischen Zeichnungen, die grünen Probenhälften und ein sintergefügtes Probenpaar aus Carbonyleisen. [Mun-10b]



Abbildung 4: Probekörper für die Untersuchung konischer Fügeflächen beim Sinterfügen [Mun-10a]

Ein Untersuchungsgegenstand war die Auslegung des Fügekegelwinkels. Bei den Untersuchungen der Fügekegelwinkel φ der Probekörper wurde zwischen 11° und 15° variiert. Im Rahmen der Versuche hat es sich gezeigt, dass der flachere Kegelwinkel von 11° deutlich günstiger hinsichtlich der Stabilität der montierten Baugruppe ist und wird deshalb beim Entwurf weiterer Bauteile favorisiert.

Die thermischen Prozesse wurden in einem kontinuierlichen Ofen der Serie MIM Trainer Cremer, bei kleinen Stückzahlen im Haubenofen der Fa. MUT des SFB-Partners IAM-WPT durchgeführt. Die Temperaturführung wurde in beiden Öfen analog zueinander vorgenommen (siehe AP 5).

Die Probekörper wurden nach dem Sinterfügen Belastungstests und metallographischen Untersuchen unterzogen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die entwickelte Fügeflächengeometrie prinzipiell sehr gut für das Sinterfügen geeignet ist. In den Belastbarkeitstests konnten hohe Verbindungsfestigkeiten und an Hand von Schliffbildern nahtlose Fügeflächen nachgewiesen werden.

Durch den Einsatz der verschiedenen Bearbeitungsverfahren zur Herstellung der Fügekegel wurden gezielt unterschiedliche Qualitäten der Fügeflächen hergestellt. Diese wurden an jedem grünen Probekörper an Hand der Oberflächenrauigkeit (siehe Abbildung 5) und der Formhaltigkeit der Fügekegel quantitativ beurteilt. Hierzu wurden mit Hilfe eines Topologieanalysegerätes der Fa. Nanofocus die Oberflächenkennwerte erfasst. Die Kegelwinkel sowie die Rundheit der grünen Fügekegel wurden am Koordinatenmessgerät Werth VCIP HA 400 3D CNC gemessen.



Abbildung 5: Vorgehen bei der Oberflächenmessung eines Fügekegels [Mun-10a, Mun-10b]

Diese Werte wurden der Zugfestigkeit und der Zerberstfestigkeit im Innendruckversuch gegenübergestellt und ausgewertet. Abbildung 6 zeigt einen Zug- und Innendruckversuch eines sintergefügten Probekörpers.

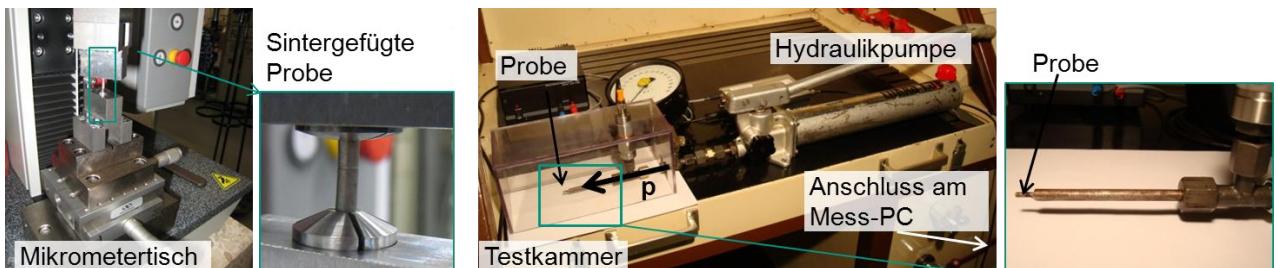


Abbildung 6: Sintergefügter Probekörper im Zug- (links) und Innendruckversuch (rechts) [Mun-10a]

Zur Erzeugung der verschiedenen Qualitäten im Bereich der Fügekegel wurden die Verfahren: Drehen, Fräsen, Schleifen und „Spanen mit einem Einschneider“ zur Nachbearbeitung eingesetzt. Da bis dahin keine Erfahrungen zur spanenden Bearbeitung von Feedstockvollmaterial vorlagen, waren die erzielten Fügeflächenparameter nicht gezielt einstellbar. Aufgrund der resultierenden, nicht ausgewogenen Verteilung der Parameterkombinationen ergab die Versuchsauswertung mit Hilfe der Varianzanalyse keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen den Grünlingsparametern unter der erreichten Verbindungsfestigkeit. Eine einfachere Auswertung, bei der Schwellwerte für die Zugfestigkeit und den Zerberstdruck festgelegt wurden, die für eine hohe Verbindungsqualität standen, zeigte jedoch eindeutige Tendenzen bei der Korrelation zwischen der Fügeflächengüte und der Festigkeit. Dabei zeigte sich, dass Fügeverbindungen, deren grüne Fügeflächen bessere Kennwerte als:

Mittlere Rauheit R_a = 0,5 µm
 Rundheit der Fügekegel R = 9 µm
 Kegelwinkeldifferenz $\Delta\varphi$ = 0,5°

aufweisen, als GUT-Teile verzeichnet werden konnten. [Mun-10a]

Die Ergebnisse wurden an Hand des Mikrorückschlagventils validiert. Abbildung 7 zeigt das entwickelte Mikrorückschlagventil im grünen und gesinterten Zustand, sowie in einer Schnittansicht.



Abbildung 7: Mikrorückschlagventil aus 17-PH Edelstahl

Das Ventilwerkzeug wurde mittels im Werkzeugbau üblichen Herstellungsverfahren ohne Angaben bezüglich Formtoleranzen und Rauigkeit hergestellt. Die gemessenen Werte am Werkzeug lagen bei:

		WZ für Außenkonus	WZ für Innenkonus	
Mittlere Rauheit	R_a	0,7 µm	0,4 µm	
Rundheit der Fügekegel	R	4 µm	8 µm	
Kegelwinkel	φ	21,89°	22,45°	$\Delta\varphi = 0,561°$

Es wurden Ventile aus Carbonyleisen hergestellt, die analog zum Werkzeug vermessen wurden. Die Werte der abgeformten Ventilehälften aus Carbonyleisen lagen bei:

	Außenkonus	Innenkonus	
Mittlere Rauheit	R_a 0,41 µm	0,55 µm	
Rundheit der Fügekegel	R 10 µm	10,6 µm	
Kegelwinkel	φ 22,02°	22,573°	$\Delta\varphi = 0,553°$

Die Ventile wurden ebenfalls im Innendruck- und Zugversuch getestet. Die Zugversuche waren nicht auswertbar, da die Proben vor dem Versagen der Fügezone aus der Einspannung brachen. Die mittlere Zerberstdfestigkeit lag bei $685 \pm 60,4$ bar für Carbonyleisenventile und $218,7 \pm 200,8$ bar für Ventile aus einem 17-4PH-Edelstahl. Des Weiteren wurden Schliffbilder der Fügezone gemacht. Abbildung 8 zeigt zwei Schliff-

bilder längs von sintergefügten Mikrorückschlagventilen aus Carbonyleisen. Die Schritte zeigen, dass eine nahtlose Verbindung möglich ist (grün), jedoch sind die Ergebnisse derzeit noch nicht reproduzierbar (rot).

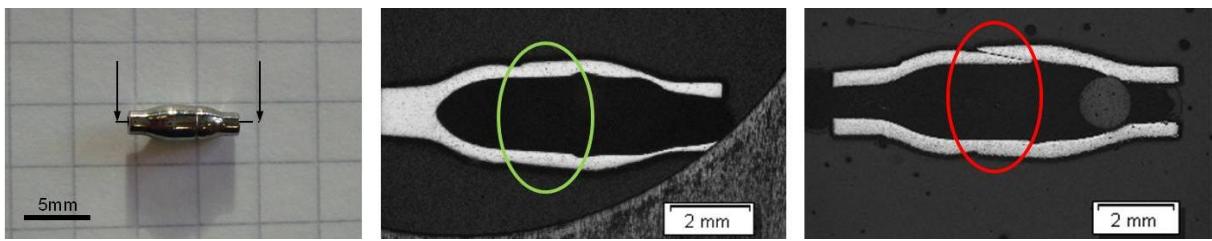


Abbildung 8: Längsschliffe durch Mikrorückschlagventile aus Carbonyleisen [Fle-11a]

Die Schliffbilder der 17-4PH Ventile zeigten in Übereinstimmung mit der hohen Streuung im Innendruckversuch vorerst eine deutlich schlechtere Verbindungsqualität. Eine Verbesserung trat durch die in AP 4 verfolgte Optimierung der thermischen Prozessführung ein.

Ferner wurde an 17-4PH-Edelstahlventilen der Einfluss der Montagekraft auf die Verbindungsqualität untersucht. Zur Durchführung der Versuche wurde eine manuelle Montagvorrichtung entwickelt, mit deren Hilfe sich die Montagekraft über eine vorgespannte Feder einstellen lässt. Die Kraft wurde im Rahmen der Versuche in sieben Stufen im Bereich von 0,7 - 10 N variiert. Abbildung 9 zeigt untereinander die Schritte von drei mit gleich hoher Montagekraft F_M montierter Ventile: links: $F_M = 0$ N; mittig: $F_M = 1,4$ N; rechts: $F_M = 10$ N.

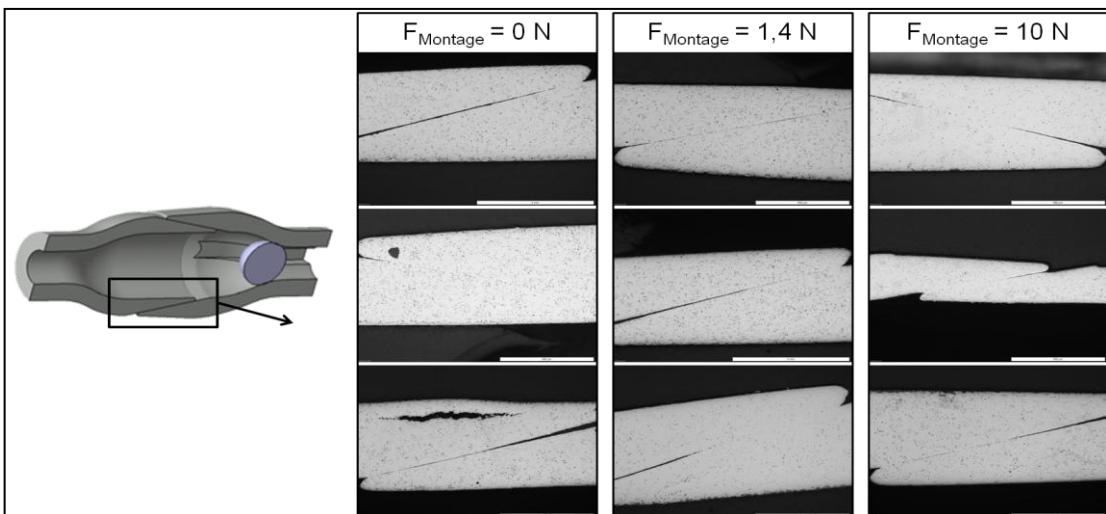


Abbildung 9: Schliffe mit unterschiedlichen Kräften montierter Mikrorückschlagventile

Wie zu sehen ist, konnte an Hand der Schliffbilder kein eindeutiger Einfluss der Montagekraft auf die Verbindungsqualität gezeigt werden.

Die Ursachen für die Schwankungen der Verbindungsqualität sind vermutlich zu hohe Form- und Gestaltabweichungen der Fügekegel. Die Rauheits-, Rundheitswerte und Kegelwinkeldifferenzen der Ventilhälften lagen im Grenzbereich zwischen dem bestimmten GUT- und SCHLECHT-Bereich. An sintergefügten Zugproben soll der Einfluss der Oberflächengüte und Formabweichungen der grünen Fügeflächen auf die Verbindungsqualität beim Sinterfügen weiter untersucht werden [Fle-11]. Die Zugproben für die weitergehenden Untersuchungen wurden bereits entwickelt, und sollen in einem weiterführenden Projekt, welches derzeitig zur Begutachtung bei der DFG vorliegt, in einer Parameterstudie untersucht werden. Gestaltungsrichtlinien für das Sinterfügen können nach Durchführung dieser Versuche erstmalig abgeleitet werden.

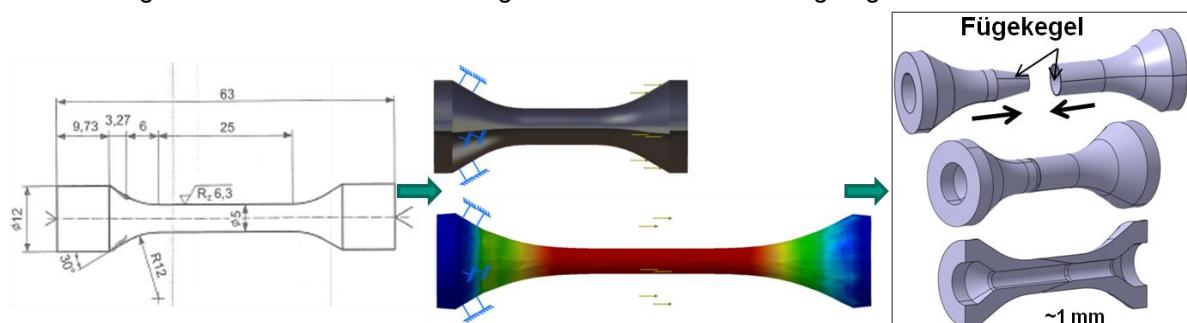


Abbildung 8: Entwicklungsprozess der Zugprobengeometrie für das Sinterfügen [Fle-11a]

Abbildung 8 zeigt den Entwicklungsprozess der Zugprobengeometrie. Basierend auf einer Standardzugprobengeometrie (links) wurde die Probengeometrie mit Hilfe einer FEM-Analyse hinsichtlich einer prozessgerechten Gestalt optimiert (mittig). Rechts in Abbildung 8 ist das CAD-Modell der entwickelten Zugprobengeometrie gezeigt.

AP 2: Montagevorbereitung

Die hohe Qualität der Verbindung der Bauteile an den Fügeflächen ist ein entscheidender Zielparameter für den Erfolg der Verfahrensentwicklung. Ziel dieses Arbeitspaketes war die Bereitstellung von Verfahren zur Unterstützung des Sinterfügeprozesses im Hinblick auf die Erhöhung der Qualität an den Nahtstellen.

Eine Nachbearbeitung der abgeformten Grünlinge kann dazu genutzt werden, die Fügeflächen der Grünlinge für das Sinterfügen zu kalibrieren, das bedeutet die erforderlichen Geometrieparameter nachträglich einzustellen. In der 4. Phase des TP C3 wurde zu diesem Zweck eine spanende Grünlingsbearbeitungsmaschine in die automatisierte Prozesskette μ -PIM integriert. Neben der Kalibrierung kann mit Hilfe der Mikrobearbeitungsmaschine eine geometrische Variantenvielfalt eines abgeformten Grundkörpers erzeugt werden.

AP 2.1: Spannen von PIM Grünlingen

Während der Bearbeitung müssen die grünen, fragilen Micro-PIM-Bauteile sicher und beschädigungsfrei gespannt werden. Vor der Umsetzung einer Spannvorrichtung wurden verschiedenartige Spannprinzipien auf ihre Eignung hin untersucht. Beispielsweise wurde das Vakuumspannprinzip in verschiedenen Varianten getestet. Bei der ersten Variante wurde das Vakuum über eine poröse Al_2O_3 -Keramik-Platte (Metapor) an das zu spannende Bauteil geleitet. Getestet wurden drei verschiedene Ausführungen: ein planer Einsatz, ein profiliertes Einsatz mit Formnest, und ein Einsatz mit Formnest und zusätzlichen Bohrungen. Die maximalen Haltekräfte wurden bei dem profilierten Einsatz mit Bohrungen gemessen, da hier die größte Ansaugfläche vorhanden ist. Jedoch waren die Haltekräfte beim Vakuumspannen für eine Bearbeitung zu gering, weshalb dieses Spannprinzip verworfen wurde.

Parallel dazu wurden als Vorarbeit für die zu entwickelnde Bearbeitungsmaschine in AP 2.2 und die Parameteruntersuchungen in AP1 spanend grüne Probekörper an Werkstattmaschinen hergestellt. Die Proben wurden bei der Bearbeitung mechanisch in Spannzangen gespannt. Beim Spannen der Probenkörper hat sich gezeigt, dass das mechanische Spannprinzip bei adäquater Kraftdosierung durchaus Potential für das Spannen von PIM-Grünlingen hat. Deshalb wurde ein Prüfstand aufgebaut, an dem das mechanische Spannprinzip weiter untersucht wurde. Auf einer mittels Federkraft betätigten Spannvorrichtung wurden zwei verschiedene Spannbackenkonzepte untersucht. Betrachtet wurden zum einen zwei metallische Formbacken, zum anderen die Kombination einer metallischen Formbacke und einer elastischen Spannbacke. Die eingespannten zylindrischen Grünlinge wurden mit einer senkrecht zur Spannkraftrichtung wirkenden Kraft belastet. Die maximale Kraft bis zum Durchrutschen der Grünlinge wurde mit Hilfe eines Kraftmessers erfasst. Diese erreichte die höchsten Werte beim Spannen mit zwei Formbacken ($F_{\max} = 2,5 \text{ N}$).

In einem weiteren Versuch wurde die Wiederholgenauigkeit der Antriebe für das mechanische Spannen untersucht. Im Vergleich standen pneumatische Hubzylinder und ein elektrischer Linearantrieb. In den Versuchen zeigten sich geringere Schwankungen der Spannkraft beim elektrischen Linearantrieb als bei den pneumatischen Hubzylindern. Aufbauend auf den Ergebnissen der Versuche wurde eine mechanische Spannvorrichtung mit auswechselbaren Formbacken und einem elektrischen Linearantrieb realisiert, die in Abbildung 9 dargestellt wird.

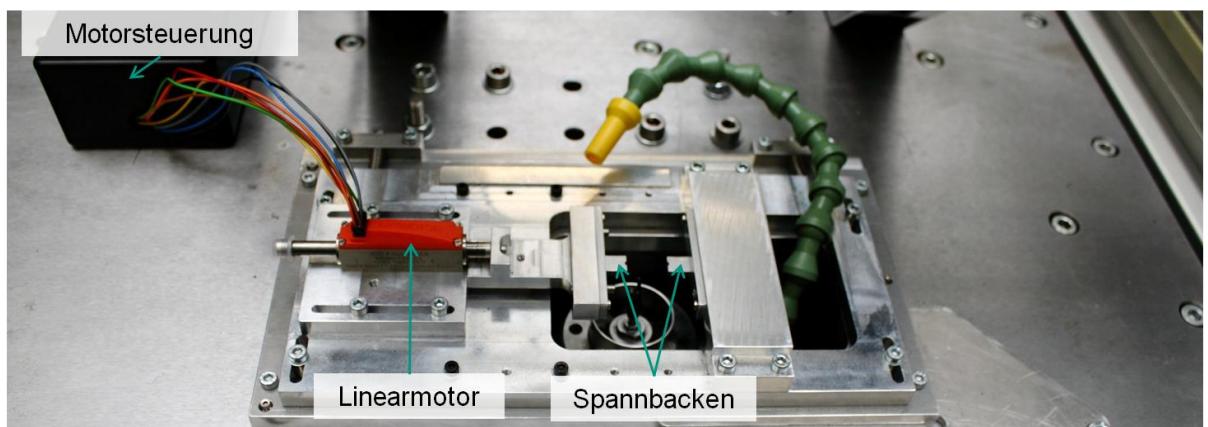
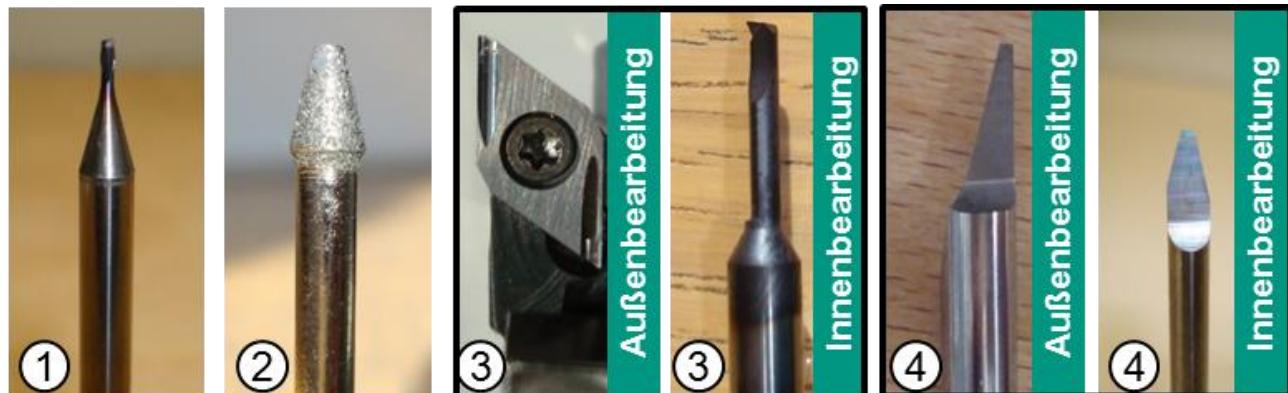


Abbildung 9: Realisierte Spannvorrichtung für PIM-Grünlinge

Die Spannkraft, die über einen Servo-Linearmotor aufgebracht wird, kann präzise geregelt werden, sodass eine Beschädigung der gespannten Grünlinge vermieden wird. Die maximal ertragbaren Kräften und die für ein sicheres Spannen erforderlichen Spannkräfte wurden zuvor experimentell ermittelt. Mit Hilfe der Vorrichung können PIM-Grünlinge sicher und beschädigungsfrei gespannt werden.

AP 2.2: Kalibrierung von PIM-Grünlingen

In Vorversuchen, bei denen spanend Probekörper für AP 1 gefertigt wurden, konnten Erfahrungen bezüglich der Bearbeitung von Feedstockvollmaterial gesammelt werden. Die gezielte Erzeugung unterschiedlicher Oberflächengüten wurde durch den Einsatz verschiedener Bearbeitungsverfahren und -werkzeuge erreicht. Die eingesetzten Verfahren, die verwendeten Werkzeuge und Maschinen, die eingestellten Bearbeitungsparameter sowie die erreichten Oberflächenrauigkeiten sind in Abbildung 10 zusammengefasst. [Mun-10b]



Verfahren	Werkzeug	Maschine	Parameter			Ra [µm]
			n _{ws} [min ⁻¹]	n _{wz} [min ⁻¹]	f [mm/min]	
Fräsen (1)	CC Fräser Ø 1mm	Mikrofräsmaschine	10	9000	0,5	0,47 ± 0,1478
Schleifen (2)	Diamantschleifstift, #120	Präzisionsdrehbank	1700	0	von Hand	2,86 ± 0,4993
Drehen (3)	Drehmeißel	Präzisionsdrehbank	1700	0	von Hand	0,41 ± 0,1835
Drehen (4)	Einschneider	Präzisionsdrehbank	1700	0	von Hand	0,4 ± 0,0381

n_{ws} = Drehzahl Werkstück, n_{wz} = Drehzahl Werkzeug, f = Vorschub

Abbildung 10: Bearbeitungsverfahren, Werkzeuge, Maschinen, Maschinenparameter und erreichte Rauheiten bei der spanenden Grünlingsbearbeitung

An den bearbeiteten Proben, zeigte sich eine annähernd gleich hohe Rauigkeit für die Verfahren Fräsen, Drehen und Drehen mit Einschneidern. Die geschliffenen Proben wiesen hingegen deutlich höhere Rauigkeitswerte auf. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei der Bearbeitung des grünen Feedstockmaterials aus Carbonyleisen mit den Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide kein eindeutiger Einfluss der Größen: Vorschub, Drehzahl und Werkzeug auf die Oberflächenrauigkeit erkannt werden konnte. Tendenziell liefert die Bearbeitung mit Gravierstichel die höchsten Oberflächengüten bei den geringsten Schwankungen. [Mun-10b]

Die Erkenntnisse der Vorversuche flossen in die Entwicklung einer 2-achsigen CNC-Mikrofräsmaschine für die prozessketteninterne Grünlingsbearbeitung ein. Die Maschine wurde, wie Abbildung 11 links dargestellt, in der Prozesskette Sinterfügen zwischen die Spritzgießmaschine und den Montageautomaten integriert. Für die Bestückung der Maschine wurde ein Portalgreifer entwickelt, der die abgeformten Grünlinge aus Magazinen, die über Linearachsen zugeführt werden, entnimmt und an die Spannvorrichtung an der Fräsmaschine übergibt. Die Ansteuerung der Fräsmaschine erfolgt mit Hilfe einer CNC-Steuerung des Typs Siemens Sinumeric 802C, die mit der am wbk entwickelten Prozesskettensteuerung "WHT Control" kommuniziert. Der detaillierte Aufbau der Grünlingsbearbeitungsmaschine ist in Abbildung 11 rechts dargestellt. Aufgrund der geringeren Prozesskräfte bei der Grünlingsbearbeitung konnte eine sehr kompakte Bauweise der Mikromaschine realisiert werden.

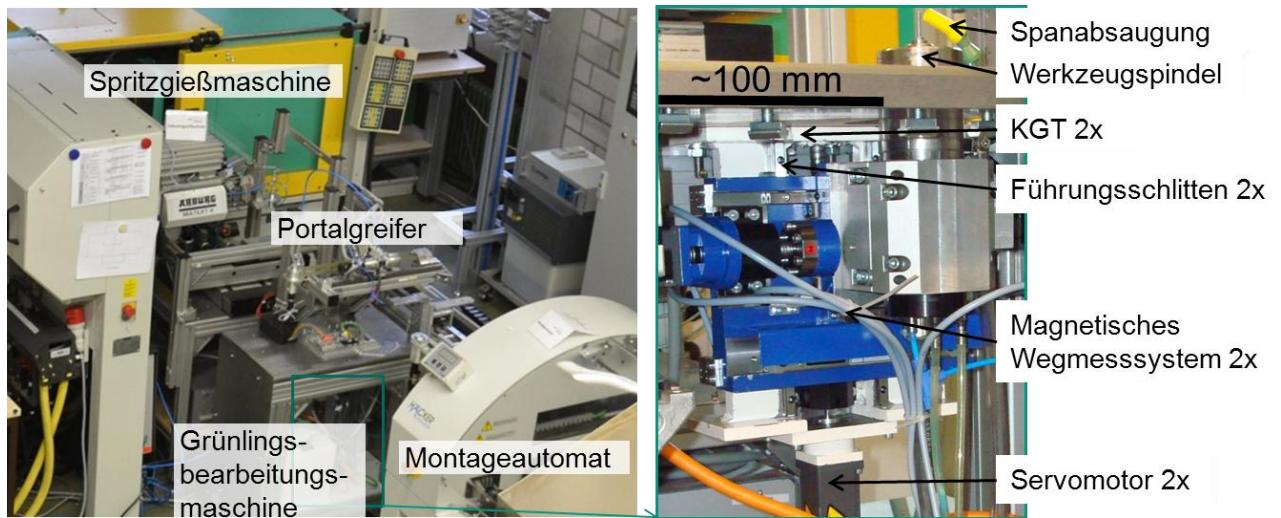


Abbildung 11: links: Grünlingsbearbeitungsmaschine in Prozesskette; rechts: Aufbau der Maschine

Die Maschine wurde 2-achsig mit einem senkrechten Maschinenbett (steife Schweißkonstruktion) und zwei Schlitten ausgeführt, über die die Werkzeugspindel verfahren wird (Verfahrbereiche: z-Richtung: 50 mm, x-Richtung: 20 mm). Für die Führung der beiden Schlitten wurden Rollenwälzführungen ausgewählt, um die erforderliche Steifigkeit sicherzustellen. Der Antrieb der Schlitten wird von Servomotoren und spielfrei vorgespannten Kugelgewindetrieben realisiert. Die senkrecht angeordnete aerostatische Hochgeschwindigkeitsspindel ($n_{\max} = 100\,000\text{ min}^{-1}$) für eine Überkopfbearbeitung der Bauteile, die Vorschubachsen und das steife Bett ermöglichen einen schwingungsfreien Betrieb. Die präzise Positionierung wird über einen Regelkreis mit integriertem magnetischen Wegmesssystem ermöglicht.

Neben der Unterstützung des Sinterfügeprozesses über eine Anpassung der Fügeflächeneigenschaften, wurden in AP 2.2 weitere unterstützende Maßnahmen untersucht. Zum einen wurden die Fügepartner während der thermischen Prozessführung von oben beschwert. Dabei stellte sich heraus, dass selbst kleinste Gewichte im mg-Bereich zu einer Deformation der Fügepartner führen und dieser Ansatz somit ungeeignet ist. Ein weiterer Ansatz zur Unterstützung des Sinterfügeprozesses war die Anwendung der Ultraschalltechnik. Dabei wurden grüne Ventilhälften montiert und mittels einer Ultraschallsonotrode Schwingungen in die montierte Baugruppe eingebracht. Die plane Sonotrode wurde dabei mit einer geringen Kraft manuell auf die obere Ventilhälfte gepresst und zum Schwingen (Frequenz: 35 kHz; Amplitude: 24 bzw. 32 μm) angeregt. Ziel dabei war es die Schwingungen in die Fügezone einzuleiten und durch lokales Aufschmelzen eine Verbindung des Binders in den Ventilhälften zu erzeugen. Schliffbilder der gesinterten Baugruppe zeigten, dass die mittels Ultraschall vorgefügten Baugruppen eine bessere Verbindungsqualität erreichten, jedoch bei diesen Proben Deformationen außerhalb der Fügezone auftraten. Eine Optimierung des Prozesses könnte durch eine angepasste Sonotrodengeometrie und eine Optimierung der Schwingungsparameter erreicht werden, diese wurden im Rahmen des SFB 499 jedoch nicht weiter behandelt.

AP 3: Montageprozess

AP 3.1: Montage Halbschalen

Ziel des Arbeitspaketes war die Auslegung der Montagetechnik für eine beschädigungsfreie, präzise und zuverlässige Montage der fragilen PIM-Grünlinge für das Sinterfügen. Der Montageprozess wurde in einem modifizierten Bestückungsautomaten, dem Häcker Vico Placer, der als Versuchsträger diente, durchgeführt. Der Montageautomat ist über zwei Linearachsen, auf denen Bauteilmagazine zugeführt und montierte Baugruppen abtransportiert werden, mit dem Vorgänger- und Nachfolgeprozess verbunden. Die Grundbewegungsabläufe in x-, y- und z-Richtung werden von den Achsen des Montageautomaten durchgeführt, weitere Manipulationsvorgänge werden mit Hilfe von selbstentwickelten Vorrichtungen vorgenommen. Der Maschinenkopf, der eine 3D-optische Erkennung mit Hilfe von zwei CCD-Kameras bewältigt, kann mit verschiedenen Greifwerkzeugen ausgerüstet werden. Als exemplarischer Prozess zur Darstellung eines Montageprozesses beim Sinterfügen, wurde die Montage des in AP 1 entwickelten Mikrorückschlagventils betrachtet.

Die Ventilhälften werden in einem Werkzeug gemeinsam abgeformt und über ein Dreiplattenwerkzeug vom Anguss vereinzelt. Nach der Abformung werden die Ventilhälften mittels eines Greifroboters mit einem bauteilspezifischen Greifkopf auf einem Magazin abgelegt, das mit Formnestern versehen wurde. Die in diesem definierten Ordnungszustand positionierten Ventilhälften werden weiter zum Montageautomaten befördert. Für Handhabungsaufgaben wurden vakuumbasierte Greifer eingesetzt, da sich diese in den vorangehenden

Projektphasen als besonders geeignet zur Grünlingshandhabung erwiesen haben. Für das Wenden der Ventilhälften wurde eine pneumatische Wendestation mit einem magnetischen Haltemechanismus entwickelt. Die gewendeten Ventilhälften wurden auf einem gelochten Sintermagazin abgelegt. Nach dem Einlegen der Ventilkugel wurde die zweite Ventilhälfte auf die Gewendete gesetzt. Durch die Einstellung der Abhebehöhe des gefederten Greifers, kann die Montagekraft variiert werden. Abbildung 12 zeigt links den Ventilmontageprozess und rechts daneben die dafür entwickelten Vakuumgreiftechnik. Hinsichtlich der Positionierung ist derzeitig eine Genauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ (6σ) möglich. Für eine Steigerung der Positioniergenauigkeit unter Ausnutzung des Selbstjustageeffekts der Fügekegel ist ein Greiferaufsatzz, der weitere Freiheitsgrade ermöglicht und somit eine Selbstzentrierung der Fügekegel zulässt, vorgesehen. [Mun-10c]

Nach der Montage entsteht, aufgrund der Gewichtskraft der oberen Ventilhälfte ein Kegelpressverband in der Fügezone, der für eine gute Selbstfixierung der Proben während der weiteren Transportvorgänge und thermischen Prozesse sorgt, somit werden Sinterstützen überflüssig.

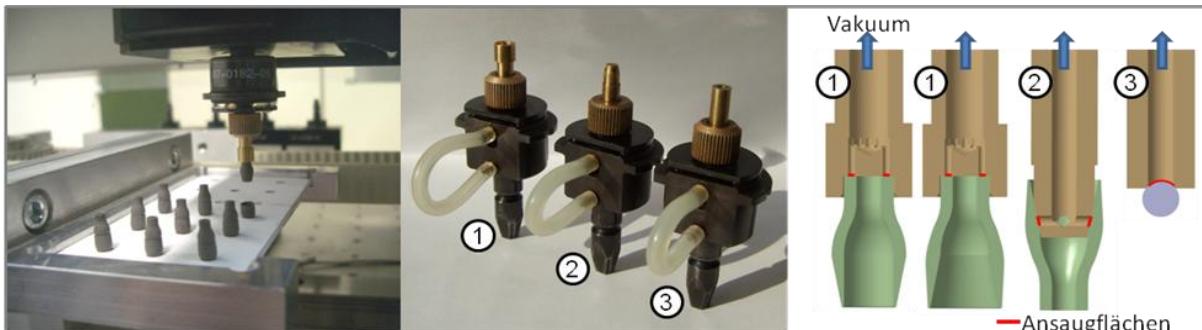


Abbildung 12: links: Montageprozess des Ventils; mittig und rechts entwickelte Greiftechnik [Mun-10c]

Der automatisierte Montagprozess wurde ebenfalls für die in AP 1 entwickelten Zugproben umgesetzt. Mit Hilfe der Automatisierung der Montage soll es ermöglicht werden, die geplanten Parameteruntersuchungen unter reproduzierbaren Prozessbedingungen durchzuführen. Die Entwicklung einer auf Effektivität optimierten Wendestation, bei der ein gesamtes Bauteilmagazin auf einmal gewendet wird, sowie die Optimierung der Montageabläufe werden derzeit vorangetrieben. Abbildung 13 zeigt den aktuellen Stand des Montageversuchsträgers.

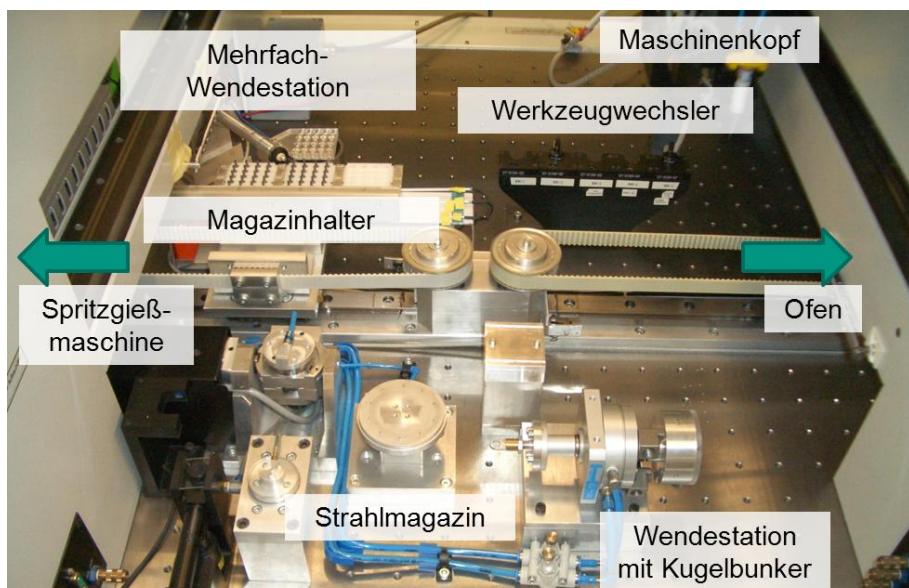


Abbildung 14: Aktueller Stand des Montageversuchsträgers

Zur genaueren Einstellung der Montagekraft wurde ein weiterer Greifer mit einem integrierten DMS-Kraftmesser entwickelt und aufgebaut. Der Greifer ermöglicht eine exakte Bestimmung der aufgebrachten Montagekraft mit einer Genauigkeit von 0,5 % des Messwertes. Mit Hilfe einer SPS-Steuerung erfolgt die Einstellung der Maximalkraft, sodass Beschädigungen der bei der Montage vermieden werden. Der entwickelte Greifer ist in Abbildung 15 dargestellt.



Abbildung 15: Kraftsensitiver Greifer: links: technische Zeichnung mit Zugprobe; rechts: reale Baugruppe

Die maximal ertragbaren Kräfte von 10 N beim Mikrorückschlagventil und 8 N bei Zugproben wurden experimentell mit Hilfe einer manuellen Montagevorrichtung ermittelt. Da sich jedoch kein positiver Einfluss steigender Montagkraft gezeigt hat, werden die Zugproben zukünftig mit einer wesentlich geringeren Kraft unter 1 N montiert.

AP 3.2: Positionierung beweglicher Teile

Ziel war es neben der Montage der grünen Mikro-PIM-Halbschalen, gesinterte bewegliche Bauteile automatisiert in die Halbschalen einzulegen. Die Einlegeteile sollten nach dem Fügevorgang im Sinterprozess beweglich bleiben. Untersuchungsgegenstand waren die Al_2O_3 -Ventilkugeln des Mikrorückschlagventils. Für die Zuführung der Ventilkugeln wurde ein Bunkermagazin entwickelt, in dem ca. 5000 Kugeln bereitgestellt werden können. Die Vereinzelung der Kugeln wurde über einen angetriebenen Schiebermechanismus realisiert. Die Kugeln werden im sich drehenden zylindrischen Bunker zwangsweise vereinzelt auf eine Bahn gelenkt und in einen Schlauch geleitet, an dessen Ende sie von einem Vakuumgreifer entnommen werden können. Angetrieben wird das Bunkermagazin gemeinsam mit der Wendestation, sodass durch geschickte Kombination zweier Manipulationsprozesse ein Antrieb entfällt. Abbildung 15 zeigt das entwickelte Bunkermagazin zur Magazinierung und Vereinzelung der Ventilkugeln.

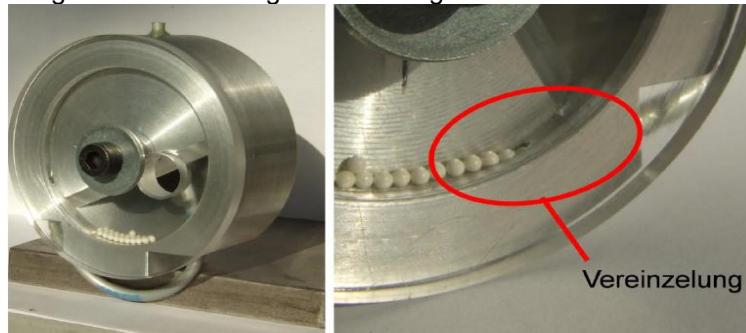


Abbildung 15: Kugelmagazin zur Magazinierung und Vereinzelung der Ventilkugeln

Eine besondere Herausforderung stellte die gewünschte Beweglichkeit der Ventilkugeln nach der Montage dar. Erst der Einsatz eines Trennmittels in Form einer Bornitrid-Suspension ermöglichte die Beweglichkeit der Ventilkugel.

AP 4: Optimierung der thermischen Prozessführung

Die thermischen Prozesse bei der Produktion von PIM-Bauteile sind Entbindern und Sintern. Im Verfahren Sinterfügen werden diese Prozesse dazu genutzt, um den Fügevorgang zu induzieren. Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung der geeigneten Prozessparameter für das Verfahren Sinterfügen.

Die Prozessführung beim Sintern von Proben aus Carbonyleisen wurde auf Basis der Ergebnisse der 3. Phase des SFB vorgenommen. Zur Durchführung der Versuche im Haubenofen MUT am IAM-WPT wurde die Temperaturführung vom kontinuierlichen Ofen der Serie MIM Trainer der Fa. Cremer auf den Haubenofen übertragen. Die Gasführung im Haubenofen wurde in Zusammenarbeit mit TP C2 ausgelegt. Die Verbindungsqualitäten der sintergefügten Carbonyleisenproben waren für beide Öfen vergleichbar gut. Abbildung 16 zeigt links Probekörper bei der Auslagerung aus dem kontinuierlichen Ofen am wbk und rechts daneben im Haufenofen gesinterte Ventile aus Carbonyleisen.

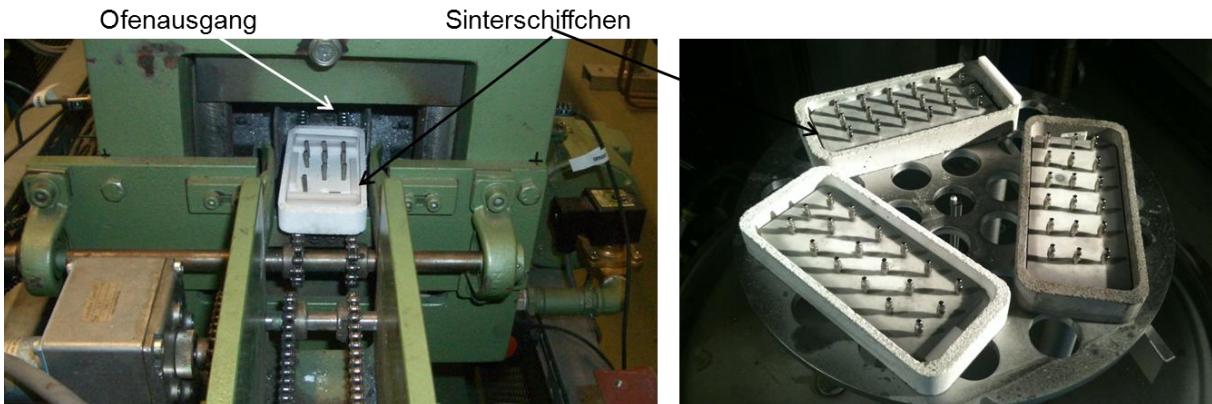


Abbildung 16. links Probenauslagerung aus kontinuierlichen Ofen [Mun-10a]; rechts: sintergefügte Ventile im Haubenofen

Die beim Sintern der Probekörper und Mikrorückschlagventile aus Carbonyleisen gesammelten Erfahrungen konnten auf das sintergefügte Turbinengehäuse des Demonstrators der 4. Phase des SFB 499 übertragen werden.

Weiterhin wurden Ventilgehäuse aus einem im Metallpulverspritzguss üblichen 17-4PH Edelstahl-Feedstock (von Embemould ®) untersucht. Die 17-4PH Proben wurden im Haubenofen zunächst in Anlehnung an die Erfahrungen in TP C2 bei 1245 °C gesintert. Zuvor wurden die Proben für 12 h in H₂O vorentbindert, um die wasserlöslichen Anteile des Binders bereits vor den thermischen Prozess zu lösen. Anschließend wurden die Proben mit einer Aufheizrate von 1,5 K auf 200 °C aufgeheizt und für 30 Min thermisch entbindert. Anschließend wurden die Proben mit 15 K/min bis auf 1245 °C aufgeheizt und für 4 Std. gesintert. Die Probenhälften hielten zwar zusammen, Schliffbilder dieser Proben zeigten jedoch einen durchgängigen Spalt in der Fügezone. Als Maßnahme wurde die Sintertemperatur auf 1370°C erhöht. Abbildung 17 zeigt Längsschliffe einer bei 1245°C (oben) und darunter zum Vergleich einer bei 1370°C gesinterten Probe.

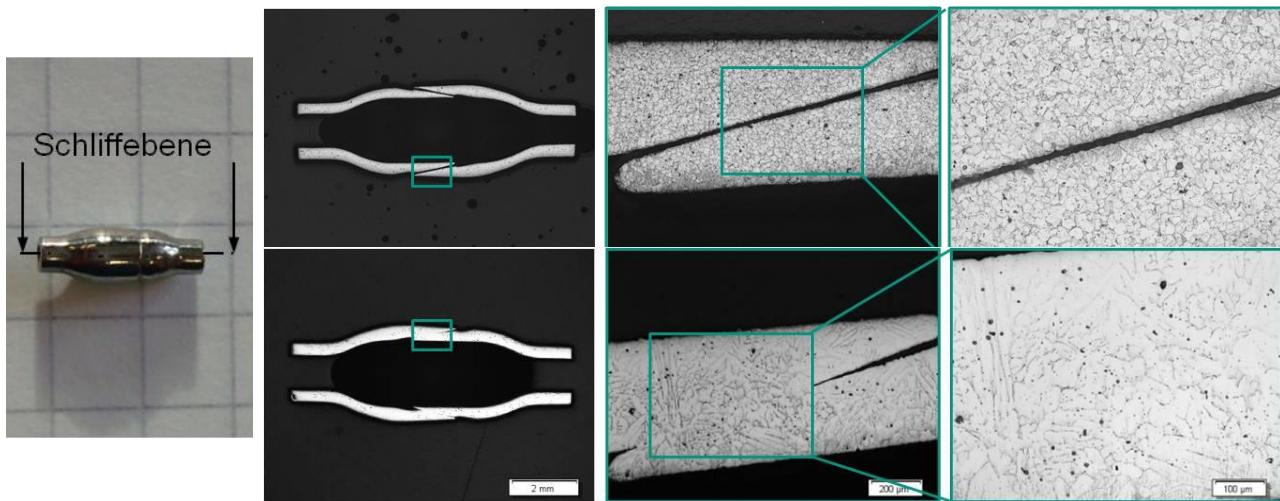


Abbildung 17: Längsschliffe durch 17-4PH Edelstahlventile: oben $T_{\text{Sinter}} = 1245^{\circ}\text{C}$; unten: $T_{\text{Sinter}} = 1370^{\circ}\text{C}$

Wie in Abbildung 17 zu sehen ist, fand durch die Erhöhung der Temperatur zum einen eine Gefügeveränderung statt. Zum anderen führte die höhere Sintertemperatur zu einer deutlichen Verbesserung der Verbindung. Trotz der unvollständigen Verbindung waren die 17-4PH Ventile flüssigkeitsdicht und hielten einem Innendruck von bis zu 700 bar stand.

Eine weitere Verbesserung der Verbindungsqualität hin zu einer nahtlosen Verbindung, wird durch Anpassung der Form- und Gestaltabweichungen erwartet, welche in einem weiterführenden Projekt untersucht werden soll.

AP 5: Ordnungszustand für Folgeprozesse

AP 5.1: Magazinierung

Durch den Sinterprozess werden komplexe Baugruppen erzeugt. Im Rahmen eines weiteren Einsatzes als Subsystem müssen diese Baugruppen Folgeprozessen zugeführt werden. Ziel dieses Arbeitspakets war die automatisierte Herstellung eines definierten Ordnungszustands der gesinterten Bauteile und die Zuführung

zu einem exemplarischen Folgeprozess. Als Folgeprozess wurde hierbei das Mikrokugelstrahlen gewählt, durch welches eine Verbesserung der Bauteilqualität an den Funktionsflächen an MIM-Mikrozahnräder erreicht werden soll.

Die gerichtet auf einer Sinterunterlage positionieren Zahnräder wurden nach dem Sintern dem Montageprozess automatisiert zugeführt. Für das Magazinieren und die Fixierung der Zahnräder während des Strahlprozesses wurde eine Magaziniervorrichtung entwickelt, die in der Prozesskette μ -PIM des wbk automatisiert bestückt und anschließend dem Mikrostrahlprozess übergeben wird. Für die Bestückung wurden bauteilspezifische vakuumbasierte Greifer für die Zahnräder, sowie die erforderlichen Spannmittel entwickelt und umgesetzt. Die Zahnräder wurden auf einem kreisförmigen Magazin auf Wellen, die zur Aufnahme dienten gesetzt, welche anschließend mit Magneten als Spannmittel bestückt wurden. Nachdem alle Positionen belegt waren, wurde das Magazin mit Hilfe einer integrierten Hubvorrichtung abgesenkt, um die magnetische Fixierung zu aktivieren. Abbildung 18 zeigt den Aufbau der Magaziniervorrichtung in einem CAD-Modell und die umgesetzte Vorrichtung in der Strahlanlage.

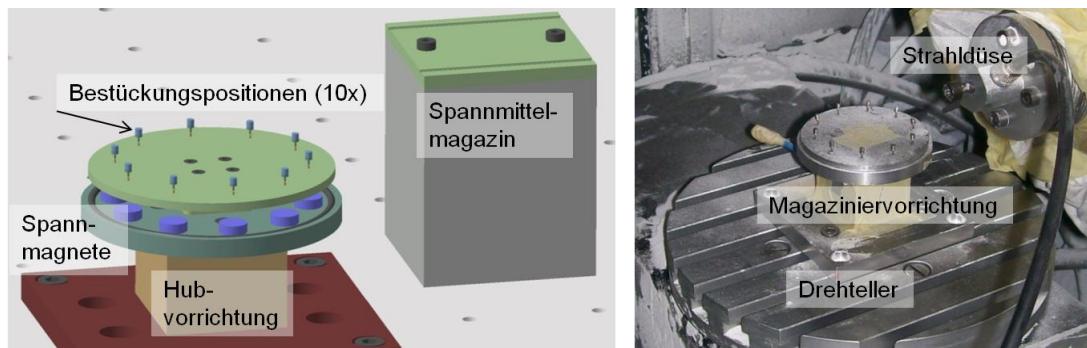


Abbildung 18: Magaziniervorrichtung für das Mikrokugelstrahlen: links: CAD-Modell; rechts: reale Baugruppe in Kugelstrahlanlage

Die Integration in die Strahlanlage am IAM –WK des KIT und die Automatisierung des Strahlprozesses fand in enger Zusammenarbeit mit Teilprojekt D1 statt. Die Vorrichtung wurde derart umgesetzt, dass eine Abschaltung beim Strahlprozess vermieden und somit eine gleichmäßige Behandlung ermöglicht wird. Beim Strahlprozess wird die Vorrichtung auf einem Drehteller platziert. Durch eine geeignete Kombination aus der Rotationsbewegung der Vorrichtung und einer translatorischen Bewegung der Strahldüse eine vollständige Bestrahlung gesichert.

AP 5.2: Prozessverkettung

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Sicherstellung des erschütterungsarmen Transports der Bauteile und Baugruppen entlang der Prozesskette Sinterfügen. Die Prozessverkettung [Mun-09a] musste hinsichtlich der neu hinzugekommenen komplexen Baugruppen „Mikrorückschlagventil“ und „sintergefügte Zugprobe“ und dem Prozessschritt der Grünlingsbearbeitung angepasst werden. Für die automatisierte Handhabung der abgeformten Grünlinge wurden bauteilspezifische Vakuumgreifköpfe entwickelt, die eine sichere und beschädigungsfreie Entnahme und Ablage ermöglichen. Für den weiteren Transport zur Montage wurden bauteilspezifische, mit Formnestern ausgestattete Magazine entwickelt, in denen die definiert abgelegten Grünlinge auf den gedämpften Linearachsen der Prozesskette erschütterungsarm transportiert werden. Während des Transports zur Montage wurde zusätzlich die Möglichkeit realisiert, die Bauteile dem spanenden Bearbeitungsprozess zuzuführen. Hierzu wurden die vorhandenen Transportachsen über einen Portalgreifer mit der in AP 2.2 entwickelten und aufgebauten Bearbeitungsmaschine verkettet. So können die Grünlinge auf Ihrem Weg zur Montage aus ihrem Magazin entnommen und dort nach der Bearbeitung wieder abgelegt werden. Abbildung 19 zeigt den entwickelten 2-achsigen Portalgreifer. Für die Ansteuerung des Prozesses waren eine Weiterentwicklung der Programme zur Gesamtprozesssteuerung und die steuerungstechnische Anbindung der SPS-Steuerung der Spannvorrichtung sowie der CNC-Steuerung der Grünlingsbearbeitungsmaschine erforderlich.

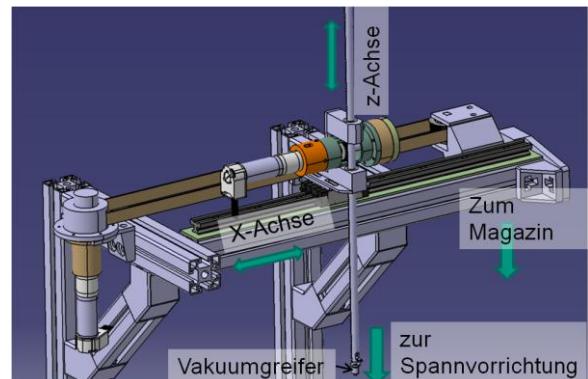


Abbildung 19: Portalgreifer zur Verkettung der Prozesskette mit Grünlingsbearbeitungsmaschine

Für den Weitertransport der Baugruppen nach der Montage wurden bauteilspezifische Sintermagazine aus Al_2O_3 entwickelt. Für das Ventil erwiesen sich einfach ausgeführte gelochte Magazine als ausreichend um die erforderliche Fixierung für den Transport und den anschließenden Sinterprozess zu gewährleisten. Die Sintermagazine der Zugproben wurden zusätzlich mit Stützelementen in Form von Al_2O_3 -Stäbchen ausgestattet, um die erforderliche Stabilität zu sicheren. Nicht unterstützte Zugproben kippten zuvor um. Abbildung 20 zeigt die Zugproben auf den Magazinen mit Stützelementen. [Fle-11a]

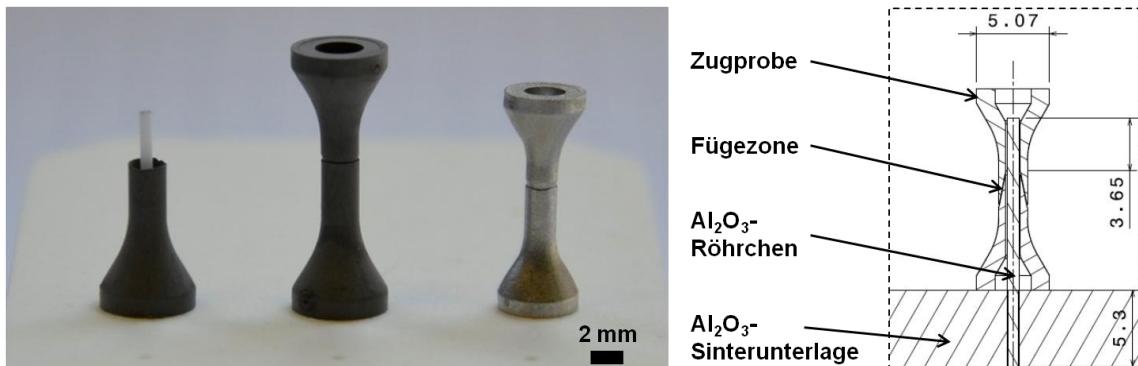


Abbildung 20: Proben auf modifizierter Sinterunterlage. links: Probenhälfte, grüne Baugruppe und gesinterte Baugruppe; rechts: Ausschnitt aus technischer Zeichnung [Fle-11a]

Vor und nach Abschluss der thermischen Behandlung können die montierten bzw. sintergefügten Baugruppen auf ihren Sintermagazinen in einem Puffermagazin, dem sogenannten Paternoster gelagert werden. Als Ergebnis liegt nach Abschluss der 4. und letzten Phase des SFB 499 eine vollständige Prozesskette für das Sinterfügen komplexer Mikro- und Kleinstbauteile vor. Abbildung 21 zeigt den aktuellen Stand der Anlage und die exemplarische Prozesskette für das Mikrorückschlagventil.

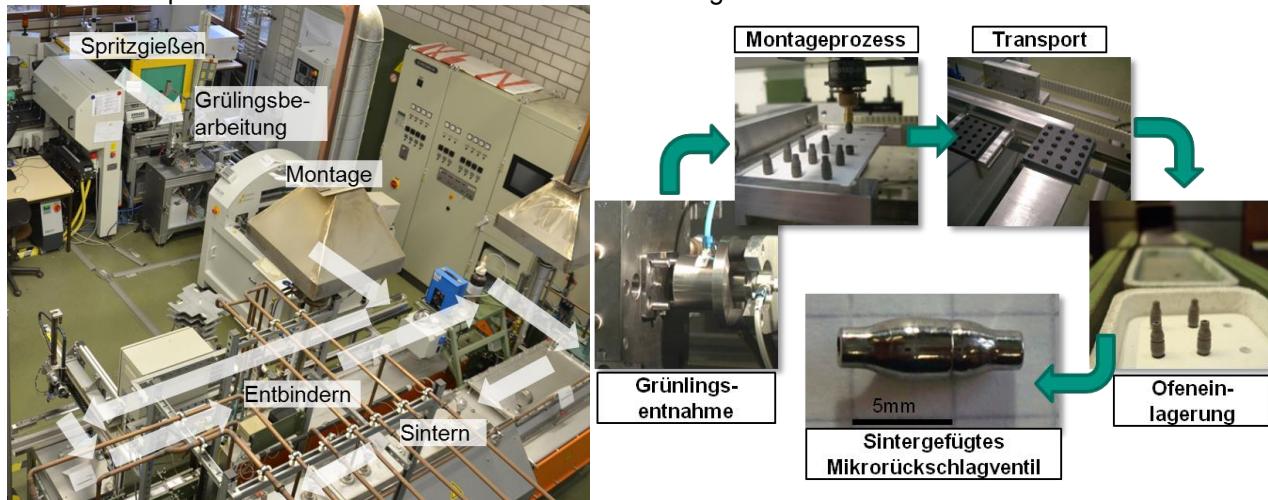


Abbildung 21:links: Prozessanlage für das PIM-Sinterfügen; rechts: Prozesskette zur Herstellung des Mikrorückschlagventils

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Die geplante Ableitung von Gestaltungsrichtlinien in AP 1 war im Rahmen des SFB nicht möglich, da hierzu weitere Versuche notwendig sind, deren Durchführung, aufgrund der erforderlichen intensiven Vorarbeiten, im SFB 499 nicht mehr möglich war.

Die Dauer der Entwicklung und des Aufbaus der Kalibriermaschine in AP2 hat den im Antrag vorgesehenen Zeitrahmen aufgrund der erforderlichen intensiven Dimensionierungsarbeiten und experimentellen Voruntersuchungen überschritten. Deshalb wurden mit der entwickelten Mikromaschine bisher lediglich erste Proben zerspannt. Prozessintegrierte Kalibrierversuche zur Auslegung der Fügeflächen, wie sie im Antrag vorgesehen waren, haben nicht stattgefunden. Diese wurden an Werkstattmaschinen durchgeführt. Ferner wurde entschieden, die Versuche zur Auslegung der Toleranzanforderungen an den Fügeflächen an abgeformten Proben durchzuführen, um an einem PIM-Grünling entsprechende Eigenschaften zu erzeugen.

Da es möglich war die Montage der Halbschalen in AP 2, im konkreten Fall der Ventilgehäusehälften 4-achsig durchzuführen, wurden die Montage entgegen der im Antrag geplanten 6-achsigen Montage nur 4-achsig durchgeführt. Eine Erweiterung um zwei Achsen ist über den Einsatz eines Greiferaufsetzes vorgesehen, der in einem weiterführenden Vorhaben entwickelt werden soll. Das Einlegen der beweglichen Teile

in AP 2 konnte zwar automatisiert umgesetzt werden, allerdings nur mit unbenetzten Ventilkugeln. Hierzu müsste der Montageprozess um eine Benetzungsstation erweitert werden.

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Das Teilprojekt C3 war vielfach mit anderen Teilprojekten des SFB verknüpft.

Die Herstellung der Probekörper für AP1 erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Z3. Bei der Qualitätssicherung, der dimensionellen Messtechnik und Versuchsplanung wurde C3 durch C4 unterstützt. C3 lieferte C4 hingegen die Messdaten, an denen entwickelte Methoden zur Datenauswertung getestet werden konnten [Lan-11]. Bei der Optimierung der thermischen Prozessführung wurde C4 von C1, welches über langjährige Erfahrungen zur Parametrierung beim PIM-Prozess verfügt, unterstützt. Mit C5 erfolgte ein Austausch der Ergebnisse zum Sinterfügen und Zwei-Komponenten-Metallpulverspritzgießen in Mikrodimensionen zu Nutzung potentieller Synergien [Ruh-11; Fle-11b]. Bei der Charakterisierung der Oberflächen der Grünlinge und mechanischen Eigenschaften der Sinterfügeverbindungen wurde C3 durch D1 und D2 unterstützt. C3 entwickelte für D1 hingegen ein automatisiertes Magazin für das Kugelstrahlen.

Im Rahmen des AK Demonstrator fand bei der Entwicklung des Demonstrators „Mikroturbine“ eine enge Zusammenarbeit mit A1 und Z2 statt. C3 lieferte Angaben zu einer sinterfügegerechten Konstruktion. Weiterhin wurden in Abstimmung mit diesen Teilprojekten im Rahmen des Arbeitskreises Dimensionierungskonzepte die geometrischen und funktionalen Randbedingungen der Fügestellen diskutiert.

Die Mikrogreifer zur Handhabung der fragilen Grünlinge wurden durch die Teilprojekte B4 (Mikroerodieren), und Z3 (Mikrofräsen) bearbeitet.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Da es sich beim automatisierten Sinterfügen um eine neuartige Technologie handelt, sind vergleichbare Arbeiten außerhalb des SFB 499 nicht bekannt.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Publikationen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung

- [Fle-11a] Fleischer, J.; Klinscha, K.: Development of an Innovative Tension Test Process for the Investigation of Sinter Joined Connections. Euro PM2011, 09.-12.10.2011, Barcelona, Spanien, Verlag European Powder Metallurgy Association, Herausgeber/Veranstalter European Powder Metallurgy Association, Band Volume 2, Euro PM2011 Proceedings, Shrewsbury, ISBN 978-1-899072-23-1, S. 177 – 182; Erscheinungsjahr: 2011
- [Fle-11b] Fleischer, J.; Klinscha, K.; Ruh, A.; Piotter, V.: 2-Komponenten-Spritzguss und Sinterfügen - Potentiale in der Mikroproduktion. Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, 11. und 12. Oktober 2011, Karlsruhe, Deutschland, Verlag KIT Scientific Publishing, Herausgeber/Veranstalter O. Kraft; A. Haug; F. Vollertsen; S. Büttgenbach ; [Hrsg.], Band , Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499 (KIT Scientific Reports ; 7591), Karlsruhe, ISBN 978-3-86644-747-9, S. 83-90; Erscheinungsjahr: 2011
- [Ruh-11] Ruh, A.; Klinscha, K.; Piotter, V.; Plewa, K.; Ritzhau, H-J.; Fleischer, J.: The development of two-component micro powder injectionmoulding and sinter joining. in: Microsystem Technologies, Jahrgang 2011, Heft/Band Volume 17 Number 10-11, Verlag Springer Verlag, Heidelberg, S. 1547-1556; Erscheinungsjahr: 2011
- [Lan-11] Lanza, G.; Fleischer, J.; Viering, B.; Klinscha, K.; Kippenbrock, K.; Stockey, S.: Data Mining Approach for Identifying Optimal Process Parameters in Micro-Manufacturing. 11th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, 23rd May to 27th May 2011, Como, Italy, Verlag Sieca Repro, Herausgeber/Veranstalter European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, Band , Conference Proceedings Volume II, Delft, Netherlands, ISBN 978-0-9553082-9-1, S. 467-470; Erscheinungsjahr: 2011
- [Mun-10a] Munzinger, C.; Dieckmann, A-M.; Klinscha, K.: Research on the Design of Sinter Joined Connections for Powder Injection Moulded Components. World Powder Metallurgy Congress & Exhibition 2010, 10th-14th October 2010, Florence, Italy, Herausgeber/Veranstalter European Powder Metallurgy Association, Band Volume 4, Proceedings World Powder Metallurgy Congress & Exhibition 2010, ISBN 978 1 899072 13 2, S. 477-484; Erscheinungsjahr: 2010
- [Mun-10b] Munzinger, C.; Dieckmann, A-M.; Deuchert, M.; Klinscha, K.; Leberle, U.: Research on the machining of green feedstock material for sinter joining. euspen International Conference – Delft - June 2010, 31.05.-04.06.2010, Delft, Niederlande, Verlag Sieca Repro,

- Herausgeber/Veranstalter Euspen, Band 2, conference proceedings, Delft, ISBN 978-0-9553082-8-4, S. 99-102; Erscheinungsjahr: 2010
- [Mun-10c] Munzinger, M.; Dieckmann, A-M.; Klinscha, K.: Komplexe Baugruppen einfach sinterfügen. in: Mikroproduktion, Jahrgang 2010, Heft/Band 03/2010, Verlag Carl Hanser Verlag, München, ISBN/ISSN 1614-4538, S. 42-45; Erscheinungsjahr: 2010
- [Mun-09a] Munzinger, C.; Ruprecht, E.; Klinscha, K.; Dieckmann, A-M.: Automated sinter-joining of PIM parts. Conference on Powder MEtallurgy and Particulate Materials, 28.06.09-01.07.09, Las Vegas, USA, Herausgeber/Veranstalter MPIF, Band Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials 2009, Princeton, New Jersey, USA, ISBN 978-0-9819496-1-1, S. 6-1 bis 6-6; Erscheinungsjahr: 2009
- [Mun-09b] Munzinger, C.; Tröndle, M.; Klinscha, K.; Dieckmann, A.-M.: Dimensioning a sinter-joined shaft to collar connection insub-millimeter range. EUSPEN, 2.-5. Juni 2009, San Sebastian, Spanien, Band 2, 9th international conference of the european society for precision engineering and nanotechnology, S. 483-486; Erscheinungsjahr: 2009

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt C3 wird seit Januar 2000 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1	Munzinger, C., Dr.-Ing.	Mach.	Institut für Produktionstechnik (wbk)	4	
	2	Fleischer, J., Prof. Dr.-Ing.	Mach.	Institut für Produktionstechnik (wbk)	3	
	3	Dipl. Wi.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann	Wi.-Ing.	Institut für Produktionstechnik (wbk)	4	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	4	Michael Heinz		Institut für Produktionstechnik (wbk)	19,75	
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	7	Katharina Klinscha, Dipl.-Ing., TVL E13	Mach	Institut für Produktionstechnik (wbk)	39,5	
	8	N.N. (studentische Hilfskräfte)	Mach	Institut für Produktionstechnik (wbk)	19,75	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	9	Ralf Dorsner, TVL E9		Institut für Produktionstechnik (wbk)	19,75	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):**(1) Dr.-Ing. Christian Munzinger**

Dr.-Ing. Christian Munzinger war für die wissenschaftliche Betreuung, Leitung und Überwachung des Teilprojekts C3 verantwortlich. Er vertritt das Teilprojekt auf den Mitgliederversammlungen des SFB. Zugleich unterhielt er Kontakte zu anderen Teilprojektleitern und Institutionen des Sonderforschungsbereichs zwecks Förderung der kooperativen Zusammenarbeit. Herr Munzinger ist zum 01.10.2010 aus dem wbk ausgetreten.

(2) Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer ist für die wissenschaftliche Betreuung, Leitung und Überwachung des Teilprojekts C3 mit verantwortlich. Aufgrund seiner langjährigen Erfahrung berät und unterstützt er Herrn Dr. Munzinger bei der Betreuung und Leitung des Projekts. Herr Prof. Fleischer war zum Zeitpunkt der Antragstellung beurlaubt und ist seit dem 01.10.2010 wieder Mitglied der Institutsleitung des wbk.

(3) Dipl. Wi.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Dipl. Wi.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann hat Frau Klimscha bei der Planung und Entwicklung von Handhabungssystemen und Greifern sowie der dafür notwendigen Steuerung unterstützt.

(4) Michael Heinz

Michael Heinz unterstützte als Techniker den Aufbau des Versuchsstandes. Die notwendigen Hardwarekomponenten wurden von ihm konstruiert, gefertigt und aufgebaut.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):**(7) Dipl.-Ing. Katharina Klimscha**

Dipl.-Ing. Katharina Klimscha war als wissenschaftliche Mitarbeiterin für die Betreuung des Vorhabens verantwortlich. Frau Klimscha übernahm die Aufgaben von Herrn Dieckmann. Ihr oblagte die Planung, Koordination und Durchführung der Forschungsarbeiten. Insbesondere die Konzeption unterschiedlicher Automatisierungssysteme sowie die sich daraus ergebende Entwicklung geeigneter Handhabungssysteme, Greifer, Steuerungssysteme, Vereinzelungseinrichtungen und Magazine wurden von ihr geplant und durchgeführt. Des Weiteren war sie für den Aufbau des Versuchsstandes, die Koordination der Versuche und die anschließende Auswertung und Dokumentation in Arbeits-, Zwischen- und Abschlussberichten verantwortlich.

(8) N.N. (studentische Hilfskräfte)

Aufgabe der studentischen Hilfskräfte (N.N.) war die Unterstützung beim Aufbau des geplanten Versuchsstandes sowie die Durchführung der Experimente mit verschiedenen Handhabungssystemen und Greifern. Neben diesen Tätigkeiten sollten die studentischen Hilfskräfte Frau Klimscha und den Techniker beim Aufbau der Steuerung unterstützen.

(9) Ralf Dorsner

Ralf Dorsner brachte seine langjährige Erfahrung beim Umgang mit Industrierobotern und Mikrohandhabungssystemen mit ein, unterstützte die Realisierung des Versuchsstandes und ist insbesondere für den Aufbau der Steuerung und Montage unter Anleitung des wissenschaftlichen Mitarbeiters verantwortlich. Er unterstützte die studentischen Hilfskräfte bei der Durchführung der Versuche und war beteiligt an der Versuchsauswertung.

<

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt C4

5.1.1 Titel

Mikroprozesskettengerechte Qualitätssicherung

Quality Assurance Customized to Requirements of Micro Process Chains

5.1.2 Projektleitung

Lanza, Gisela, Prof. Dr.-Ing., geb. 04.08.1973, deutsch

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Produktionstechnik (wbk)

Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe

Telefon: 0721/608-44017

Telefax: 0721/608-45005

E-Mail: Gisela.Lanza@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Ausgangssituation und Zielsetzung

Um eine effiziente mikrospezifische Qualitätssicherung zu etablieren, ist es notwendig, interdisziplinär zu arbeiten und geeignete Qualitätssicherungsmethoden an der richtigen Stelle in der Prozesskette anzuwenden. Aufbauend auf dem in der 1. Förderphase erarbeiteten Microfeature-Konzept wurden in der 2. Förderphase zur Identifikation, Priorisierung und Vermeidung von Schwachstellen in der frühen Produktentstehungsphase mikrospezifisch angepasste präventive Qualitätssicherungsmethoden (System-Fehler-Möglichkeits-und-Einfluss-Analyse, Quality Function Deployment, Fault Tree Analysis) für die SFB 499 Prozesskette entwickelt. Zur erfolgreichen Anwendung dieser präventiven Qualitätssicherungsmethoden ist es erforderlich, auf Erfahrungswissen zurückzugreifen. Prozessinformationen, die räumlich und zeitlich verteilt in den verschiedenen Prozessen generiert wurden, sind anhand der in der 2. Förderphase entwickelten und implementierten Microfeature-Katalog-Sichten adäquat gefiltert, strukturiert aufbereitet und bedarfsgerecht dargestellt worden. Die Erarbeitung solcher Prozessinformationen wurde durch den Aufbau von fünf Qualitätsregelkreisen sichergestellt. Zur Beurteilung der Qualitätseigenschaften ist die schnelle, flexible und hochgenaue dimensionelle Messung der gefertigten Mikrobauteile und Formeinsätze eine wesentliche Herausforderung der Mikroqualitätssicherung. Während der 1. und 2. Förderphase wurde daher die Anwendung der Mikromesstechnik durch hard- und softwareseitige Erweiterungen optimiert.

Zusammenfassend stand nach der 2. Förderphase ein Informationsmanagementwerkzeug (Microfeature-Katalog) für die SFB 499 Prozesskette, eine weitgehende Automatisierung des Messablaufs zur dimensionellen Charakterisierung der Mikrobauteile und die Ausarbeitung präventiver mikrospezifischer Qualitätssicherungsmethoden zur Verfügung. Für eine industriell umsetzbare Mikroproduktion bestand weiterhin die Herausforderung in der Entwicklung und Realisierung robuster Mikrofertigungsprozesse. Dazu musste ausgehend von den entwickelten präventiven Methoden der Qualitätssicherung eine Fokussierung hin zu operativen und damit fertigungsnahen statistischen Qualitätssicherungswerkzeugen erfolgen. Für die praktische Anwendung mussten die Werkzeuge und Methoden der mikrospezifischen statistischen Prozessregelung auch in die Informationsmanagementumgebung des SFB 499 integriert werden. Die Grundlage zur Regelung der Fertigungsprozesse lieferte auch weiterhin die dimensionelle Mikromesstechnik, welche v.a. im Hinblick auf Messunsicherheitsermittlung und Messung dreidimensionaler Strukturen noch Forschungspotential besaß.

In der 3. Förderphase wurde durch die Entwicklung einer fertigungsnahen statistischen Prozessregelung (μ -SPC) der Grundstein zur Beurteilung der Prozessfähigkeit der einzelnen im SFB 499 vorhandenen Mikrofertigungsverfahren gelegt. Dabei wurde ein neuartiges Qualitätsregelkartendesign, welches die simultane Visualisierung, Überwachung und Trennung von Mess- und Fertigungsprozessstreuung erlaubt, entwickelt und implementiert. Um darüber hinaus die Variabilität der Mikrofertigungsprozesse zu senken, wurde ein fertigungsnaher Regelkreis für einzelne Fertigungsprozesse, welcher statistische Modellierung und statistische Prozessregelung kombiniert, entworfen. Durch diese Maßnahmen können zum einen die Prozessstabilität überwacht und zum anderen Prozessverbesserungen für die Einzelprozesse abgeleitet werden.

Im Folgenden sind die Fragestellungen und Arbeitspakete, die sich der SFB 499 im Hinblick auf eine effektive mikroprozesskettengerechte Qualitätssicherung zu Beginn der 4. Förderphase zu stellen hatte, aufgelistet.

Überlagerung von Fertigungsprozess- und Messprozessstreuung (AP 1)

Entsprechend der „goldenen Regel der Messtechnik“ soll die Messunsicherheit (MU) nur maximal 10-20 % der Toleranzbreite (TB) betragen ($MU \leq 20 \% TB$). Diese Regel kann derzeitig für die Mikrowelt unter den Randbedingungen einer flexiblen und universellen dimensionellen Messtechnik für Strukturen bis unter 10 μm nicht eingehalten werden. Deshalb war es aufgrund der Überlagerung von Mess- und Fertigungsprozess bis zu Beginn der 4. Förderphase nicht möglich, die Prozessfähigkeit eines Mikrofertigungsprozesses genau festzustellen. Solange normalverteilte Daten aus dem Fertigungsprozess vorliegen, kann über eine Differenzbildung der Standardabweichungen der Verteilungen dies jedoch noch korrigiert werden. Für nicht normalverteilte Qualitätsmerkmale (z.B. Rauheit, Lage- und Formtoleranzen) sind die Fähigkeitsindizes aus der Makrowelt nicht mehr geeignet [1]. Aufbauend auf den bisherigen Definitionen und Berechnungsvorschriften der Fähigkeitsindizes aus der Makrowelt c_p und c_{pk} zur Prozess- und Maschinenqualifikation wurden daher Fähigkeitsindizes für Mikroprozesse entwickelt. Dennoch wurde am prinzipiellen Aufbau der Fähigkeitsindizes festgehalten aufgrund ihrer Verbreitung und Akzeptanz in der industriellen Praxis.

Unkenntnis der optimalen Prüfstrategie entlang der Produktionsprozesskette (AP 2 / AP 3)

Da in Mikrodimensionen nicht alle Strukturen, die fertigbar sind, auch messtechnisch zu charakterisieren sind und da die Mikromess- und -prüftechnik sehr kostenintensiv ist, gibt es bisher keine mikrogerechte Prüf- und Messstrategie, die festlegt wann, wie und was innerhalb der Prozesskette gemessen und/oder geprüft werden muss, um effektiv die Qualität zu sichern. Daher wurde die Entwicklung einer effizienten Prüf- und Messstrategie für Mikroproduktionsprozessketten unter den Randbedingungen Kosten der Prüfung, Zeit der Prüfung und Güte der Prüfaussage methodisch angegangen. Bei der Festlegung einer möglichst effektiven Qualitätssicherungsstrategie gemäß der Kriterien Kosten, Zeit und Güte der Mess-/Prüfaussage handelt es sich dabei um ein multikriterielles Optimierungsproblem.

Dimensionelle Mikromesstechnik (AP 4)

Die Optimierung der dimensionellen Mikromesstechnik bezüglich Formeinsätzen, Modellen, Bauteilen und deren Ausweitung hin zur Messung ganzer Mikrosysteme erfolgte mittels der neu gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen der ersten drei Antragsperioden sowie den Ergebnissen aus dem Transferbereich. Zur hardwaremesstechnischen Umsetzung stand das Multisensor-Koordinatenmessgerät Werth Video Check HA 400 zur Verfügung, welches speziell zur Erfassung von Mikrostrukturen ausgestattet ist. Darüber hinaus wurde dem SFB 499 durch die Zusammenarbeit mit der Firma Zeiss als Kooperationspartner im TFP T2 Messkapazität sowohl auf einem KMG O-Inspect als auch auf einem KMG F25 gewährt. Um eine breite Anwendung der aufgenommenen Messdaten zu garantieren und die im Zusammenhang einer komplexen Prozesskette auftretenden großen Datenmengen effektiv zu handhaben, ist eine softwaretechnische Lösung notwendig. Hierfür wurde der bereits bestehende Microfeature-Katalog weiterentwickelt, um den Anforderungen der vierten Förderphase gerecht zu werden.

Beschreibung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse von TP C4 dargestellt, die seit Beginn der 4. Förderphase im Januar 2009 erarbeitet wurden.

Bestimmung der Prozessfähigkeit eines Mikrofertigungsprozesses

Schlussfolgerungen über die Qualität mikromechanischer Komponenten durch Messungen ihrer Merkmale sind schwieriger zu ziehen als bei makrodimensionalen Komponenten, da die Toleranz der funktionalen Merkmale dieselbe Größenordnung wie die Messunsicherheit haben kann. Die „Goldene Regel der Messtechnik“ sagt aus, dass die Messunsicherheit ein Zehntel bis ein Fünftel des Toleranzbereiches von dem betrachteten Qualitätsmerkmal nicht übersteigen sollte [2]. Diese Anforderung wird umso schwieriger zu erfüllen je kleiner die Größe des funktionalen Merkmals wird. Aus diesem Grund wurde die Angemessenheit der konventionellen Qualitätssicherungswerzeuge für die Charakterisierung und Überwachung von Mikrofertigungsprozessen, wie Prozessfähigkeitsindizes und Qualitätsregelkarten, untersucht. Eine multivariate Qualitätsregelkarte wurde bereits am wbk Institut für Produktionstechnik entwickelt, um sowohl Produktions- als auch Messprozesse für mikromechanische Teile separat und fortlaufend zu überwachen [29]. In der vierten Förderphase des SFB 499 wurden zwei neue Prozessfähigkeitsindizes zur Quantifizierung der Leistung eines Mikrofertigungsprozesses entwickelt.

Die Messunsicherheit ist nach dem „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) definiert als ein „dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte“ [3]. Die Streuung der Messwerte resultiert aus mehreren Faktoren, welche den Messprozess beeinflussen, z. B eine unvollständige Definition der Messaufgabe, Umweltfaktoren wie Temperatur sowie personell bedingte systematische Abweichungen. Die relativ große Messunsicherheit in der Mikrofertigung beeinträchtigt zwei wichtige Aufgaben der Qualitätssicherung: Teileprüfung und Prozessbewertung.

Die Übereinstimmung mit den Kundenanforderungen kann nur unter der Berücksichtigung der Messunsicherheit ermittelt werden. Andernfalls könnten falsche Schlüsse bezüglich der Übereinstimmung des Teils gezogen werden, falls das Merkmal gerade innerhalb oder gerade außerhalb des Grenzwertes liegt. Der ISO-Standard 14253-1 bietet Entscheidungsregeln zur Festlegung der Anforderungskonformität eines Teiles an. Dieser Standard setzt die Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit während des Prüfprozesses voraus [4]. Die Messunsicherheit wiederum reduziert die Übereinstimmungs- und Nichtübereinstimmungszonen, wie in Abbildung 1 dargestellt.

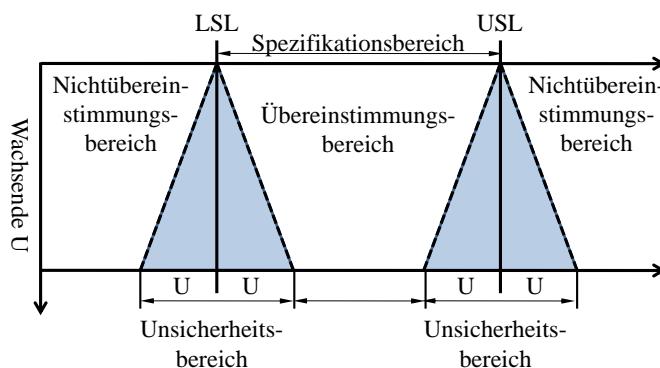


Abbildung 1. Effekt der Messunsicherheit auf die Übereinstimmungszone [4].

Die Übereinstimmungsanforderungen werden erreicht, falls die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$LSL + U < y < USL - U$$

Hierbei sind y eine Schätzung des Messwerts Y , LSL die untere Spezifikationsgrenze und USL die obere Spezifikationsgrenze. Innerhalb des Unsicherheitsbereichs kann die Übereinstimmung eines Teiles mit den Anforderungen weder bewiesen noch widerlegt werden. Da die Mikrofertigung durch eine relativ große Messunsicherheit im Vergleich zum Toleranzbereich charakterisiert wird, ist die Berücksichtigung der Messunsicherheit beim Prüfprozess entscheidend.

Die zweite Auswirkung der Messunsicherheit auf die Qualitätskontrolle ist die Beeinflussung der Prozessbewertung. Soll die Eignung eines Produktionsprozesses, Teile zu produzieren, bewertet werden, so ist es nützlich die Variation des Prozesses (seine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion – WDF) zu beobachten. Es gibt zwei Quellen der Unsicherheit, welche die empirische Herleitung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion eines Prozesses beeinflussen: Stichprobenfehler und Messunsicherheit. In dieser Arbeit wird angenommen, dass eine ausreichend große Stichprobe genommen wurde und der Stichprobenfehler zu vernachlässigen ist. Allerdings bewirkt die Messunsicherheit, dass die beobachtete Verteilung von der tatsächlichen Verteilung des Produktionsprozesses abweicht. In Wirklichkeit resultiert die beobachtete Verteilung aus der Kombination des Produktionsprozesses und des Messprozesses. Es sei X die Qualitätscharakteristik eines Herstellungsprozesses, welcher durch die Normalverteilung mit dem Durchschnitt μ und der Standardabweichung σ beschrieben werden kann.

$$X \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (1)$$

Nach der Annahme, dass alle bekannten systematischen Fehler im Messprozess eliminiert wurden und viele unabhängige Fehler zur Unsicherheit beitragen, kann auch angenommen werden, dass der Messprozess V normalverteilt ist und keine systematischen Fehler aufweist.

$$V \sim N(0, u_c^2) \quad (2)$$

Wobei u_c die kombinierte Standardunsicherheit ist. Der beobachtete Prozess, oder die empirische Qualitätscharakteristik X^e , resultiert aus der Überlagerung des wirklichen Produktionsprozesses mit dem Messprozess.

$$X^e = X + V \quad (3)$$

Wenn die Produktions- und Messprozesse statistisch unabhängig sind, resultiert die Verteilung des beobachteten Prozesses aus der Faltung der zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen.

$$X^e \sim N(\mu_e = \mu, \sigma_e^2 = \sigma^2 + u_c^2) \quad (4)$$

Wobei σ_e die beobachtete Standardabweichung ist und μ_e der beobachtete Mittelwert ist. Wie in Gleichung 4 ersichtlich, wird die beobachtete Varianz des Produktionsprozesses durch das Quadrat der kombinierten Standardunsicherheit vergrößert. Abbildung 2 stellt den Effekt des Messprozesses auf die beobachtete Verteilungsfunktion eines Produktionsprozesses dar.

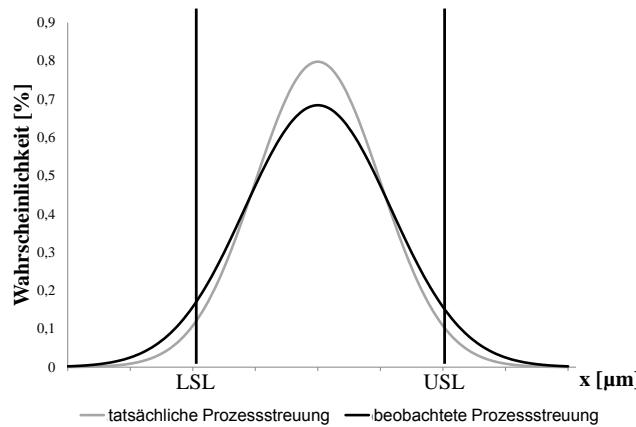


Abbildung 2. Überlagerung eines Produktions- und Messprozesses.

Bedingt durch diesen Effekt ist ein Produktionsprozess bei steigender Messunsicherheit schwieriger zu bewerten.

Prozessfähigkeitsindizes sind ein wichtiges Werkzeug für die Anwendung der Statistischen Prozessregelung (SPC) zur kontinuierlichen Verbesserung der Qualität [5]. Prozessfähigkeitsindizes quantifizieren die Fähigkeit eines Prozesses Teile, die mit den Kundenanforderungen übereinstimmen, herzustellen. Zwei übliche Prozessfähigkeitsindizes sind die c_p und c_{pk} Indizes. Diese Indizes können genutzt werden, um die Leistung normalverteilter Prozesse mit symmetrischen Toleranzen zu quantifizieren. Wie alle Prozessfähigkeitsindizes können die c_p und c_{pk} Indizes nur genutzt werden, um die Leistung eines beherrschten Prozesses zu beschreiben. Der c_p Index beschreibt die Beziehung der Herstellungstoleranz zur Prozessvariabilität und ist wie folgt definiert:

$$c_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (5)$$

Der c_p Index berücksichtigt nur den Toleranzbereich und die Standardabweichung des Produktionsprozesses. Er bietet keine Information über die Lageabweichung der Prozessverteilung in Relation zum Mittelpunkt des Toleranzbereichs. Anders als der c_p Index berücksichtigt der c_{pk} Index auch die systematische Abweichung des Prozesses vom Mittelpunkt zwischen der oberen und unteren Toleranzgrenze. Für perfekt zentrierte Prozesse, d.h. $\mu = (USL - LSL)/2$, sind die c_p und c_{pk} Indizes äquivalent. Der c_{pk} Index kann wie folgt definiert werden:

$$c_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right\} \quad (6)$$

Wie in Abbildung 2 dargestellt, ist die beobachtete Produktionsprozessvariation größer als die tatsächliche Prozessvariation, was zu einer Unterschätzung der c_p und c_{pk} Werte führt. Eine detaillierte Analyse der Auswirkungen von Messfehlern auf diesen beiden Prozessfähigkeitsindizes haben Mittag [6] und Bordignon [7] durchgeführt. In dieser Abhandlung wird nur die Wirkung der Messunsicherheit auf der c_p Index diskutiert. Wird die Standardabweichung des beobachteten Produktionsprozesses in Gleichung 4 eingesetzt, so führt dies zur Formel für den empirisch ermittelten c_p Wert:

$$c_p^e = \frac{USL - LSL}{6\sqrt{\sigma^2 + u_c^2}} \quad (7)$$

Es ist nun offensichtlich, dass eine Erhöhung der Messunsicherheit direkt zu einer Reduzierung des empirisch ermittelten c_p Werts führt. Es sei T die Toleranzbreite $USL - LSL$. Durch die Substitution von σ aus Gleichung (5) in Gleichung (7) erhält man für den empirischen c_p Wert in Bezug auf den Toleranzbereich, die Messunsicherheit und den wahren c_p Wert folgende Gleichung:

$$c_p^e = \frac{T}{6\sqrt{\left(\frac{T}{6c_p}\right)^2 + \left(\frac{U}{k}\right)^2}} \quad (8)$$

Wobei $U = k \cdot u_c$ die erweiterte Messunsicherheit ist.

Abbildung 3 veranschaulicht graphisch, wie der beobachtete c_p Index rasch abnimmt, wenn sich die Messunsicherheit ($k = 2$) mit Bezug auf den Toleranzbereich erhöht.

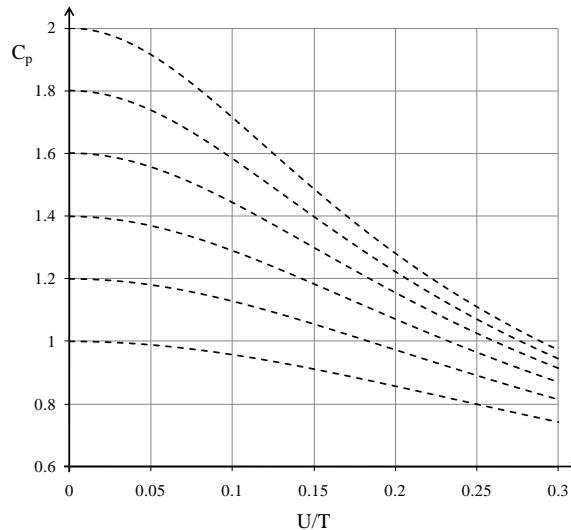


Abbildung 3. Einfluss der Messunsicherheit auf den c_p Index [2]

Um die Mängel der herkömmlichen Prozessfähigkeitsindizes hinsichtlich der Messunsicherheit zu überwinden, kann versucht werden, die Wirkung der Messunsicherheit zu beseitigen. Durch Lösen der Gleichung (8) für c_p kann eine Schätzung der wahren Prozessfähigkeit als Funktion der beobachteten Fähigkeit und dem Verhältnis der erweiterten Messunsicherheit zur Toleranz erhalten werden:

$$\hat{c}_p \left(c_p^e, U/T \right) = \frac{1}{6} \left(\left(\frac{1}{6c_p^e} \right)^2 - \frac{1}{k^2} \left(\frac{U}{T} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (9)$$

Diese Formel sollte jedoch mit Vorsicht eingesetzt werden, da eine Überschätzung der Messunsicherheit zu einer Überschätzung der realen Prozessfähigkeit führt. Aus diesem Grund schlägt Weckenmann vor, dass die Messunsicherheit hinsichtlich eines Intervalls [8] angegeben wird. Ein Beispiel ist in Abbildung 4 gegeben. Wenn der c_p Index mit 1,3 gemessen wird und die geschätzte Messunsicherheit zwischen $0,05^*T$ und $0,15^*T$ liegt, kann eine reale Prozessfähigkeit zwischen 1,32 und 1,60 erwartet werden.

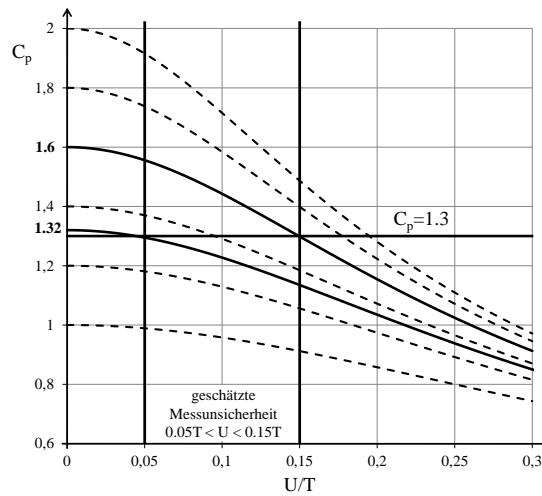


Abbildung 4. Entscheidungsregeln bei geschätzter Messunsicherheit [9]

Durch die Schätzung des tatsächlichen Prozessfähigkeitswertes können die Entscheidungsträger Investitionen zur Produktionsprozess- oder Messvorgangsverbesserung besser bewerten. Es ist zwar das Ziel, die Effekte der Messunsicherheit im Wesentlichen nicht in die Bewertung der Prozessfähigkeit einfließen zu lassen, doch kann dieser Ansatz aber keine genaue Aussage über die Fähigkeit des Gesamtprozesses (d. h. Fertigungs- und Messprozess) liefern, Teile mit den geforderten Merkmalen herzustellen.

Hierfür wurde im Rahmen des Teilprojekts C4 ein Ansatz entwickelt, welcher versucht, die Toleranz des Qualitätsmerkmals, den Produktionsprozess und den Messungsprozess in die Auswertung der Prozessfähigkeit zu vereinheitlichen. Durch die bei der Mikrofertigung relativ große Messunsicherheit im Verhältnis zur

Toleranz ist die richtige Einschätzung und Berücksichtigung der Messunsicherheit von entscheidender Bedeutung für die Qualitätssicherung der gefertigten Teile. Die genaue Betrachtung der „wahren“ Prozessfähigkeit ist in der Praxis nicht relevant, da nicht bewiesen werden kann, dass Teile mit Messwerten im Unsicherheitsbereich, wie in ISO 14253-1 definiert, mit den Kundenanforderungen übereinstimmen. Deshalb müssen Teile im Unsicherheitsbereich als Ausschuss angesehen werden. Somit wird die für die Fertigung nutzbare Toleranz im Wesentlichen durch die Messunsicherheit reduziert. Wird die Prozessfähigkeit als die Fähigkeit, Teile innerhalb des Übereinstimmungsbereichs herzustellen, definiert, muss die Definition der c_p und c_{pku} Indizes angepasst werden. Die resultierenden Prozessfähigkeitsindizes werden als c_{pu} und c_{pku} bezeichnet, da sie die Unsicherheit der Messung berücksichtigen.

$$c_{pu} = \frac{T - 2U}{6\sigma_e} \quad (10)$$

$$c_{pku} = \min \left\{ \frac{(USL - U) - \mu}{3\sigma_e}, \frac{\mu - (LSL + U)}{3\sigma_e} \right\} \quad (11)$$

Diese neuen Indizes ermöglichen es, die Leistung des Herstellungsprozesses und des Messprozesses mit einem einzelnen Wert auszuwerten. Abbildung 5 zeigt einen Vergleich der c_p und c_{pu} Indizes bei zunehmender Messunsicherheit. Es ist ersichtlich, dass der c_{pu} Index mit zunehmender Messunsicherheit schneller als der c_p Index abnimmt. Dies ist zu erwarten, da die Übereinstimmungsbereich kontinuierlich schrumpft während die Messunsicherheit wächst. Außerdem ist der c_{pu} Index gleich Null, wenn die Messunsicherheit genau der Hälfte des Toleranzbereichs entspricht. Dies ist auch sinnvoll, da der Messprozess an dieser Stelle nicht mehr in der Lage wäre, die Konformität eines Teils zu der Spezifikation zu beweisen: Es gäbe keine Übereinstimmungsbereich.

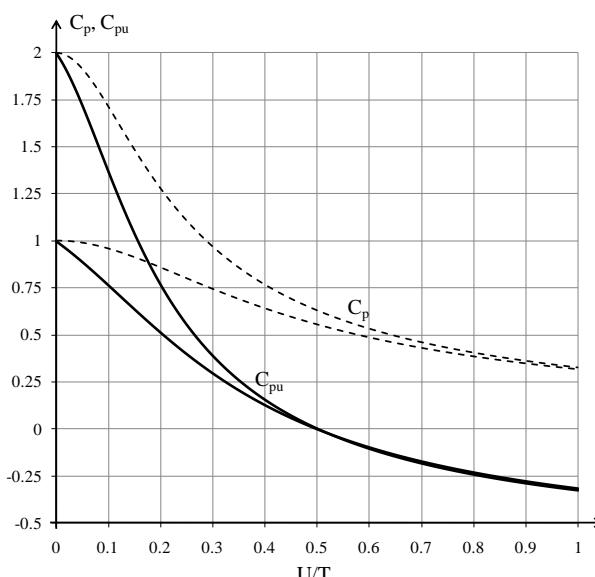


Abbildung 5. Einfluss der Messunsicherheit auf c_p und c_{pu} Indizes

Prozesse mit einem c_p Wert größer als 1,33 sind im Allgemeinen gewünscht. Wenn die Prozessverteilung zentriert ist und die Auswirkungen der Messunsicherheit vernachlässigt wird, entspricht ein c_p von 1,33 einer Fehlerrate von 63 ppm; d.h. 63 ppm liegen außerhalb des Toleranzbereichs. Ein Vorteil der vorgeschlagenen Indizes ist, dass die empfohlenen Werte, die Produktionsprozesse erhalten sollen, nicht für die neuen Indizes angepasst werden müssen. Sie würden einfach eine neue Bedeutung haben. Ein c_{pu} Wert von 1,33 unter identischen Annahmen würde bedeuten, dass 63 ppm außerhalb der Übereinstimmungsbereich wären. Diese Eigenschaft könnte wesentlich die Akzeptanz und Umsetzung der c_{pu} und c_{pku} Indizes in industriellen Anwendungen erleichtern.

Entwicklung einer prozesskettengerechten Prüf- und Messstrategie

Da Hersteller von mikromechanischen Bauteilen noch wenig Erfahrung mit der Auslegung einer effektiven Qualitätssicherungsstrategie haben, wird eine methodische Vorgehensweise benötigt, um die richtige Prüfstrategie festzulegen. Simulationen und multikriterielle Optimierungsverfahren stellen eine Möglichkeit dar, um das Zusammenspiel von Fertigungsstreuung, Messunsicherheit, Sollgeometrie, Toleranzen und Prüfstrategie zu berücksichtigen und eine mikroprozesskettenoptimale Prüfstrategie auszuwählen. Diese Untersuchungen sind allerdings zeitintensiv, kostspielig und erfordern viel Expertenwissen. Innerhalb des SFB 499 Projekts C4 wurden deswegen Richtlinien zur Auslegung einer mikrokettengerechten Qualitätssi-

cherung durch die Methode Axiomatic Design entwickelt und anhand eines multikriteriellen Optimierungsverfahrens verifiziert.

„Axiomatic Design“ [9] wurde in den 70er Jahren von Professor Suh am Massachusetts Institute of Technology entwickelt und stellt eine Methode zum strukturierten Entwurf von Produkten und den zugrundeliegenden Produktionssystemen dar. Das Grundprinzip von Axiomatic Design umfasst die strukturierte Suche und Zuordnung geeigneter Lösungen für zuvor festgelegte Anforderungen nach dem Independence- und Informationsaxiom [10]. Die Anforderungen und Lösungen werden auf vier verschiedene Domänen aufgeteilt: die Kundendomäne (Kundenanforderungen KA), die funktionale (Funktionsanforderungen FA) und die physische Domäne (Designparameter DP) sowie die Prozessdomäne (Prozessvariablen PV). Der vorgeschlagene Ansatz zur Ableitung einer optimalen Prüfstrategie sieht nun vor, die Prozessdomäne in eine fünfte Sichtweise - die Qualitätsdomäne - zu übersetzen, um hierdurch sowohl funktions- als auch fertigungskritische Qualitätsmerkmale (QM) abzuleiten, siehe Abbildung 6.

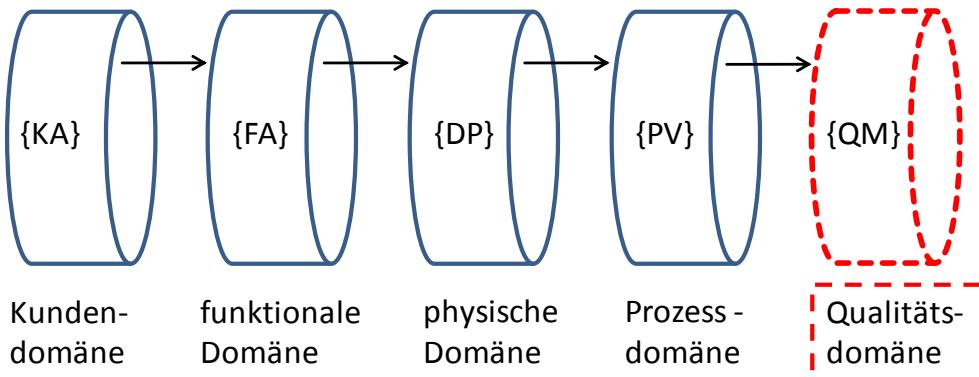


Abbildung 6: Übersetzung der Kundenanforderung gemäß Axiomatic Design

Da sich die Methode Axiomatic Design vom ersten Schritt an rein auf die Erfüllung der Funktions- bzw. Kundenanforderungen fokussiert, stellen die geometrischen Grundelemente bzw. die unterste Ebene der Designparameter in einem Axiomatic Design-Baum zugleich die funktionskritischen QMs dar. Eine ausführliche Herleitung und Identifikation solcher funktionskritischen QMs – s.g. Microfeatures – wird in [10] gezeigt. Zur Priorisierung dieser funktionskritischen QMs werden diese anschließend über das Informationsaxiom geprüft, ob es sich um fertigungskritische QMs handelt; d.h. ob bei der Herstellung dieser QMs besondere Herausforderungen bezüglich der Prozessstabilität bestehen. In seiner ursprünglichen Form können über das Informationsaxiom verschiedene Produktdesigns oder Produktionssystemdesigns verglichen werden und dasjenige mit dem kleinsten Informationsgehalt, d.h. mit der geringsten Komplexität, wird ausgewählt. Der Informationsgehalt I wird über die folgende logarithmische Gleichung ausgedrückt:

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{p} \right) \quad (12)$$

Wobei p die Wahrscheinlichkeit darstellt, die jeweilige FA (=Designbereich) erfolgreich durch die DPs bzw. PVs (=Systembereich) abzubilden. Eine wünschenswerte Lösung hat dabei eine besonders große Überdeckung zwischen Design- und Systembereich [10] (Abbildung 7 links).

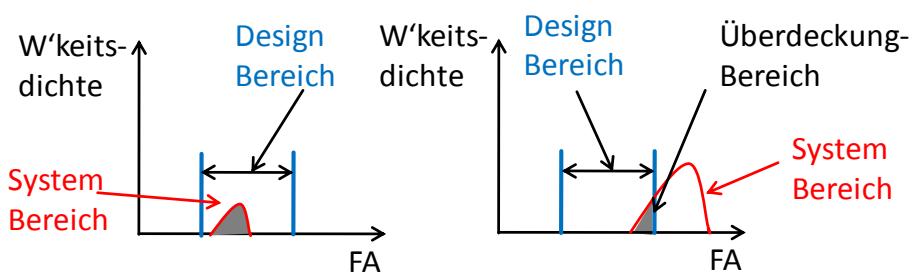


Abbildung 7: Ableitung des Informationsgehalts anhand der Überdeckung von Design- und Systembereich, links: geringe Information, rechts: hohe Information

Der Informationsgehalt einer Lösung wird über die folgende Formel angegeben:

$$I = \log_2 \left(\frac{\text{System-Bereich}}{\text{Überdeckungs-Bereich}} \right) \quad (13)$$

Falls n FAs existieren, wird der totale Informationsgehalt wie folgt ausgedrückt:

$$I_{total} = \sum_{i=1}^n I_i \log_2 \left(\frac{\text{System-Bereich}}{\text{Überdeckungs-Bereich}} \right) \quad (14)$$

Das Informationsaxiom hilft nun bei der Ableitung der optimalen Prüfstrategie, indem in einem ersten Schritt der Design- und Systembereich der Prozessfähigkeit des Fertigungsprozesses für jeden Prozessschritt, in welchem ein funktionskritisches QM manipuliert wird, gegenübergestellt wird. Das heißt, es werden fertigungskritische QMs identifiziert und priorisiert.

In einem zweiten Schritt werden nun die zur Verfügung stehenden Messsysteme für die Charakterisierung der priorisierten funktions- und fertigungskritischen QMs ausgewählt, indem das Informationsaxiom auf weitere „Prüfstrategieregeln“ wie beispielsweise die Prüfmittelfähigkeit angewandt wird. Es wird also für die funktions- und fertigungskritischen QMs geprüft, ob bei der Charakterisierung Herausforderungen bezüglich der Messstabilität bestehen, indem z.B. das 10-15% Intervall eines Toleranzbandes mit der Messunsicherheit der Messsysteme verglichen wird (= goldene Regel der Messtechnik). Auf diese Art kann strukturiert und schrittweise eine optimale Prüfstrategie, welche QMs in welchem Prozessschritt mit welchem Messsystem zu charakterisieren sind, abgeleitet werden.

Die Ableitung von funktionskritischen QM anhand der Methode Axiomatic Design wurde für die SFB 499 Demonstratoren – ein Mikroplanetengetriebe und eine Mikroturbine – erfolgreich durchgeführt [10, 11]. Die Arbeiten in der 4. Förderphase fokussierten auf die beschriebene Anwendung des Informationsaxioms auf alle als funktionskritisch identifizierten QMs, die entlang der urformenden Prozesskette des SFB 499 manipuliert werden, gemäß der in Abbildung 8 aufgezeigten Kriterien.

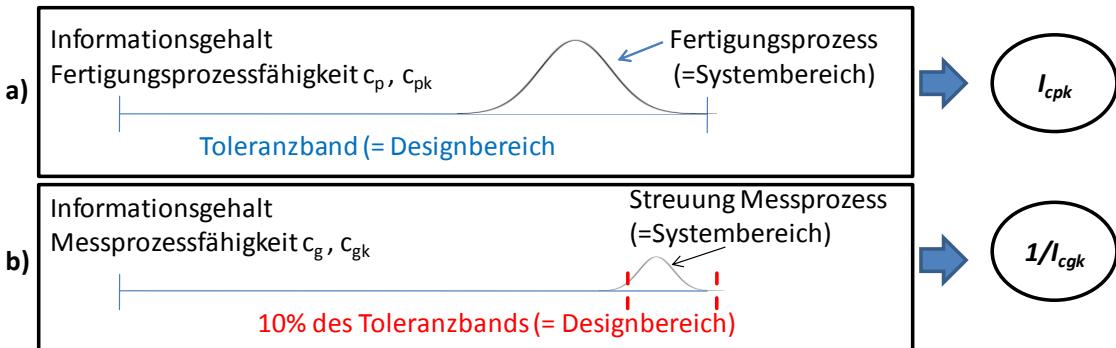


Abbildung 8: Design- und Systembereich für die Anwendung des Informationsaxioms zur Identifikation fertigungs- (a) und messkritischer QMs (b)

Zusammenfassend kann so eine Prioritätenliste abgeleitet werden, die beschreibt, welche Qualitätsmerkmale mit welchem Messsystem charakterisiert werden sollten. Die Verifizierung der durch Axiomatic Design evaluierten Prüfstrategien bzw. die Bestimmung der Prüfschärfe und der Stichprobenstrategie kann anschließend über eine Simulation und multikriterielle Optimierung bestimmt werden.

Um verschiedene Prüfstrategien zu evaluieren und die optimale Prüfstrategie auszuwählen, wurden die drei Zielkriterien Kosten der Prüfung (1), Zeit für die Prüfung (2) und Güte der Prüfaussage (3) identifiziert. Vor allem die Güte der Prüfaussage muss beachtet werden, da die Messunsicherheit der Messsysteme in derselben Größenordnung wie die Toleranz liegen kann. Dadurch können Fehlentscheidungen (Fehler 1. Art und Fehler 2. Art) bezüglich der Annahme oder Ablehnung eines Bauteils auftreten. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Fehlentscheidung auftritt, kann ermittelt werden, wenn eine Funktion für die Wahrscheinlichkeitsdichte der Messunsicherheit angenommen wird.

Trotz der bezogen auf die Toleranzen relativ großen Messunsicherheit muss eine quantitative Aussage bzw. Charakterisierung der dimensionellen Qualitätsmerkmale getroffen werden. Eine mikroprozesskettengerechte Qualitätssicherung muss deswegen das Zusammenspiel von Fertigungsstreuung, Messunsicherheit, Sollgeometrie, Toleranzen und Prüfstrategie berücksichtigen. Um dieses Zusammenspiel zu untersuchen, wird ein objektorientiertes Modell entwickelt. Darin werden die mikromechanischen Bauteile und ihre funktionskritischen dimensionellen Merkmale, die Fertigungsprozesse, die Messgeräte und die Messstrategien abgebildet. Anhand des Modells kann eine mögliche Prüfstrategie nach den vorgenannten Kriterien bewertet werden.

Um alle funktionskritischen Merkmale zu charakterisieren, muss für jedes Merkmal ein Messgerät, eine Messstrategie und eine Stelle in der Prozesskette zugeordnet werden. Das Problem, eine optimale Prüfstrategie festzulegen, ist also ein kombinatorisches Problem. Das heißt, für eine große Anzahl von Merkmalen, Prozessschritten, Mess-/Prüfsystemen oder Messstrategien ist eine vollständige Enumeration aller möglichen Lösungen nicht mehr realisierbar. Aus diesem Grund sieht es der vorliegende Ansatz vor, Methoden des Operations Research anzuwenden [31].

Des Weiteren stellen die oben genannten Kriterien konkurrierende Ziele dar. Um die Beziehungen zwischen den Kriterien zu analysieren, muss die Menge von Pareto-optimalen Lösungen gefunden werden. Dafür wird eine Metaheuristik, z. B. ein evolutionärer Algorithmus, verwendet. Anschließend kann die für einen Hersteller optimale Lösung mittels einer Gewichtung der Kriterien ausgewählt werden. Dieser Prozess erfolgt durch eine Nutzwertanalyse. Ein Überblick über diesen Ansatz zur Bestimmung der optimalen Prüfstrategie wird in Abbildung 9 gegeben.

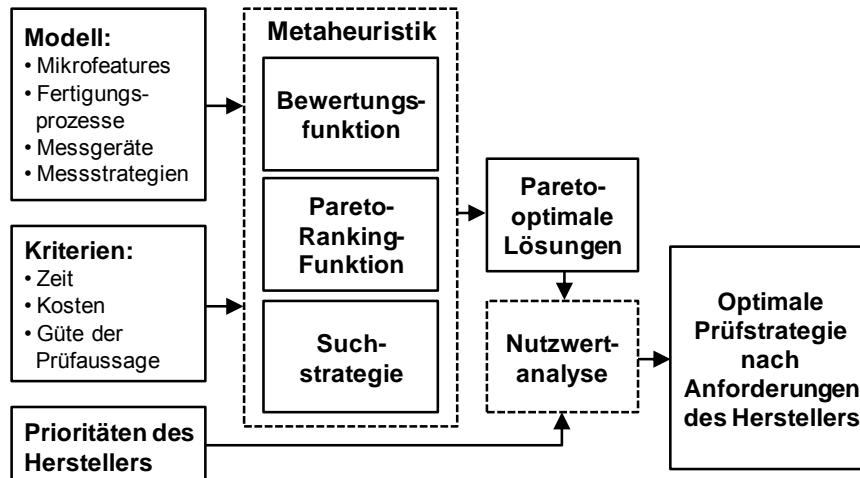


Abbildung 9: Überblick über die Methode zur multikriteriellen Optimierung der Prüfstrategie

Um dem Algorithmus eine Vielzahl an möglichen Messgeräten zur Verfügung zu stellen, wurde eine Marktstudie durchgeführt. Dabei wurden die modernsten Messgeräte bzw. -sensoren zusammen mit den für die Bewertung relevanten technischen Daten (u.a. Messbereich, Geschwindigkeit, Auflösung, MPE-Werte etc.) in einer Matrix zusammengestellt.

Dimensionelle Messtechnik

In Ergänzung zu den bisher beschriebenen Ergebnissen wurde als Basis speziell für die Regelung und Optimierung der Fertigungsprozesse die kontinuierliche dimensionelle Messung der Formeinsätze sowie Demonstratorbauteile eingeführt. Diese wurden durch die Erkenntnisse und erweiterten Messmöglichkeiten aus dem TFB T2 (Firma Zeiss mit den KMGs O-Inspect und F25) verbessert. Auf der F25 wurde beispielsweise die Messbarkeit der Merkmale eines in Zusammenarbeit mit dem wbk Institut für Produktionstechnik neu entwickelten Prüfwerkstücks der NC-Gesellschaft durch Zeiss überprüft.

Ebenfalls erfolgt mittels optisch-taktiler Koordinatenmesstechnik die Messung der Demonstratorbauteile, die in den Prüfstandsversuchen von TP A1 auf ihre Funktionstüchtigkeit untersucht werden [24]. Aufgrund der engen Zusammenarbeit mit den fertigenden Teilprojekten (A3, C1, C2, C3, C5 bzw. B4, B5, B6, Z3) über die Qualitätsregelkreise erfolgten Messungen der sich in verschiedenen Stadien (Modell, Grünling, gesintertes bzw. gegossenes Fertigteil) befindlichen Bauteile schon während der Fertigung. Dies wurde durchgeführt, um schnellstmöglich regelnd auf die Produktion einzutreten und somit die Forderung nach robusten Prozessketten zu unterstützen. Aufgabe war es somit, Daten aus einer prozess- und systemgerechten dimensionellen Mikro-Messtechnik zu liefern, korrekt zu interpretieren und diese Informationsflüsse effizient in das ZIM zurückzuführen.

Des Weiteren wurde ein neuer Ansatz für den Mikroproduktentwicklungsprozess zusammen mit TP A1 entwickelt, in welchem Herstellungsdaten von zuvor entwickelten und gefertigten Mikrosystemen benutzt werden, um die Tolerierung neuer Entwicklungsprojekte zu unterstützen. Der existierende Microfeature-Katalog mit früheren Produktionsdaten des SFB 499 wurde daraufhin angepasst, um einen toleranz- anstelle eines teileorientierten Zugangs zu Produktionswissen zu ermöglichen. Dieser neue Ansatz wurde schließlich bei der Entwicklung der Mikrogasturbine angewandt [25].

Um mechanische Systeme zu miniaturisieren, müssen technologische Restriktionen beachtet werden, welche für die Anwendung eines Herstellungsprozesses gelten, wie zum Beispiel Mikrofräsen oder Mikropulverspritzgießen. Geometrien können zwar verkleinert werden, aber die realisierbaren Prozessabweichungen können nicht im selben Maße gemindert werden. Während der Entwicklung des Mikrosystems müssen diese Effekte beachtet und deshalb in einer frühen Phase analysiert und bewertet werden. Dies kann durch die Rückmeldung der Fertigungsprozessabweichungen an das Entwicklungsteam erreicht werden. Leider ist die Beschaffung und Pflege von Informationen über notwendige Toleranzen und erreichbare Abweichungen von Fertigungsprozessen sehr schwierig. Jedoch kann ein umfassender Ansatz, diese Informationen zu gewinnen und während des Prozesses zu erhalten, zu einer beträchtlichen Verbesserung der Qualität führen und den μ -Produktentstehungsprozess (μ -PEP) beschleunigen. Durch die Zuhilfenahme existierender Qualitäts-

daten kann die Entwicklung und Tolerierung mikromechanischer Systeme beschleunigt und verbessert werden.

Im Makro-PEP werden Komponenten entwickelt und passende funktionsrelevante Toleranzen zugeordnet, welche von der Produktion eingehalten werden müssen. Je nach Toleranzfeldbreite werden adäquate Produktionsprozesse mit ausreichend kleiner Prozessabweichung ausgewählt, so dass durch die Prozessabweichung die Toleranzgrenzen nicht überschritten werden. Deshalb beeinflusst die Toleranzfeldbreite die Gesamtproduktionskosten einer Komponente.

Da der μ -PEP durch die Fähigkeit der verfügbaren Herstellungsprozesse limitiert ist, können Toleranzen nicht nur auf Grund funktionaler Kriterien den Komponenten zugewiesen werden. Die Zuweisung von Toleranzen sollte sich an den Fähigkeiten der verwendeten Produktionstechnologien orientieren. Bei der Mikroproduktion sind dies bereits die besten verfügbaren Technologien, weshalb die Prozessgrenzen in jedem Fall beachtet werden müssen. Im Gegensatz zur Makrotolerierung ist dies nicht eine Frage der Kosten sondern der Herstellbarkeit.

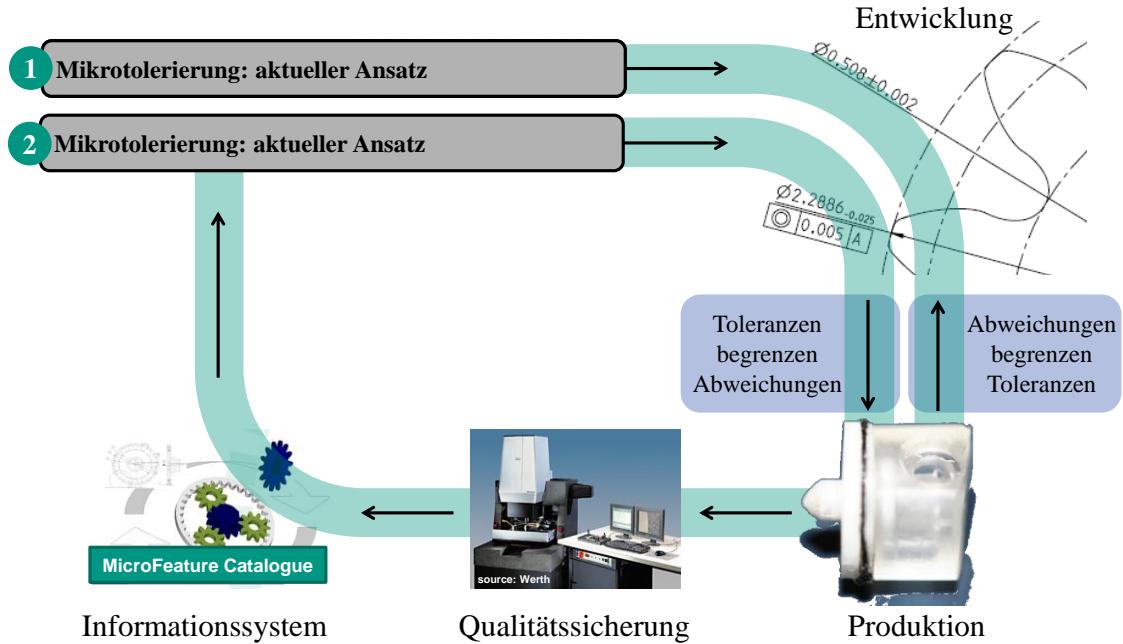


Abbildung 10: Neuer Tolerierungsansatz für μ -PEP: Durch die Nutzung des Microfeature-Katalogs beim Produktionswissen wird der μ -PEP geschlossen.

Bei der Mikrotolerierung braucht der Entwickler Unterstützung für die sich unterscheidenden Bedingungen. Informationen über herstellbare Toleranzen (Dimensions-, Positions- und Gestalttoleranzen) für Merkmale wie Ebenen oder Bohrungen in Bezug zu den Merkmalsdimensionen müssen bereitgestellt werden. Der Zugang zu diesen Informationen würde idealerweise über die spezielle Art der Toleranz ermöglicht. Durch die Zuhilfenahme von Produktionswissen und Qualitätssicherung kann eine bessere Zusammenarbeit zwischen Entwicklung und Produktion erreicht werden, siehe Abbildung 10.

Als ein Teil des SFB 499 wurde die Projektarbeit von einem Team von Mitarbeitern verschiedener Institute am KIT durchgeführt. Um den Wissensaustausch der verschiedenen Teammitglieder zu verbessern, wurde eine Internetdatenbank entwickelt, welche das Speichern von Daten zu jeder Phase des Produktentwicklungsprozesses ermöglicht (zum Beispiel Entwicklung, Herstellung und Qualitätssicherung) [10]. In der Datenbank befinden sich die Nominal- und Ist-Werte der Bauteile, sowie auch die Parameter der verwendeten Fertigungsprozesse. Mit Hilfe dieser Daten können Prozessabweichungen bestimmt und analysiert werden. Jedoch ermöglichte die vorherige Konfiguration der Datenbank nur den teileorientierten Zugriff auf die bestimmten Prozessabweichungen. Falls der Entwickler die erreichbaren Prozessabweichungen für seine aktuelle Entwicklung schätzen wollte, musste er ein spezifisches Teil auswählen, das schon hergestellt wurde. Dann musste er die Merkmale des Teils nach Übereinstimmungen zu seiner aktuellen Entwicklung absuchen. Falls ein überwiegender Teil der Merkmale zwischen den beiden Teilen übereinstimmte, erhielt er nützliche Informationen über die zugewiesenen Toleranzen des neuen Teils. Da identische Teile nicht mehrmals entwickelt werden müssen, ist die teileorientierte Betrachtung nicht sinnvoll. Anstelle dessen wäre eine toleranzorientierte Betrachtung passender. Im Idealfall könnte der Entwickler in der Datenbank nach einem spezifischen geometrischen Element (zum Beispiel ein zylindrischer Schaft oder eine Bohrung) mit vorgegebenen Parametern (wie Zylindrität oder Rundheit) suchen. Um den direkten Zugang zu diesen Informationen zu ermöglichen, wurde die oben erwähnte Datenbank angepasst.

In der vierten Förderphase des SFB 499 wurde eine Mikrogasturbine entwickelt, siehe Abbildung 11 [12]. Ein Hauptproblem ist die Tolerierung der Gasturbinenkomponenten. Zum Beispiel benötigt das Buchsengehäuse, das beide Seiten unterstützt, mehrere Toleranzen gleichzeitig. In diesem Fall sind Zylindrizität, Rechteckigkeit und Parallelität von großer Wichtigkeit. Für die beste Leistung des Rotors müssen, unter der Beachtung der Herstellbarkeit, diese Toleranzen so klein wie möglich sein. Durch die Benutzung der Datenbank wurde Produktionswissen über entstandene Prozessabweichungen von vorherigen Entwicklungsprojekten an aktuelle Projekte weitergegeben. In diesem Fall wurden Toleranzvorschläge für die Zylindrizität von einer zuvor gefertigten Mikroturbine übernommen.



Abbildung 11: Durch die Hilfe von Produktionsdaten zuvor entwickelter Projekte (links) wird die Tolerierung des aktuell zu entwickelnden Projektes „Mikrogasturbine“ vereinfacht (rechts).

Im Kontrast zur Makrotolerierung stehen bei der Mikrotolerierung nicht die Kosten sondern die Herstellbarkeit im Fokus. Im neu entwickelten Tolerierungsansatz für den μ -PEP wurden Fertigungsdaten von zuvor entwickelten und hergestellten Mikrosystemen verwendet, um die Tolerierung neuer Entwicklungsprojekte zu unterstützen. Deshalb wurde eine schon existierende Datenbank früherer Produktionsdaten des SFB 499 angepasst, um einen toleranzorientierten anstelle eines teileorientierten Zugangs zu Produktionswissen zu ermöglichen.

Herausforderungen bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Die vorgesehene Entwicklung und Implementierung prozesskettenübergreifender Fähigkeitsindizes konnte wegen des großen Einflusses der Messunsicherheit nicht ohne mikroprozessspezifische Fähigkeitsindizes für die Bewertung von einzelnen Mikrofertigungsprozessen durchgeführt werden. Da es noch keine geeigneten Prozessfähigkeitsindizes für Mikroprozesse gab, mussten diese zuerst entwickelt werden. Die aus der Arbeit hervorgegangenen c_{pu} und c_{pku} Indizes stellen eine geeignete Lösung hierfür dar und ermöglichen so zukünftig die Entwicklung von Fähigkeitsindizes für die Bewertung gesamter Mikroprozessketten. Darüber hinaus wurde eine Methodik zur kompletten Trennung von Messstreuung und beobachteter Prozessstreuung konzipiert und theoretisch untersucht. Zurzeit wird dieser Ansatz durch Messreihen am wbk Institut für Produktionstechnik experimentell validiert.

Die Erfahrungen der dritten Förderphase und auch die Gespräche im SFB 499-Industriebegleitkreis haben gezeigt, dass sich die entwickelten Methoden im Hinblick auf deren Qualität, den Zeitaufwand und die verursachenden Kosten zu messen haben. Daher wurde in der 4. Förderphase eine Methodik zur Definition einer prozesskettengerechten Prüf- und Messstrategie nach den Kriterien 'Kosten der Prüfung', 'Zeit der Prüfung' und 'Güte der Prüfaussage' in einem s.g. μ -Qualitätssicherungskonfigurator entworfen. Die vorgestellte Methodik basierend auf Axiomatic Design stellt eine Möglichkeit dar, diese Aufgabe systematisch zu lösen.

Die Erweiterung der dimensionellen Mikromesstechnik um die experimentellen Messunsicherheitsuntersuchungen für Messprozesse an Koordinatenmessgeräten konnten für den aktuellen Miniaturisierungsgrad und die Komplexität der gegenwärtigen Demonstratoren erfolgreich abgeschlossen werden. Des Weiteren konnten bei komplexeren Geometrien mit Freiformflächen auf die Messgeräte und die Erfahrung der Firma Zeiss, Industrielle Messtechnik aus dem Transferprojekt T2, zurückgegriffen werden. Durch die Erweiterung der SFB 499-Informationsmanagementumgebung wurde allen SFB Teilprojekten ein einfach zu bedienendes und effektives Werkzeug zur Verfügung gestellt, welches als Wissensspeicher und zur Datenanalyse genutzt werden kann.

Zusammenfassend ergeben sich in der dimensionellen Charakterisierung von noch kleineren Strukturen und bei der Gewährleistung der Robustheit ganzer Mikroprozessketten offene Fragen und Potentiale. Diese Fragestellungen werden durch weiterführende Untersuchungen am wbk Institut für Produktionstechnik angegangen.

Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Eine effiziente und effektive Qualitätssicherung muss entlang der gesamten Prozesskette wirken. Daher besteht zwischen TP C4 und den anderen TPs innerhalb des SFB 499 eine sehr starke Bindung und Kooperation. Wie bereits geschildert, bestehen enge Verknüpfungen zwischen der Entwicklungsmethodik (TP A1) und den aufgenommenen dimensionellen Messergebnissen [25]. Des Weiteren war die enge Zusammenarbeit zwischen TP A1, TP A2 und TP C4 essentiell, um die dimensionellen Messergebnisse mit den Prüfstandsversuchen abzuleiten und somit das Robust Design bzw. die Simulation und Modellierung zu validieren [24].

Die Fertigung mikromechanischer Bauteile ist durch eine starke Abhängigkeit und eine hohe Prozessverketzung von der Konstruktion über die fertigenden Verfahren bis hin zur Qualitätssicherung gekennzeichnet. In den von Teilprojekt C4 geleiteten und organisierten Qualitätsregelkreisen zwischen analysierenden (C4, D1, D2) und urformenden Teilprojekten Mikroguss C2 (Qualitätsregelkreis I), Mikropulverspritzguss C1 (Qualitätsregelkreis II), Niederdruckspritzguss A3 (Qualitätsregelkreis III), Sinterfügen C3 (Qualitätsregelkreis IV) und Zwei-Komponenten-Spritzguss C5 (Qualitätsregelkreis V) wurden in erster Linie Qualitätswirkzusammenhänge zwischen Prozessparametern und Bauteilmerkmalen als Grundlage für die Ableitung eines adäquaten Qualitätssicherungskonzeptes und prozessverbessernder Maßnahmen ausgearbeitet. In Form dieser halbjährlich stattfindenden Qualitätsregelkreise wurde die interaktive und interdisziplinäre Zusammenarbeit forciert und die Analysen der Bauteile und Formeinsätze hinsichtlich von Qualitätsmerkmalen durchgeführt, um die Prozesse zielgerichtet weiter zu entwickeln.

Für die einzelnen SFB 499-Fertigungsverfahren wurden neben dimensionellen Messergebnissen der Formeinsätze und Mikrobauteile auch die fertigungsbedingten Gestaltabweichungen, die für eine Abschätzung der Messunsicherheit notwendig sind, charakterisiert. Gemeinsam mit den formeinsatzherstellenden und urformenden TPs wurden Versuchsreihen durchgeführt und unter Anleitung von TP C4 gemäß der Versuchsplanung statistisch ausgewertet. Durch die Implementierung (der statistischen Werkzeuge) des Microfeature-Katalogs steht darüber hinaus allen Teilprojekten ein einfach zu bedienender Baukasten zur Datenanalyse zur Verfügung. Vor allem die Weiterentwicklung des Microfeature-Katalogs sichert die spätere Verwertung der neu gewonnenen Erkenntnisse für das ZIM.

Zusammenfassend lässt sich schließen, dass die Thematik Qualitätssicherung stark innerhalb der SFB 499-Prozesskette verankert war, dies zeigt sich in den vielen bilateralen Kooperationen und der großen Anzahl von Qualitätsregelkreisen und Arbeitskreisen unter Beteiligung von TP C4.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Zum Stand der Forschung und Technik wird auf den Antrag zur 3. und 4. Förderphase sowie auf den Antrag zur Einrichtung von Transferprojekt T2 „Fertigungsnahe Mikro-Qualitätssicherung“ verwiesen, in welchen dieser ausführlich sowohl für die statistische Prozessregelung, die Informationsbereitstellung als auch die dimensionelle Messtechnik von urgeformten Mikrobauteilen aus Keramik und Metall dargelegt wurde. Auf grundlegende Forschungsaktivitäten und neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Qualitätssicherung für Mikroprozessketten wird im Folgenden eingegangen.

Sowohl von Forschungs- als auch von Industrieseite wird der Qualitätssicherung und Charakterisierung von Strukturen im Mikrobereich eine übergeordnete Relevanz zugesagt, dennoch wird noch ein enormes Entwicklungspotential eingefordert [13, 14, 15]. Nur eine effiziente Qualitätssicherung mit Hilfe einer hochgenauen Messtechnik kann Aussagen über die Qualität von Mikrostrukturen treffen und in schnellen Regelkreisen die zugrundeliegenden Produktionsprozesse steuern [14]. Entwicklungspotential besteht zum einen in der Entwicklung hochgenauer Mess- und Prüftechnik für Mikrostrukturen bzw. im Umgang mit noch nicht ausgereifter Mess-/Prüftechnik verglichen mit den einzuhaltenen Toleranzbändern [16, 17]. Zum anderen ist in der Beherrschung und Gewährleitung der Stabilität von Mikroprozessketten aufgrund der starken Abhängigkeiten und dem hohen Fehlerpotential zwischen den einzelnen Prozessschritten noch Handlungsbedarf gegeben [1, 14, 18].

In Makrodimensionen gibt es zahlreiche Forschungsarbeiten und Ansätze zur Abbildung und Beherrschung der Komplexität von fertigungstechnischen Prozessketten [19, 20, 21, 22, 23]. Die vorgestellten Ansätze können jedoch nur bedingt auf Prozessketten im Mikrobereich im Allgemeinen bzw. auf die urformende Prozesskette zur Herstellung keramischer und metallischer Bauteile im Speziellen übertragen werden. Arbeiten, die sich konkret auf die Entwicklung mikrospezifische Prozessfähigkeitsindizes beziehen, sind nicht bekannt. Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass außerhalb des SFB 499 bisher keine Ansätze zur Bewertung der Prozessfähigkeit von Mikrofertigungsverfahren sowie zur Planung wann, wie und was innerhalb der Mikroprozesskette gemessen und/oder geprüft werden muss, um effizient die Qualität zu sichern, vorhanden sind.

Literaturverzeichnis

- [1] Fleischer, J.; Lanza, G.; Schlipf, M.; Kotschenreuther, J.: Quality Benchmarking for Micro Manufacturing Processes. in: Production Engineering Research and Development, WGP XIII/2 Volume XIII Issue 2 (2006), Hannover, S. 169–172
- [2] Kunzmann, H., Pfeifer, T., Schmitt, R., Schwenke, H., Weckenmann, A., 2005, Productive Metrology - Adding Value to Manufacture, Annals of the CIRP, 54/2:155-168
- [3] GUM, Evaluation of measurement data – guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008
- [4] ISO 14253-1; Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications, 1998
- [5] Wu, C.-W., Pearn, W.L., Kotz, S., 2009, An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance, International Journal of Production Economics, 117:338-359
- [6] Mittag, H.J., 1997, Measurement error effects on the performance of process capability indices, Frontiers in Statistical Quality Control, Lenz, H.J., Wilrich, P.Th. (eds.), Physica: Heidelberg, 5:195-206
- [7] Bordignon, S., Scagliarini, M., 2002, Statistical analysis of process capability indices with measurement errors, Quality and Reliability Engineering International, 18:321-332
- [8] Weckenmann, A., Rinnagl, M., 2000, Acceptance of processes: do we need decision rules?, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 24:264-269
- [9] Suh, N.D.: The Principles of Design. Oxford University Press, New York, 1990
- [10] Elsner, J.: Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse, Dissertation, Institut für Produktionstechnik (wbk), Universität Karlsruhe, 2003
- [11] Fleischer, J.; Lanza, G.; Schlipf, M.; Behrens, I.: Quality assurance in micro production. In: Microsystem Technologies 12, 2006, No. 7, S. 707-711
- [12] Albers, A., Börsting P., & Turki, T. (2010). Application of Design Patterns for the Development of Primary Shaped Microsystems: a Case Study. In Multi-Material Micro Manufacture 4M 2010.
- [13] De Campos Porath, M.: Innovative Entwicklungen für eine effiziente Qualitätssicherung mikromechanischer Produktionsprozesse mit einem neuartigen Koordinatenmessgerät, VDI-Berichte Nr. 1914, (2005), pp.239-247
- [14] Scholz-Reiter, B.; Höhns, H.: Planung und Betrieb von Produktionssystemen in der Mikroproduktion, Industrie Management 21 (2005) 6, pp. 9-12
- [15] Weckenmann, A.: Neue Strategien der Mess- und Prüftechnik für die Produktion von Mikrosystemen und Nanostrukturen, tm Technisches Messen, 73 (2006) 1, Oldenbourg Verlag
- [16] Büttgenbach, S.; Brand, U.; Bütefisch, S.; Herbst, C.; Krah, T.; Phataralaoha, A.; Tutsch, R.: Taktile Sensoren für Mikromesstechnik, VDI-Berichte, Vol. 1950, (2006), pp. 109-118
- [17] De Campos Porath, M.; Seitz, K.: Dimensional Quality Assurance of Micro-Mechanical Parts with a Coordinate Measuring Machine; ICOOM No. 24 (2006)
- [18] Büttgenbach, S.; Hesselbach, J.; Tutsch, R.; Berndt, M.; Heuer, K.; Hoxhold, B.; Wrege, J.: Sensorgeführte Montage aktiver Mikrosysteme, Kolloquium Mikroproduktion; U. Dilthey, T. Dorfmüller (eds), Aachen, Mainz Verlag, 2005, pp. 263-272
- [19] Pfeifer, T.; Tillmann, M.: Qualitätsgerechte Prozesskettenoptimierung, FQS-DGQ Band 86-03, (2003)
- [20] Westkämper, E.: Supervision of quality in process chains by means of learning process models, Computers in Industry (1997) Nr. 33, pp. 71-82
- [21] Aurich, J.C.; Hielscher, T.; Siener, M.: Mysteriöse Produktionsfehler – Empirische Methoden sichern Prozessketten in der Fertigung; QZ Qualität und Zuverlässigkeit, 05 (2005), pp. 70-71
- [22] Eichgrün, K.: Prozesssicherheit in fertigungstechnischen Prozessketten – Systemanalyse ganzheitliche Gestaltung und Führung, FBK Produktionstechnische Berichte Universität Kaiserslautern, Band 46, (2003)
- [23] Schäfer, L.: Analyse und Gestaltung fertigungstechnischer Prozessketten – Konzept zur Datenbasierten Ermittlung qualitätswirksamer Einfluss-Ursache-Wirkungszusammenhänge und zur Ableitung von Maßnahmen zur Prozesssicherung, FBK Produktionstechnische Berichte Universität Kaiserslautern, Band 45, (2003)

1.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

- a) Arbeiten, die in Publikationsorganen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung zum Zeitpunkt der Antragstellung erschienen oder endgültig angenommen sind, und Buchveröffentlichungen:**
- [24] Albers, A.; Lanza, G.; Turki, T.; Hoppen, P.; Troll, D.; Kippenbrock, K.: Validierung von Mikrokomponenten und -systemen durch Simulationen und Prüfstandsversuche. Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, 11.-12. Oktober 2011, Karlsruhe, Deutschland, KIT Scientific Reports 7591, ISBN 978-3-86644-747-9, S. 97-104
 - [25] Lanza, G.; Albers, A.; Kippenbrock, K.; Börsting, P.: Support for Micro-Tolerancing through the Feedback of Existing Quality-Related Data to Product Developers. 11th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, 23rd May to 27th May 2011, Como, Italy, Verlag Sieca Repro, S. 542-545
 - [26] Schlipf, M.; Bathurst, S.; Kippenbrock, K.; Kim, S-G.; Lanza, G.: A structured approach to integrate MEMS and Precision Engineering methods. in: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Jahrgang 2011, Heft/Band 3, S. 236-247
 - [27] Lanza, G.; Viering, B.; Kippenbrock, K.; Stockey, S.: Messunsicherheit als bedeutende Größe in der Mikroproduktion. in: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 100 (2010), Heft/Band 11/12, Verlag Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 875-879
 - [28] Lanza, G.; Kippenbrock, K.; Kuhn, G.: Process Capability Indices for the Evaluation of Micro-Manufacturing Processes. 7th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 23 - 25 June 2010, Capri, Italy, Band , Conference Proceedings, ISBN 978-88-95028-65-1, S.1-4
 - [29] Schlipf M.: Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile. Dissertation Universität Karlsruhe (TH), 2009, ISBN 978-3-8322-8058-1
 - [30] Lanza, G.; Schlipf, M.; Kippenbrock, K.: Innovative quality assurance strategies for the characterization of dimensionalfeatures of micromechanical components. 4M/ICOMM 2009 - The Global Conference on Micro Manufacture, 23.-25. September 2009, Forschungszentrum Karlsruhe, Deutschland, Band Proceedings, S. 187-190
 - [31] Lanza, G.; Schlipf, M.; Kippenbrock, K.: Mikroprozesskettengerechte Qualitätssicherung: statistische Prozessregelung und Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile. 4. Kolloquium Mikroproduktion, 28.-29. Oktober 2009, Bremen, Deutschland, Verlag BIAS Verlag, Herausgeber/Veranstalter F. Vollertsen, S. Büttgenbach, O. Kraft, W. Michaeli, Tagungsband, ISBN 978-3-933762-32-0, S. 133-142

b) Andere Veröffentlichungen

- entfällt -

c) Patente, gegliedert nach angemeldet und erteilt.

- entfällt –

1.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wurde seit Anfang Januar 2009 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

1.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1 Lanza, Gisela; Prof. Dr.-Ing.; Bereichsleiter	Wirtschaftsingenieurwesen	KIT / wbk	8	
	2 Peter, Katrin; Dipl.-Ing.; Oberingenieurin	Maschinenbau	KIT / wbk	4	
Nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	3 Raab, Manfred Techniker		KIT / wbk	19,75	
beantragte Ergänzungsausstattung					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	4 Kippenbrock, Kyle; Dipl.-Ing.	Maschinenbau	KIT / wbk	39,5	TVL E13
	5 N.N.	Maschinenbau	KIT / wbk	19,75	SH
Nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	6 Simon, Klaus Techniker		KIT / wbk	19,75	TVL E9

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

Grundausstattung:

(1) Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza leitet den Forschungsbereich Produktionssysteme am Institut für Produktionstechnik (wbk) und hat die wissenschaftliche Federführung des Transferprojektes inne. Sie gewährleistet mit Ihrem Fachwissen im Bereich der Qualitätsprognose von Fertigungsprozessen die weiterführende Planung und Entwicklung von mikrospezifischen Qualitätssicherungsmethoden.

(2) Dipl.-Ing. Kathrin Peter

Dipl.-Ing. Kathrin Peter ist Oberingenieurin im Bereich Produktionssysteme des Instituts für Produktionstechnik (wbk) und unterhält sie Kontakte zu anderen Teilprojektleitern und Institutionen des Sonderforschungsbereichs zwecks Förderung der kooperativen Zusammenarbeit.

(3) Manfred Raab

Herr Manfred Raab unterstützt als Techniker die messtechnischen Aufgaben in Bezug auf konstruktive Ergänzungen für Spannmittel im Teilprojekt.

Ergänzungsausstattung:

(4) Dipl.-Ing. Kyle Kippenbrock

Dipl.-Ing. Kyle Kippenbrock war als wissenschaftlicher Mitarbeiter für die Planung, Koordination und Durchführung der Forschungsarbeiten im Teilprojekt C4 sowie für die Kooperation mit den anderen SFB-Teilprojekten verantwortlich.

(5) N.N. (studentische Hilfskraft)

Aufgabe der studentischen Hilfskraft (N.N.) ist die Unterstützung bei der statistischen Auswertung des Datenmaterials und bei der Durchführung organisatorischer Aufgaben. Ebenso soll er einen eng abgegrenzten Teil der Implementierungsaufgaben übernehmen.

(6) Klaus Simon

Klaus Simon bringt seine langjährige Erfahrung in der Messtechnik mit ein und unterstützt die Erweiterungen der Messeinrichtungen sowie die Optimierung der Messabläufe.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt C5

5.1.1 Titel

2C-MicroPIM – 2-Komponenten-Pulverspritzgießen in Mikrodimensionen

2C-MicroPIM- 2-components powder injection moulding in micro dimensions

5.1.2 Projektleitung

Piotter, Volker, Dr.-Ing., geb. 24.06.1964, deutsch

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT)

Postfach 3640

76021 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-26463

Telefax: 0721 / 608-23956

E-Mail: volker.pirotter@kit.edu

Ritzhaupt-Kleissl, Hans-Joachim, Dr.-Ing., geb. 10.07.1946, deutsch

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT)

Postfach 3640

76021 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-23727

Telefax: 0721 / 608-22095

E-Mail: hans-joachim.ritzhaupt-kleissl@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

5.2.1.1 Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Kernaufgabe des Teilprojektes C5 während der letzten Projektphase war die Erforschung der wissenschaftlichen Grundlagen des Zweikomponenten-Pulverspritzgießprozesses in Mikrodimensionen mit dem Ziel, durch einen Urformprozess sowohl feste als auch bewegliche Verbindungen zweier unterschiedlicher Werkstoffe in einem einzigen Mikrobauteil reproduzierbar zu realisieren. Die einzelnen Fragestellungen erstreckten sich auf die Themenbereiche Werkzeugtechnik, Prozessentwicklung, Materialauswahl und –anpassung einschließlich der dazugehörenden Formmassenentwicklung.

Der Kenntnisstand zum 2C-MicroPIM bei der letzten Antragstellung umfasste im Wesentlichen sowohl die eigenen Arbeiten am Institut für angewandte Materialien – Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT; ehemals Institut für Materialforschung III) als auch Publikationen der Fraunhofer Institute IFAM in Bremen und IKTS in Dresden. Wenngleich die Arbeiten am IKTS eigentlich im höherskaligen Maßstab durchgeführt wurden, sind sie hinsichtlich Materialien und Prozesse auch für die hier dargestellten Arbeiten im Mikrobereich relevant.

Zum Zeitpunkt der letzten Antragsphase war am Beispiel der Welle-Nabe-Verbindung gezeigt worden, dass mittels 2C-MicroPIM feste Verbindungen hergestellt werden können.

Es konnte außerdem gezeigt werden, dass auch bewegliche Verbindungen mit diesem Fertigungsverfahren prinzipiell herstellbar sind. Seinerzeit war es jedoch bei der Generierung beweglicher Verbindungen erforderlich, die Bauteile bis zu einer Temperatur von 1300°C anzusintern und in einem Zwischenschritt freizudrehen. Ein erneutes Sintern bis zu einer Maximaltemperatur von 1550°C führte dazu, dass Welle und Zahnrad in den meisten Fällen zusammensinterten. Ein Festsintern konnte bedingt unterbunden werden, indem der Sintervorgang ab Temperaturen oberhalb 1300°C mehrfach unterbrochen wurde. Durch die Kombination von mechanischen Relativbewegungen (Freidrehen) und schrittweisem Weitersintern konnte die Beweglichkeit der Welle-Nabe-Verbindung in begrenztem Umfang (bis ca. 1500 °C) aufrechterhalten werden.

Unabhängig von der Art des Verbundes zeigten alle in der 3. Förderphase eingesetzten Al_2O_3 -Feedstocksysteme eine ausgesprochene Tendenz zur Bildung von Hohlräumen. Für die Berichtsphase etablierte sich daher die Herausforderung, die Aluminiumoxid-Feedstocks dahingehend zu optimieren, dass Ent-

mischungserscheinungen im Feedstock unterbunden oder zumindest weitestgehend reduziert werden können und die bisherigen Hohlräume nicht mehr auftreten.

Eine weitere Aufgabe lag in der verbesserten Ausführung der Einspritzsektion des 2K-Werkzeuges: wie die Versuche in der 3. Förderphase zeigten, kam es sehr häufig zu Durchbrüchen der zweiten Formmasse in die Anschnitttaschen der Mikrozahnräder. Dadurch konnte zwar ein zusätzlicher ungewollter Formschluss erreicht werden, eine Rotationsfähigkeit des Zahnrades hingegen völlig ausgeschlossen wurde.

Zusammenfassend ergaben die Arbeiten in der dritten Förderphase, dass noch eine Reihe material- und prozesstechnischer Fragen zu klären gewesen sind, damit der 2C-MicroPIM-Prozess als zuverlässiges Fertigungsverfahren, insbesondere für die Herstellung beweglicher Verbindungen zur Verfügung steht. Ergänzend zum Kenntnisstand von 2008 sollten weitergehende Untersuchungen zur damals eingeschränkten Realisierbarkeit beweglicher Verbindungen durchgeführt, die Ursachen hierfür ergründet und entsprechende Maßnahmen zur Material- und/oder Prozessoptimierung abgeleitet werden.

5.2.1.2 Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

- AP1: Prozessoptimierung des 2C-MicroPIM zur Erhöhung der Verbundfestigkeit einer festen Verbindung

In der 3. Förderphase (2006-2008) wurden feste Verbindungen reproduzierbar hergestellt. In manchen der hergestellten Bauteile wurden jedoch Risse an den Zahnrädern festgestellt, die darauf schließen lassen, dass die Materialanpassung für Zahnräder und Welle noch nicht ausreichend war. Im Zuge einer ganzheitlichen Betrachtung beschränken sich die in diesem AP vorgestellten Arbeiten und Ergebnisse nicht nur auf die Optimierung der Verbundfestigkeit, sondern erstrecken sich auf eine Optimierung der Bauteilqualitäten insgesamt. Da in der Vergangenheit mit dem ZrO_2 -Pulver Tosoh TZ-3YS-E gute Bauteilqualitäten erzielt wurden, wurde dieses Pulver zunächst auch für TP C5 bevorzugt. In Wechselwirkung mit der Welle kommt es vermutlich aber zur Bildung von Spannungen, welche die beobachteten Risse verursacht haben könnten (Abb. 1, links). Mithilfe der Dilatometrie wurden verschiedene Al_2O_3 und ZrO_2 -Pulver hinsichtlich ihres Sinterverhaltens charakterisiert. Als Ergebnis wurde eine Kombination eruiert, bei der die untersuchten Pulver hinsichtlich der Starttemperatur des Sinterprozesses und der Sinterkinetik weitestgehend identisch sind. Die Berücksichtigung der Sintertemperatur und der Sinterkinetik und die daraus resultierende Materialoptimierung führte zur Feststellung, dass die Zahnräder bei festen Welle-Nabe-Verbindungen im gesinterten Zustand nunmehr rissfrei vorliegen (Abb. 1, rechts).

Die Zusammensetzungen der ursprünglichen und modifizierten Formmassen für feste Verbindungen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die optimierten Prozessparameter für die Herstellung fester Verbindungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

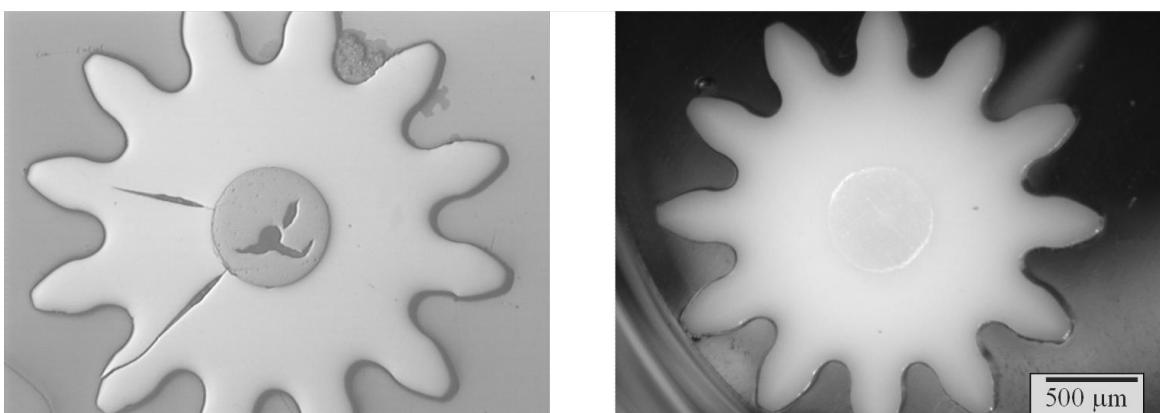


Abb. 1: Querschliffe gesinterter Welle-Nabe-Verbindungen. Links: vor der Optimierung, rechts: nach der Optimierung der Materialkombination.

Tabelle 1: Zusammensetzungen der ursprünglichen und modifizierten Formmassen für die Herstellung fester Verbindungen

Kombination 1:

Pulver	Pulvertyp; kommerzielle Bezeichnung	Pulverfüllgrad (Vol.%)	Partikelgröße (µm)	BET (m ² /g)	Binderkomponenten
ZrO ₂	Tosoh TZ-3YS-E	50.5	0.6	6.6	LDPE, Paraffin, Stearinsäure
Al ₂ O ₃	Almatis CT 3000 SG	47.5	0.7	7.3	LDPE, Paraffin, Stearinsäure

Kombination 2:

Pulver	Pulvertyp; kommerzielle Bezeichnung	Pulverfüllgrad (Vol.%)	Partikelgröße (µm)	BET (m ² /g)	Binderkomponenten
ZrO ₂	Unitec PYT05.0-005H	55	1.1	4.9	LDPE, Paraffin, Stearinsäure
Al ₂ O ₃	Almatis CT 3000 SG	55	0.7	7.3	LDPE, Paraffin, Stearinsäure

Bemerkungen: LDPE: Low density polyethylene

BET: Spezifische Pulveroberfläche

Tabelle 2: optimierte Prozessparameter (Prozessfenster) für die Herstellung fester Verbindungen

Spritzen:

Komponente	Werkzeugtemperatur	Temperatur Heißkanal	Einspritzdruck	Einspritzgeschwindigkeit	Nachdruck
Zahnrad (ZrO ₂)	45°C (isothermal)	148°C / 152°C	~ 1000 bar	35 mm/s	~ 550 bar
Welle (Al ₂ O ₃)	45°C (isothermal)	148°C / 152°C	~ 550 bar	30 mm/s	~ 130 bar

Flüssig Entbinden:

Entbinderungsmedium	Temperatur	Entbinderungsdauer
n-Hexan	40°C – 50°C	4-6 h

Thermisch Entbinden + Sintern:

	Temperatur	Aufheizrate	Haltezeit
Aufheizen	RT → 180°C	0,2 – 0,5 K/min	
Isotherme Phase	180°C		2 h
Aufheizen	180°C → 250°C	0,2 – 0,5 K/min	
Isotherme Phase	250°C		2 h
Aufheizen	250°C → 500°C	0,5 – 2,0 K/min	
Isotherme Phase	500°C		2 h
Aufheizen	500°C → 1300°C	5 K/min	
Aufheizen	1300°C → 1550°C – 1600°C	2,5 K/min	
Isotherme Phase	1550°C (1600°C)		2 h
Abkühlen	1550°C (1600°C) → 70°C	-5 K/min	

An Querschliffen fester Welle-Nabe-Verbindungen wurden Mikrosondenanalysen durchgeführt (Beispiele in Abb. 2). Diese sollten Aufschluss darüber geben, ob die Grenzfläche zwischen Al₂O₃ und ZrO₂ hinreichend gut ausgebildet ist, so dass Diffusionsprozesse zwischen den Keramiksystemen ablaufen können. Da Diffusionsprozesse zeitabhängig sind, wurden abweichend von den o.g. Sinterparametern Versuche mit deutlich höheren Haltezeiten (12,5 bis 50 h, bei T_{max} = 1550 – 1600°C) durchgeführt. Da hier nur die diffusionsbasierten Elementverteilungen untersucht wurden, wurde ein "Übersintern" der Proben aufgrund der hohen Haltezeiten in Kauf genommen.

Im Zahnrad aus ZrO₂ wurden Al₂O₃-Konzentrationen bis maximal 0,29 Gew.% nachgewiesen. Das entspricht in etwa den Gehalten, die laut Herstellerangaben im Ausgangspulver enthalten sein können. Somit sind diese Messwerte für die Interpretation von etwaigen Diffusionsvorgängen nicht verwertbar. Bei Abständen von mindestens 5 µm zu der Grenzfläche wurden in der Welle aus Al₂O₃ Y₂O₃-Konzentrationen bis maximal 0,25 Gew.% und ZrO₂-Konzentrationen ≤ 0,1 Gew.% gemessen. Dies bestätigt das Auftreten von Diffusion und bedeutet, dass, obwohl dem Gesamtsystem deutlich mehr ZrO₂ als Y₂O₃ zur Verfügung steht, bevorzugt Y₂O₃ in die Welle aus Y₂O₃ Al₂O₃ hinein diffundiert. Aufgrund der gleichen Ladungszahl von Y³⁺ und Al³⁺ ist dieses Diffusionsverhalten durchaus nachvollziehbar. Aus der nachgewiesenen Diffusion von Y₂O₃ in die Welle aus Al₂O₃ kann auf eine dichte Grenzfläche geschlossen werden, die für Diffusionsprozesse Voraus-

setzung ist. Es kann daher von einer für dieses System sehr kompakten Verbundhaftung ausgegangen werden. Weitere Arbeiten konzentrierten sich auf die Weiterentwicklung der Feedstocksysteme mit dem Ziel, die Bauteilqualität der Welle zu verbessern und das Auftreten größerer Hohlräume zu reduzieren (s. Abschnitt Optimierung von Al_2O_3 -Feedstocks für die Formgebung der Welle).

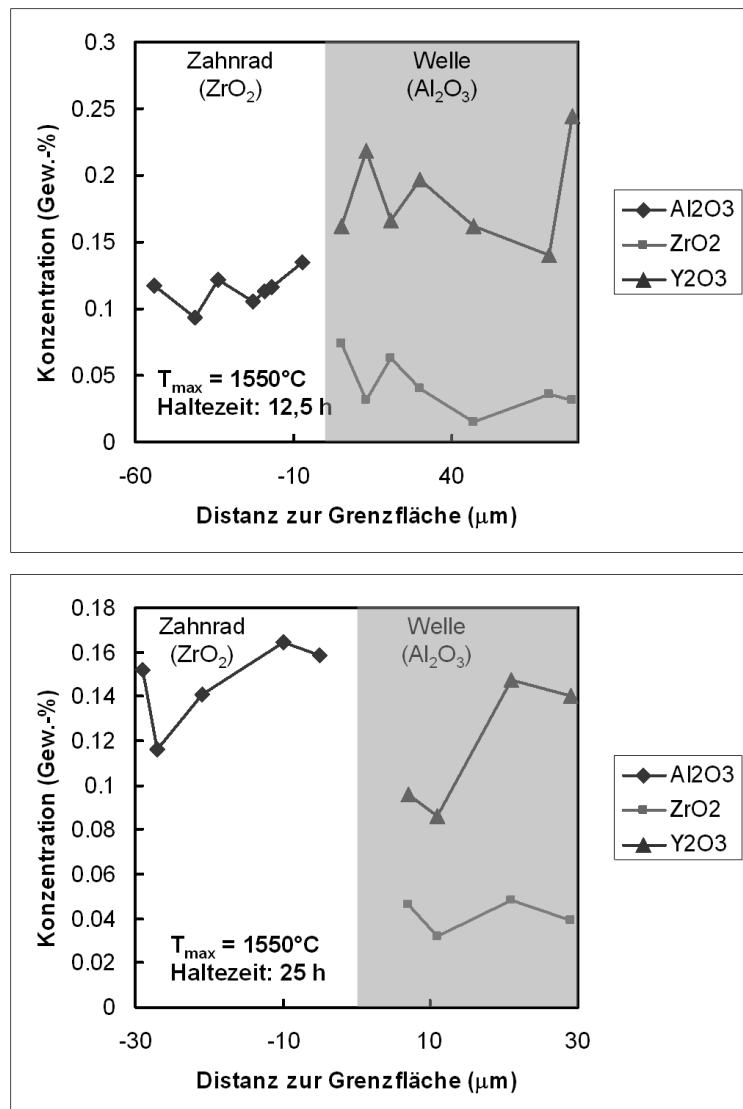


Abb. 2. Konzentrationen von Al_2O_3 im Zahnrad (aus ZrO_2) sowie Y_2O_3 und ZrO_2 in der Welle (aus Al_2O_3) in Abhängigkeit von der Distanz zur Grenzfläche.

- AP2: Prozessoptimierung des 2C-MicroPIM zur Optimierung einer beweglichen Welle-Nabe-Verbindung und zur Verbesserung deren tribologischer Eigenschaften

Mit dem modifizierten Angussystem wurden deutliche Verbesserungen in der Herstellung beweglicher Verbindungen erzielt. Daneben gab es aber auch Anpassungen bezüglich der Zusammensetzungen der Formmassen für Zahnrad und Welle. So wurde der Feedstock für die Welle dahingehend verändert, dass ein Aluminiumoxid verwendet wurde (Taimei TM-DAR), welches bei etwas niedrigeren Temperaturen sintert. Somit ist es möglich, bewegliche Verbindungen bis zu einer maximalen Sintertemperatur von 1460°C herzustellen. Darüber hinaus resultiert aus einer weiteren Zunahme der Temperatur eine Reduzierung der Anzahl der Bauteile mit drehbaren Zahnrädern (s. Tabelle 3). Mithilfe rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen wurde gezeigt, dass im untersuchten Temperaturintervall (1460 – 1500 °C) die beiden Komponenten partiell zusammensintern. Dies bedeutet, dass sich bewegliche Verbindungen ab 1470°C aufwärts trotz genügender Spaltbreite zwischen beiden Komponenten nur noch vereinzelt und ab 1490°C überhaupt nicht mehr generieren lassen.

Tabelle 3: Anteil leicht und schwer beweglicher Verbindungen in Abhängigkeit von der maximalen Sinter-temperatur

T _{max} (°C)	1460	1470	1480	1490	1500
Anteil leicht beweglicher Verbindungen (%)	90	30	10	0	0
Anteil schwer beweglicher Verbindungen (%)	10	10	0	0	0

Die Zusammensetzungen der ursprünglichen und modifizierten Formmassen für bewegliche Verbindungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Zusammensetzungen der ursprünglichen und modifizierten Formmassen für die Herstellung beweglicher Verbindungen

Kombination 1:

Pulver	Pulvertyp; kommerzielle Bezeichnung	Pulverfüllgrad (Vol.%)	Partikelgröße (µm)	BET (m ² /g)	Binderkomponenten
ZrO ₂	Unitec PYT05.0-005H	55	1.1	4.9	LDPE, Paraffin, Stearin-säure
Al ₂ O ₃	Baikoffski-Malakoff UFX-DBM	45	0.25	12.2	LDPE, Paraffin, Stearin-säure

Kombination 2:

Pulver	Pulvertyp; kommerzielle Bezeichnung	Pulverfüllgrad (Vol.%)	Partikelgröße (µm)	BET (m ² /g)	Binderkomponenten
ZrO ₂	Unitec PYT05.0-005H	55	1.1	4.9	LDPE, Paraffin, Stearin-säure
Al ₂ O ₃	Taimei TM-DAR	50	0.18	12.0	LDPE, Paraffin, Stearin-säure

Bemerkungen: LDPE: Low density polyethylene

BET: Spezifische Pulveroberfläche

Die Sintertemperatur des in der modifizierten Kombination verwendeten Al₂O₃-Pulvers liegt somit näher an den für ZrO₂ typischen Sintertemperaturen. Ein weiterer Vorteil gegenüber der bisherigen Al₂O₃-Formmasse ist der höhere Pulverfüllgrad. Abbildung 3 zeigt einen Querschliff einer gesinterten Welle-Nabe-Verbindung im Bereich des Spaltes zwischen beiden Komponenten.

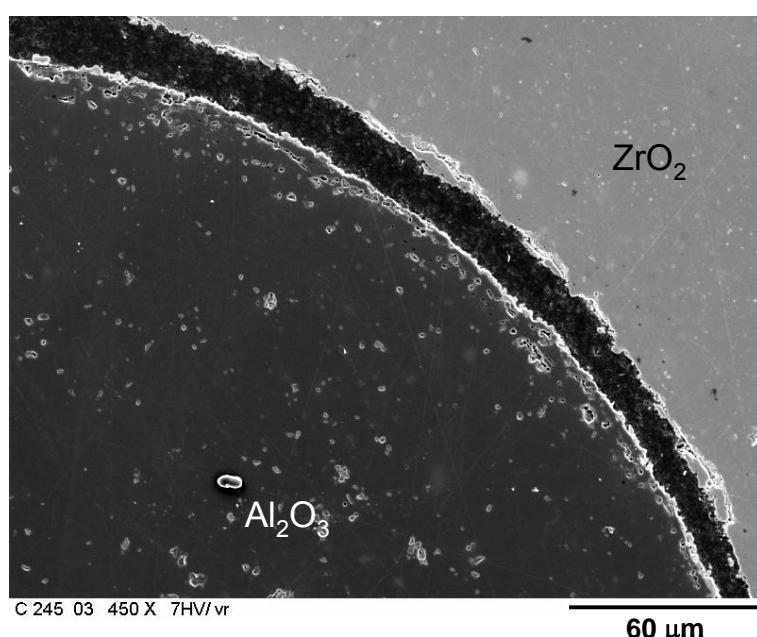


Abb. 3: REM-Aufnahme einer gesinterten, beweglichen Welle-Nabe-Verbindung

Die optimierten Prozessparameter für die Herstellung beweglicher Verbindungen sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die Prozessparameter unterscheiden sich gegenüber den Parametern zur Herstellung fester Verbindungen nur hinsichtlich der Sinterparameter.

Tabelle 5: optimierte Prozessparameter (Prozessfenster) für die Herstellung beweglicher Verbindungen

Spritzgießen:

Komponente	Werkzeugtemperatur	Temperatur Heißkanal	Einspritzdruck	Einspritzgeschwindigkeit	Nachdruck
Zahnrad (ZrO_2)	45°C (isothermal)	148°C / 152°C	~ 1000 bar	35 mm/s	~ 550 bar
Welle (Al_2O_3)	45°C (isothermal)	148°C / 152°C	~ 550 bar	30 mm/s	~ 130 bar

Flüssig Entbinden:

Entbinderungsmedium	Temperatur	Entbinderungsdauer
n-Hexan	40°C – 50°C	4-6 h

Thermisch Entbinden + Sintern:

	Temperatur	Aufheizrate	Haltezeit
Aufheizen	RT → 180°C	0,2 – 0,5 K/min	
Isotherme Phase	180°C		2 h
Aufheizen	180°C → 250°C	0,2 – 0,5 K/min	
Isotherme Phase	250°C		2 h
Aufheizen	250°C → 500°C	0,5 – 2,0 K/min	
Isotherme Phase	500°C		1 h
Aufheizen	500°C → 1450°C – 1460°C	5 K/min	
Isotherme Phase	1450°C (1460°C)		
Abkühlen	1450°C (1460°C) → 70°C	-5 K/min	

Weitere Arbeiten konzentrierten sich auf die Weiterentwicklung der Feedstocksysteme mit dem Ziel die Bauteilqualität der Welle zu verbessern und das Auftreten größerer Hohlräume zu reduzieren (s. nachfolgendes Kapitel). Die tribologischen Untersuchungen, die von TP D3 an geeigneten Testkörpern durchgeführt wurden, zeigten, dass die auf Basis der Prozessoptimierung hergestellten Proben aus Al_2O_3 in Paarung mit einer Al_2O_3 -Kugel eine um ca. 20% niedrigere Reibungszahl als das kommerzielle Al_2O_3 -Referenzmaterial bei vergleichbarem linearen Verschleiß aufweisen. Bei Paarung des Testkörpers aus ZrO_2 mit einer Al_2O_3 -Kugel liegt die quasistationäre Reibungszahl im Vergleich zum kommerziellen 3Y-TZP Referenzmaterial ca. 40% niedriger. Die resultierenden tribologischen Eigenschaften können daher positiv bewertet werden.

- AP3: Modifikation der Werkzeugtechnik für das 2K-Mikropulverspritzgießen

2K-Bauteile, die mit der in der dritten Förderphase realisierten Werkzeugkonfiguration gefertigt wurden, zeigten im Bereich der Welle Deformationen bis hin zu unerwünschten Fließvorgängen des Feedstocks. Dabei strömt bei der Abformung der zweiten Komponente (Welle) der Aluminiumoxid-Feedstock im Bereich der Angüsse des Zahnrads nach außen und füllt dabei die Angusstaschen des Zahnrades. Ein drastisches Beispiel ist in Abb. 4 (links) dargestellt. In weniger gravierenden Fällen, etwa bei geringerem Nachdruck, zeigten sich zumindest Deformationen in diesem Bereich (Abb. 4 rechts). Diese Fehler waren Ursache für die in der vorletzten Förderphase nur eingeschränkt realisierbaren beweglichen Verbindungen. In der Berichtsphase musste daher das Werkzeug entsprechend modifiziert werden (s. AP3).

Auf Grundlage der oben beschriebenen Probleme wurde das 2K-Spritzgießwerkzeug modifiziert. Wichtigstes Ziel war es, Schmelzdurchbrüche zu verhindern, wozu sowohl die Anschnittaschen weniger tief als auch die Wandstärke zwischen Wellenkanal und Anschnittasche signifikant zu vergrößern waren (Abb. 5). Um dieses zu erreichen verfügt die neue Werkzeugkonstruktion anstelle zweier C-bogenförmiger Angüsse über zwei punktförmige Angüsse. Diese sind im Vergleich zur bisherigen Konstruktion weiter nach außen gesetzt worden. Außerdem ergeben sich durch den geringeren Querschnitt niedrigere Abreißkräfte und somit weniger ausgeprägte Angussmarkierungen. Letztere wiederum erlaubten es, die Vertiefung der Angusstaschen zu reduzieren.

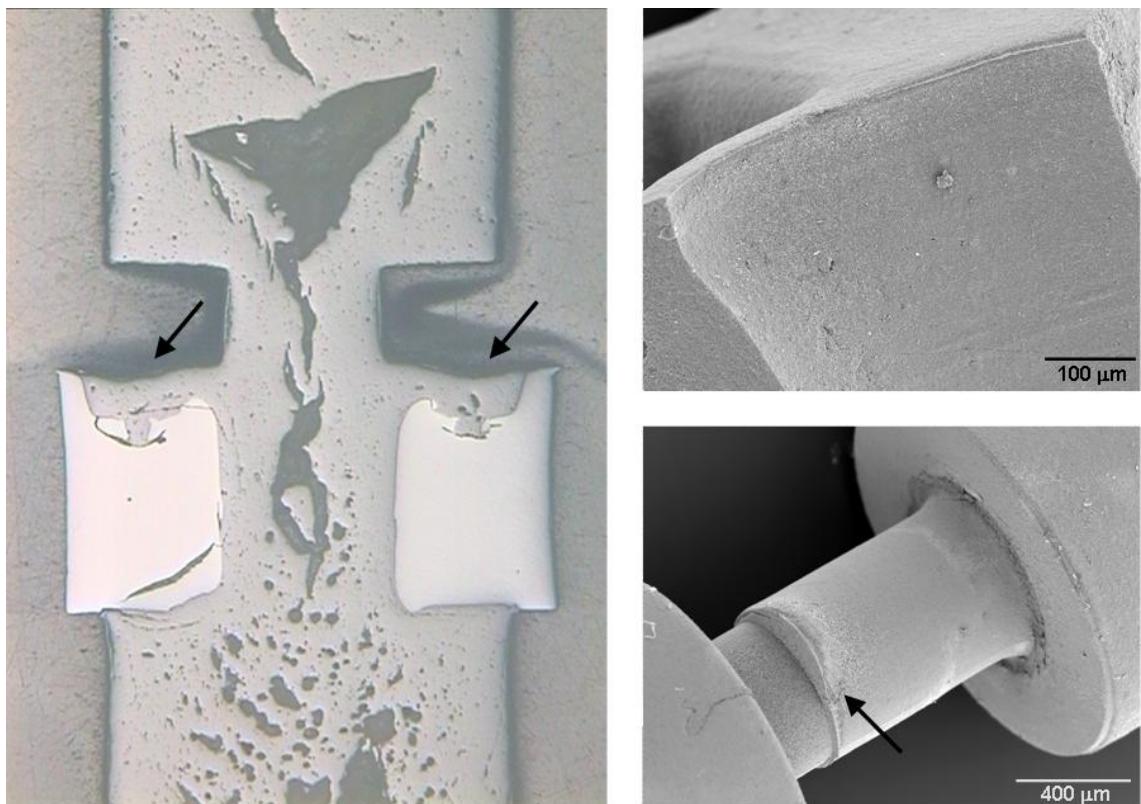


Abb. 4: Links: Querschliff einer gesinterten Welle-Nabe-Verbindung aus Al_2O_3 (grau) und ZrO_2 (weiß). Die Aufnahme zeigt die Füllung der Angusstaschen des Zahnradts mit Al_2O_3 (Pfeile) und die Hohlräume in der Welle. Rechts: Deformationserscheinungen am Zahnrad (rechts oben) und an der Welle (rechts unten).

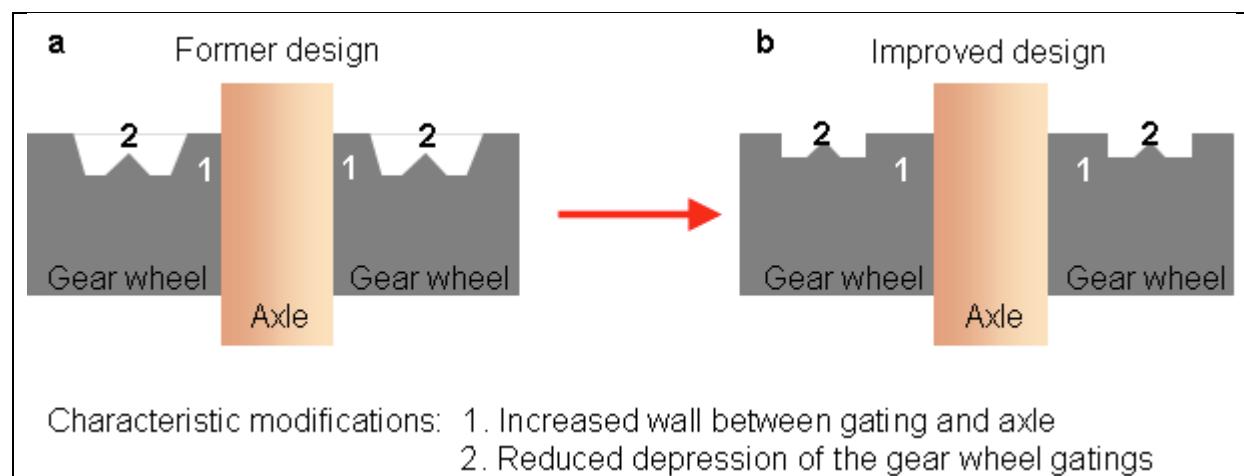


Abb. 5: Schematische Darstellung der Modifikationen am 2K-Werkzeug: Erhöhung der Wandstärke zum Wellenkanal (1) und Verringerung der Tiefe der Anschnitttaschen (2).

Zur Auslegung des modifizierten Angussystems und vor allem der Anschnittdurchmesser wurden Simulationsrechnungen mit verschiedenen Ausführungen vorgenommen. Ziel war es, eine minimale Scherbelastung des ZrO_2 -Feedstocks beim Einspritzen in die Zahnradkavität zu erreichen, um etwaige Entmischungerscheinungen auf möglichst niedrigem Niveau zu halten (Abb. 6).

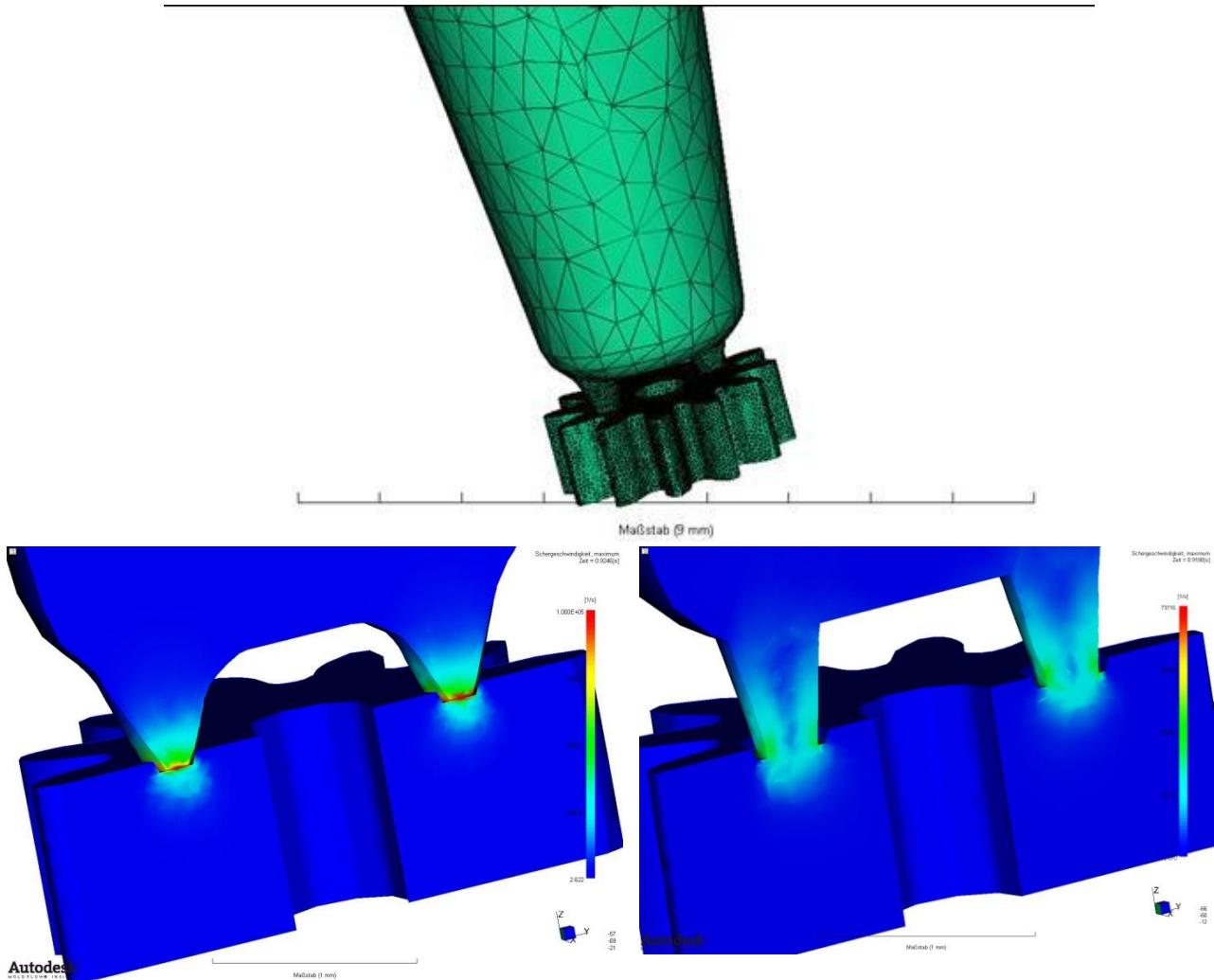


Abb. 6: Simulation der Schergeschwindigkeitsverteilung beim Einspritzen der Zahnrad-Komponente (ZrO_2 -Feedstock), FEM-Netzwerk (oben), minimaler Anschnittdurchmesser 0,2 mm (links) bzw. 0,3 mm (rechts). Es ist deutlich zu erkennen, dass der größere Anschnitt zu geringeren Schergeschwindigkeiten führt.

Die oben beschriebenen Maßnahmen führten zu einer verbesserten Wandstärke zwischen dem Wellenkanal und den Angussvertiefungen des Zahnrads. Ein Durchbruch dieser Wand findet beim Einspritzen des Al_2O_3 -Feedstocks zur Abformung der Welle nicht mehr statt. Bewegliche Verbindungen konnten mit dem überarbeiteten Spritzgießwerkzeug ohne zusätzliche, manuelle Prozessschritte (Ansintern und schrittweises Weitersintern in Kombination mit Freidrehen nach jedem Sinterschritt) hergestellt werden.

- Optimierung von Al_2O_3 -Feedstocks für die Formgebung der Welle

Sowohl bei der Erzeugung fester als auch beweglicher Verbindungen wurden in den Wellen der 2K-Bauteile neben einer höheren Porosität oft größere Hohlräume festgestellt (Abb. 4, links). Um die Qualität der Wellen entscheidend zu verbessern, musste zunächst die Ursache hierfür festgestellt werden. Untersuchungen an Grün-, Braun- und gesinterten Teilen hatten gezeigt, dass diese Hohlräume erstmals nach dem thermischen Entbindern auftreten. Es ist somit davon auszugehen, dass eine inhomogene Verteilung von Pulver und Binderkomponenten in den Wellen vorgelegen hat und die Pulverkonzentration lokal so gering war, dass während des Entbinderns die Hohlräume gebildet wurden. Im nächsten Schritt wurde ermittelt, ob eine Materialabhängigkeit der inhomogenen Pulver-Binder-Verteilung vorliegt. Hierzu wurden einkomponentige Welle-Nabe-Verbindungen aus entweder reinem Al_2O_3 oder ZrO_2 hergestellt. Dabei kamen verschiedene Al_2O_3 - und ZrO_2 -Pulver zum Einsatz, wobei die Bauteile aus Zirkoniumoxid durchweg eine wesentlich bessere Qualität als die aus Aluminiumoxid (Abb. 7) zeigten. Es war somit anzunehmen, dass die Bauteilgeometrien als

Ursache für die Hohlräume in der Welle ausgeschlossen werden können und dass diese Fehler materialspezifisch sein müssen.

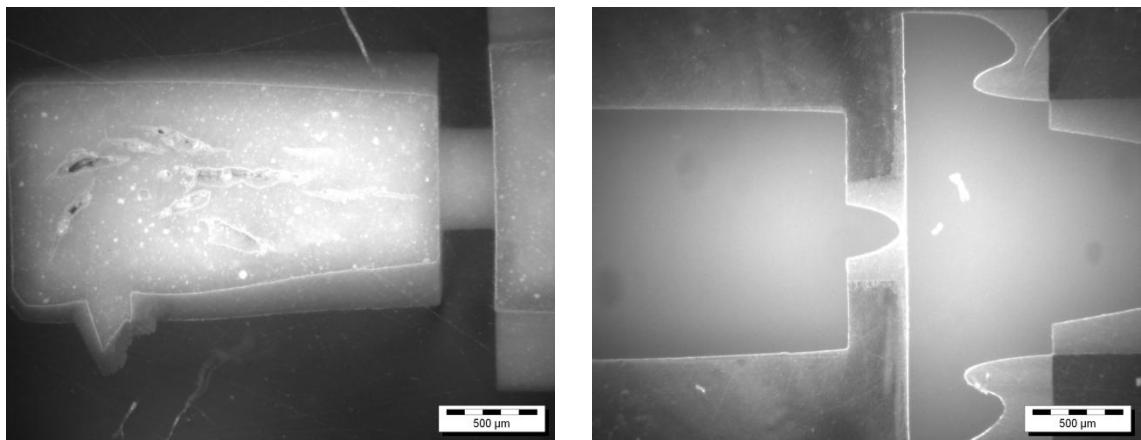


Abb. 7: Querschliffe gesinterter, einkomponentiger Welle-Nabe-Verbindungen aus Al_2O_3 (links) und ZrO_2 (rechts).

Zielsetzung in der Berichtsphase war daher die Vermeidung von materialbedingten Entmischungen. Um, ausgehend von der bisher genutzten Feedstockzusammensetzung, Entmischungen, bzw. Pulver-Binder-Segregation vorzubeugen, muss die „Beweglichkeit“ der Binderkomponenten eingeschränkt werden. Hierzu wurden zwei Strategien verfolgt. Zum einen wurden Versuche durchgeführt, bei dem neben Stearinsäure TEC, welches als Netzwerkbildner wirkt, als weiteres Additiv zugesetzt wurde. Für diese Untersuchungen wurden sowohl der TEC-Gehalt sowie auch die Stearinsäurekonzentration (nur für das Pulver RC UFX-DBM) systematisch variiert. Zum Zweiten wurden unterschiedliche Typen von Polyethylen untersucht. Neben dem bisherigen Low density PE (LDPE) wurde ein medium density PE und zwei high density PE-Typen untersucht und miteinander verglichen. Als Al_2O_3 -Pulver wurden die Typen CT 3000 SG, TM-DAR und RC UFX-DBM verwendet. Bei den Untersuchungen zum Einfluss des TEC-Gehalts wurden jedoch nur TM-DAR und RC UFX-DBM eingesetzt.

Bei Untersuchungen mit TEC als zusätzlichem Dispergator konnten Einflüsse auf das Drehmoment während des Compundierens und auf die scherratenabhängigen Viskositäten nur eingeschränkt festgestellt werden. Die gemessenen Drehmomente steigen zunächst mit zunehmender TEC-Konzentration und gleichbleibendem Gehalt an Stearinsäure ($3,3 \text{ mg/m}^2$) an; ab einer gewissen Konzentration nehmen die Drehmomente aber deutlich ab und erreichen Werte, die unterhalb den Drehmomenten von Feedstocks ohne TEC-Zugabe lagen. Offensichtlich tritt ab einer gewissen Zugabe eine Übersättigung der Formmasse an TEC auf, und das überschüssige TEC wirkt als Schmiermittel. Wird der TEC-Gehalt dagegen konstant gehalten und die Stearinsäurekonzentration variiert, so lassen sich Auswirkungen auf das Drehmoment nur bei sehr geringen Stearinsäurekonzentrationen feststellen. Für den technischen Maßstab ist dies insofern problematisch, da sich sehr geringe Konzentrationen an Stearinsäure bei der Feedstockherstellung nur schwer oder kaum ohne größere Schwankungen dosieren lassen. Die Scher-Viskositäten nehmen nur bei hohen TEC-Gehalten bei konstanter Stearinsäurekonzentration ($3,3 \text{ mg/m}^2$) nennenswert ab. In einem Übergangsbereich zeigt sich diese Abnahme erst bei hohen Scherraten, während die Viskosität bei noch höheren TEC-Konzentrationen bei allen gemessenen Scherraten durchgehend niedrigere Werte aufweist. Im Hinblick auf eine spätere potentielle Übertragung der Ergebnisse auf die Abformung der Welle wurden auch die Eigenschaften gesinterter Probekörper untersucht. Die gemessenen Sinterdichten als Funktion der zugrunde liegenden TEC-Gehalte (Stearinsäurekonzentration lag konstant bei $3,3 \text{ mg/m}^2$) zeigten bei Verwendung des Pulvers TM-DAR nahezu konstante Werte. Unter Verwendung des Pulvers RC UFX-DBM zeigt sich bei mittleren TEC-Gehalten ebenfalls keine auffallende Tendenz. Bei hohen TEC-Konzentrationen und bei Verwendung eines TEC-freien Feedstocks wurden jedoch deutlich geringere Sinterdichten festgestellt. Hierbei sind zudem die hohen Standardabweichungen auffällig, die darauf hindeuten, dass sich für diese Feedstockzusammensetzungen keine ausreichende Prozessstabilität erzielen lässt.

Da die Untersuchungen an TEC-haltigen Feedstocks im Hinblick auf die Nutzung für die Abformung der Welle unbefriedigend waren, wurden zusätzliche Versuche unter Verwendung unterschiedlicher Polyethylen-Typen vorgenommen. Polyethylenen können sich u.a. hinsichtlich Dichte, Molekulargewicht und Verzweigungsgrad voneinander unterscheiden. Diese Unterschiede machen sich auch hinsichtlich der jeweiligen Schmelztemperaturen und rheologischen Eigenschaften bemerkbar. Die oben angesprochenen Segregationserscheinungen, könnten je nach eingesetztem PE-Typ unterschiedlich ausgeprägt sein, bzw. im Idealfall

ganz unterdrückt werden. Es wurden Feedstocks für die Pulver CT 3000 SG, RC UFX-DBM und TM-DAR compoudiert und untersucht. Hieraus spritzgegossene Probekörper (Triboscheiben) wurden gesintert und anschließend bezüglich der Sinterdichte und Struktur untersucht. Die wichtigsten Kennwerte der untersuchten PE-Typen sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Spritzgießrelevante Eigenschaften der untersuchten PE-Typen

Typ/Bezeichnung	Dichtemerkmal	Dichte	Schmelzflussindex 190°C/2.16kg	Schmelzflussindex 190°C/21.6kg	Schmelztemperatur
Lupolen 1800H	LDPE (Low density)	0.919 g/cm ³	1.5 g/10 min	n.a.	108°C
Lupolen 3321 C	MDPE (Medium density)	0.934 g/cm ³	0.1 g/10 min	13 g/10 min	124°C
Lupolen 4261A IM	HDPE (High density)	0.940 g/cm ³	n.a.	15 g/10 min	130°C
DOW 25055E	HDPE (High density)	0.9544 g/cm ³	28 g/10 min	n.a.	124°C

Hinsichtlich des Compoundierverhaltens zeigten die Formmassen bei allen untersuchten Pulvertypen die gleiche Tendenz. Bei Verwendung des LDPE's 1800H von Lupolen und des HDPE-Typs 25055E von DOW treten vergleichsweise niedrige Drehmomente und eine frühe Homogenisierung auf, während MDPE 3321 C und das zweite HDPE mit der Bezeichnung 4261A IM deutlich höhere Drehmomente aufwiesen und sich eine Homogenisierung deutlich später einstellt. Die gemessenen Viskositäten sind mit den Drehmomentkurven kohärent. Während MDPE 3321 und HDPE 4261A IM hohe Viskositäten aufweisen, sind diese bei Verwendung von LDPE 1800H und HDPE 25055E deutlich niedriger.

Die Dichten, die an gesinterten Triboscheiben gemessen wurden, sind in Abb. 8. dargestellt. Die höchsten Dichten lassen sich mit den beiden HDPE-Typen erzielen, wobei die Unterschiede für die Pulver CT 3000 SG und TM-DAR teilweise innerhalb der Fehlergrenzen liegen. Ähnlich wie bei den Untersuchungen zu TEC-haltigen Feedstocks zeigen auch diese Untersuchungen, dass die Verwendung des Pulvers RC UFX-DBM zu Bauteilen mit ungewöhnlich geringen Dichten nach dem Sintern führt. Für technische Anwendungen im Bereich des Mikro-Pulverspritzgießens scheint dieses Pulver zumindest für die in den Arbeiten zum 2C-MicroPIM zur Realisierung beweglicher Verbindungen zu berücksichtigenden Randbedingungen nicht geeignet zu sein.

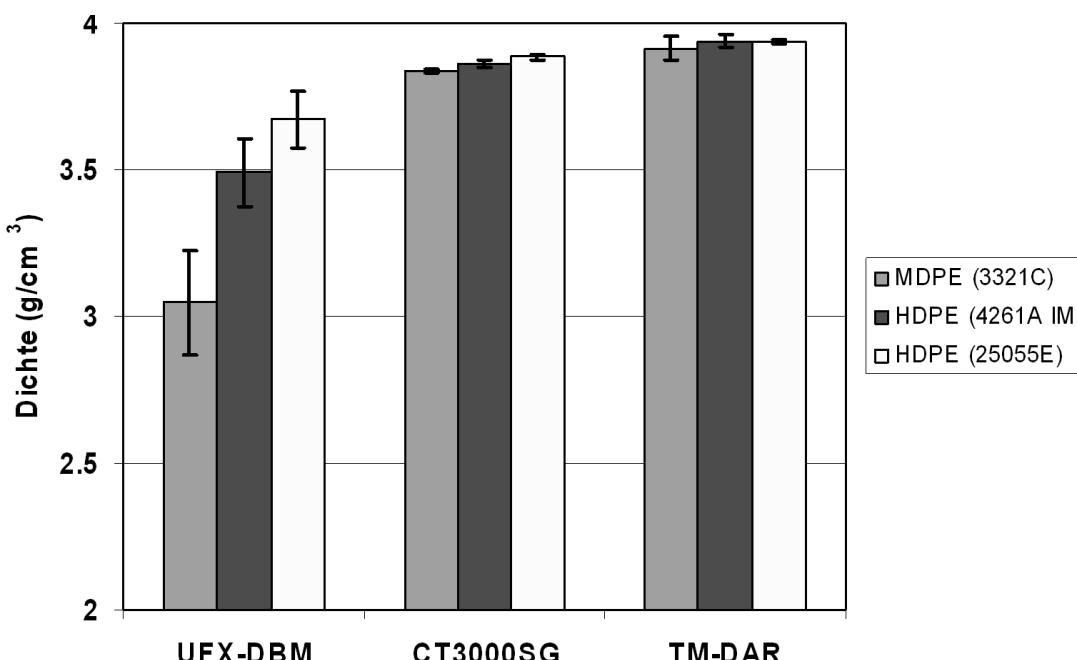


Abb. 8: Dichten gesinterter Bauteile (Triboscheiben) aus Aluminiumoxid in Abhängigkeit des Pulver- und des PE-Typs in der Formmasse.

Beobachtungen mit dem Rasterelektronenmikroskop zeigen auch eine vom PE-Typ abhängige Gefügeausbildung (Abb. 9). Während Bauteile, die mit Feedstocks auf Basis von LDPE 1800H abgeformt wurden, noch deutlich grobe Poren bzw. Hohlräume aufweisen, führt die Verwendung von HDPE 4261A IM zur Ausbildung des vergleichsweise dichtesten Gefüges.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die untersuchten HDPE-Typen im Vergleich zu LDPE 1800H und MDPE 3321C eher für die Herstellung von Al_2O_3 -Feedstocks geeignet sind. Die Vorteile von HDPE DOW 25055E sind eine relativ hohe erzielbare Sinterdichte, eine schnellere Homogenisierung beim Compoundieren, sowie eine bessere Verarbeitbarkeit im Spritzguß. Bei Verwendung von HDPE 4261A IM lassen sich ebenfalls hohe Dichten nach dem Sintern erzielen. Darüber hinaus wurden an Proben, die unter Verwendung dieses HDPE-Typs hergestellt wurden, verbesserte Strukturen bei REM-Untersuchungen festgestellt.

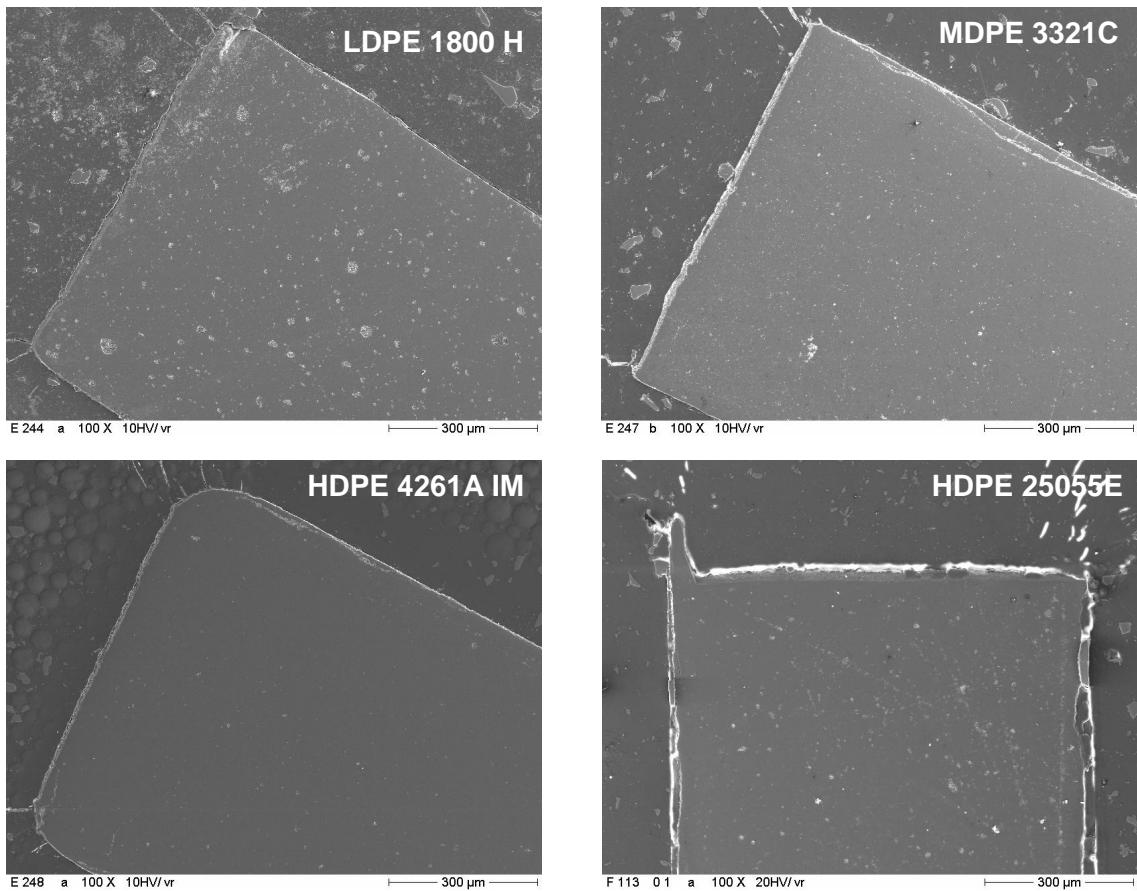


Abb. 9: Vergleich der Gefüge gesinterter Triboscheiben. Die Verwendung unterschiedlicher PE-Typen für die Feedstockherstellung führt zu unterschiedlich dichten Gefügen/Strukturen.

5.2.1.3 Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Das vorliegende Demonstratordesign weist eine gegenüber den Wellenbunden relativ dünne Welle auf. Werden die Proben stehend im Sintermagazin thermisch entbindert und gesintert, so ist häufig nach dem Sintern Verzugsbildung im dünnen Bereich der Welle zu beobachten. Bei der thermischen Entbinderung verändert sich die Festigkeit der Proben verglichen mit der Grünfestigkeit. Durch das Eigengewicht des Wellenbundes neigen die Proben bei einer stehenden Positionierung während des Entbinders und anschließenden Sinters zu Verzugsbildung in Form von Verkrümmungen. Dies kann am ehesten verhindert werden, indem die Proben in einem Pulverbett liegend gesintert werden. Dabei kommt es zu Anhaftungen des Pulvers an der Probe, die im Ultraschallbad gelöst werden müssen. Die Unterschiede im Durchmesser bzw. der Masseverhältnisse von Welle und dem Wellenbund stellen eine Grenze des Verfahrens dar.

5.2.1.4 Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Mit seinen fundamentalen Entwicklungsaufgaben hat das TP C5 enge Wechselbeziehungen zu allen vier Projektbereichen des SFB.

Besonders intensive Kooperationen bestanden mit den Teilprojekten B1, C1, C2, C3, D1 und D3. Obwohl die für das 2-Komponenten-Mikropulverspritzgießen spezifische Weiterentwicklung der Formmassen von C5 selbst vorangebracht wurde, konnten auf den Erkenntnissen des TP B1 aufgebaut werden, die B1 in der dritten Förderphase erarbeitete. Umgekehrt wurden die in TP C5 gewonnenen Erkenntnisse zu Aluminiumoxid-Pulvern hinsichtlich deren Eigenschaften bei der Formmassenherstellung an TP B1 weitergegeben. Aufgrund der zu bearbeitenden Themen innerhalb des Bereiches Produktion (C) und Gemeinsamkeiten hinsichtlich der Prozessführung im Mikro-Pulverspritzgießen fand ein ständiger fachlicher Austausch mit TP C1 bezüglich der Auswahl der Prozessparameter statt.

Einen fachlichen Austausch gab es ebenfalls mit TP C2 (Mikroguss) hinsichtlich der Charakteristika der jeweiligen Verfahren bei der Herstellung zweikomponentiger Bauteile. Für die Untersuchungen zum Verbundguss lieferte C5 Einzelkomponenten an C2. Einen intensiven Erfahrungsaustausch gab es auch mit TP C3, da zu dem dort angewandten Prozess des Sinterfügens Parallelen aber auch signifikante Unterschiede bestehen. Eine vergleichende Gegenüberstellung der Methoden, die von C2, C3 und C5 bearbeitet werden, stellt einen entscheidenden Beitrag für die wissenschaftliche Betrachtung der drei Verfahren dar. Die Ergebnisse dieses Austausches zwischen diesen drei Teilprojekten wurden an den AK ZIM weitergeleitet. Diese können als Leitfaden für das Kompetenzteam des Zentrums für integrierte Mikrofertigung (ZIM) angesehen werden, da sie zur Erleichterung der Arbeitsabläufe bei Anfragen und Auftragseingängen, sowie bei der Zuweisung zu einem geeigneten produzierenden Teilprojekt, beitragen.

Auf dem Forschungsgebiet 2C-MicroPIM ergab sich auch eine Zusammenarbeit mit den charakterisierenden Teilprojekten. Dies betrifft insbesondere die Charakterisierung des Mikrogefüges (D1). Für die Forschungsaktivitäten zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften einer beweglichen Verbindung erfolgte eine Zusammenarbeit mit TP D3, das tribologische Modellversuche an den relevanten keramischen Fremdpaarungen durchführte.

5.2.1.5 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Arbeiten zum 2-Komponenten-Pulverspritzgießen außerhalb des Sonderforschungsbereichs 499 werden vor allem am Fraunhofer IKTS in Dresden und am Fraunhofer IFAM in Bremen verfolgt. Während das Fraunhofer IFAM auf dem Themenfeld 2C-MIM (2-Komponenten-Metallpulverspritzgießen) tätig ist [MUL10], fokussieren sich die Arbeiten am IKTS auf keramische Systeme hauptsächlich auf automobil- und eisenbahntechnische Anwendungen [MOR09], die naturgemäß oberhalb des Mikrobereichs liegen. Unter anderem aus diesem Grund werden, um feste Verbindungen zwischen ATZ und ZTA Keramiken zu erzeugen, Zwischenschichten aus keramischen Folien eingebracht, so dass zu große Konzentrationsgradienten vermieden werden können [MAN11]. Somit bilden die im SFB 499 erforschten, mikrosystemrelevanten Dimensionen den wesentlichsten Unterschied zu den Aktivitäten am IKTS. In jüngerer Vergangenheit wurden zudem interessante Ergebnisse zu Metall-Keramik-Verbindungen erarbeitet. Das Themenfeld Co-Metallpulverspritzgießen wird auch am State Key Laboratory of Powder Metallurgy an der Central South Universität in Changsha (China) bearbeitet. Hier wurden metallische Zahnräder mit einer sog. Skin-Core-Struktur realisiert, wobei das Kernmaterial zur besseren Unterscheidung mit 1% kommerziellem Graphit angereichert wurde [HE10].

Ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber den Arbeiten an den drei o.g. Institutionen kann das Teilprojekt C5 hinsichtlich der Entwicklung beweglicher Verbindungen beanspruchen. Bewegliche Verbindungen sind darüber hinaus nur aus Machbarkeitsstudien der Firma Arburg bekannt. Das zugrunde liegende Bauteil, ein metallisches Scharnier, liegt jedoch nicht mehr im Mikrobereich und wurde darüber hinaus nur mithilfe eines Abstandhalters, der später herausgetrennt werden kann, realisiert. Da der Abstandhalter eine weitere Komponente darstellt, wurde dieser Demonstrator mithilfe des 3-Komponenten-Pulverspritzgießens hergestellt.

[MAN11] Mannschatz, A.; Moritz, T.; Jegust, S.; v.Witzleben, M.: Enabling Co-Sintering of ATZ/ZTA Ceramic Compounds by Two-Component Injection Moulding with Green tapes as Interlayers; Proc. Euro PM2011, Vol. 2, European Powder Metallurgy Association, Shrewsbury, UK, ISBN 978-1-899072-21-7 (2011), pp. 171-176.

[MOR09] Moritz, T.; Mannschatz, A.: Ceramic components for automotive and railway applications made by two-components ceramic injection moulding; Proc. Euro PM 2009. 12.-14.10.2009, Copenhagen, Denmark: Shrewsbury: EPMA, 2009, Vol.2 (2009), pp.123-128.

[MUL10] Mulser, M.; Benedet Dutra, G.; Rager, J.; Petzoldt, F.: Influence of a Mismatch in Shrinkage for Two-Component Metal Injection Moulding (2C-MIM); Proc. World PM 2010. 10.-14.10.2010, Florence, Italy: Shrewsbury: EPMA, 2010, Vol.4 (2010), pp. 527-534.

- [HE10] He, H.; Li, Y.; Liu, P.; Zhang, J.: Design and Manufacture of Gears with a Skin-Core Structure by Metal Co-Injection Moulding; Powder Injection Moulding International 4(1) (2010) S.50-54.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

5.2.2.1 Publikationen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung

- [1] Andreas Ruh, Volker Piotter, Klaus Plewa, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Juergen Hausselt: Development of Two-Component Micropowder Injection Molding (2C-MicroPIM) - Process Development; Int. J. Appl. Ceram. Technol. 8 (2011) S. 610–616.
- [2] Andreas Ruh, Thomas Hanemann, Richard Heldele, Volker Piotter, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Jürgen Haußelt: Development of Two-Component Micropowder Injection Molding (2C MicroPIM): Characteristics of Applicable Materials; Int. J. Appl. Ceram. Technol. 8 (2011) S. 194-202.
- [3] Andreas Ruh, Volker Piotter, Klaus Plewa, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl und Jürgen Haußelt: Influence and limits of sintering temperatures on the movability of shaft-to-collar connections formed by two-component micro powder injection moulding; Microsystem Technologies 17 (2011) S. 1541-1546.
- [4] Andreas Ruh, Volker Piotter, Klaus Plewa, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Jürgen Haußelt: Studies on size accuracy of microgear wheels produced by powder injection molding of zirconia feedstocks; Int J Adv Manuf Technol (2011) DOI 10.1007/s00170-011-3461-9
- [5] Andreas Ruh, Katharina Klimscha, Volker Piotter, Klaus Plewa, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Jürgen Fleischer: The development of two-component micro powder injection moulding and sinter joining; Microsystem Technologies 17 (2011) S. 1547-1556.
- [6] Andreas Ruh, Volker Piotter, Klaus Plewa, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Jürgen Haußelt: Effects of material improvement and injection moulding tool design on the movability of sintered two-component micro parts; Microsystem Technologies 16 (2010) S. 1989–1994.
- [7] Volker Piotter, Tobias Müller, Klaus Plewa, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Andreas Ruh, Jürgen Hausselt: One- and two-component micro powder injection moulding derived from thermoplastic microreplication; Plastics, Rubber and Composites 39 (2010) S. 287-292.
- [8] Volker Piotter, Jürgen Prokop, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Andreas Ruh, Jürgen Hausselt: Multi-component microinjection moulding-trends and developments; International Journal of Advanced Manufacturing Technology 47 (2010) S. 63-71.
- [9] Volker Piotter, Thomas Hanemann, Richard Heldele, Marcus Mueller, Tobias Mueller, Klaus Plewa, Andreas Ruh: Metal and Ceramic Parts fabricated by Microminiature powder injection molding; Intern. J. Powder Metallurgy 46(2), 21-28 (2010)

5.2.2.2 Andere Publikationen

- [10] Volker Piotter, Tobias Mueller, Juergen Prokop, Klaus Plewa, Andreas Ruh, Elvira Vorster: Production of Multi-Material Micro Parts by Powder Injection Molding; Proc. Euro Powder Metallurgy Congress & Exhibition 2010, Barcelona, Vol. 2, ISBN 978-1-899072-21-7 (2011), S. 165-170.
- [11] Volker Piotter, Tobias Mueller, Klaus Plewa, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Andreas Ruh, Elvira Vorster, Juergen Hausselt: Special Variants of Metal and Ceramic Micro Injection Molding; International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials (PowderMet 2011), 18.-21.5.2011, San Francisco, Part 4, S.04-113 – 04-119.
- [12] Andreas Ruh, Volker Piotter, Klaus Plewa, Hans-Joachim Ritzhaupt-Kleissl, Jürgen Haußelt: Progress of Two-Component Micro Powder Injection Moulding (2C-MicroPIM); Proc. Powder Metallurgy World Congress & Exhibition 2010, Florence, Vol. 4, ISBN 978-1-899072-13-2 (2010), S. 535-540.

5.2.2.3 Patente

Europäische Patentanmeldung 06 791 647.8-2122: „Verfahren zur Herstellung eines Gegenstandes aus mindestens einem selbständigen beweglichen Teil und einem Fixierteil“; Erfinder: Guido Finnah, Jürgen Haußelt, Klaus Plewa, Volker Piotter, Steffen Rath, Robert Ruprecht.

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit Januar 2006 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

lau-fende Num mer	Name, akademischer Grad, Dienststel-lung	engere Fachzuge-hörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniver-sitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstun-den	Katego-rie
Grundausstattung					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1. Piotter, V., Dr.-Ing., GL	Mikro-Spritzgießen	IAM-WPT, ehemals IMF III	5	
	2. Ritzhaupt-Kleissl, H.-J., Dr.-Ing., stellv. IL	Prozess- und Versuchstechnik	IAM-WPT, ehemals IMF III	5	
	3. Haußelt, J., Prof. Dr.-Ing., IL	Werkstoffprozess-technik	IAM-WPT, ehemals IMF III	3	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	4. Vouriot, R.		IAM-WPT, ehemals IMF III	4	
beantragte Ergänzungsausstattung					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	5. Ruh, A., Dr. rer. Nat.	Werkstoffkunde	IAM-WPT, ehemals IMF III	39	
	6. Wüst, Kilian	Chemie	IAM-WPT, ehemals IMF III	19,25	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	7. Walter, H.		IAM-WPT, ehemals IMF III	19,5	

Kürzel:

GL = Gruppenleiter, AL = Abteilungsleiter, IL = Institutsleiter

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

1. Dr.-Ing. V. Piotter, Gruppenleiter Mikrospritzgießen in der Abteilung Prozessentwicklung und Versuchstechnik (PVT) am Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT; ehemals: Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung III) leitet die Arbeiten im Rahmen der Gruppe, koordiniert die Arbeitsabläufe mit dem Teilprojekt C1 und betreut den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Durchführung des Arbeitsprogramms.

2. Dr.-Ing. H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, früherer Leiter der Abteilung PVT am IAM-WPT, leitete bis 31.7.2011 die Arbeiten, welche in die Forschungsaktivitäten der Abteilung PVT im Rahmen der Entwicklung von Urformverfahren integriert sind. Zudem gewährleistete er eine enge Verknüpfung insbesondere zu den Teilprojekten B1, C1 und C2.
3. Prof. Dr.-Ing. J. Haußelt, ehemaliger Leiter des Instituts für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT) sowie des Lehrstuhls Werkstoffprozesstechnik in der Mikrosystemtechnik am IMTEK, Universität Freiburg, betreute das Teilprojekt insbesondere hinsichtlich der wissenschaftlichen Fragestellungen (bis 30.9.2011).
4. R. Vouriot, Versuchstechniker, unterstützt die Versuchsauswertung durch Rasterelektronenmikroskopie (REM). Er führt darüber hinaus auch Untersuchungen am REM für die Teilprojekte B1, C1 und C2 aus.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

5. Dr. rer. nat. A. Ruh ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter für die Durchführung und Auswertung aller vorgesehenen Experimente verantwortlich. Ferner bearbeitet der wissenschaftliche Mitarbeiter die für dieses Teilprojekt spezifischen Fragestellungen bezüglich der materialwissenschaftlichen Aspekte und der notwendigen werkzeugtechnischen Auslegung.
6. K. Wüst (studentische Hilfskraft, Fachgebiete: Chemie, Mikrosystemtechnik, Maschinenbau, Werkstoffwissenschaften oder verwandte Disziplinen): Die studentische Hilfskraft ist für die Durchführung von grundlegenden, routinemäßigen Arbeiten im Bereich der Versuchsvorbereitung, -durchführung und -auswertung zuständig, insbesondere den Entbinderungs- und Sinterläufen. Hinzu kommen die Charakterisierung der Proben (Maße, Dichte etc.) in den einzelnen Prozessschritten und die Dokumentation der Ergebnisse.
7. H. Walter bedient als Kunststoffformgeber die 2-Komponenten-Spritzgießmaschine und führt die vorgesehenen Pulverspritzgießversuche inklusive Verifikation der Simulation durch. Ferner ist er für die Werkzeugmontage, die Umrüstung der Spritzgießeinheiten sowie die Werkzeugauf- und -abbauvorgänge verantwortlich.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt D1

5.1.1 Titel

Mikrobauteilzustand – Analyse von Gefüge, Eigenspannungszustand, Verfestigungszustand und Topographie ungeformter Mikrobauteile

Micro-Component State – Analysis of the Microstructure, the Residual Stress State, the Hardening State and the Topography of Molded Micro Components

5.1.2 Projektleitung

Wanner, Alexander, Prof. Dr.rer.nat. Dipl.-Ing., geb. 19.12.1962

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde

Kaiserstr. 12

76128 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-44160

Telefax: 0721 / 608-48044

E-Mail: alexander.wanner@kit.edu

Löhe, Detlef, Prof. Dr.-Ing., geb. 23.09.1949

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde

Kaiserstr. 12

76128 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-42004

Telefax: 0721 / 608-48044

E-Mail: detlef.loehe@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragsstellung

Das Teilprojekt (TP) D1 beschäftigt sich mit der Charakterisierung von Mikroproben und Mikrobauteilen hinsichtlich ihrer Topographie, Mikrostruktur und Eigenspannungs- sowie Verfestigungszustände und mit der Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur mechanischen und thermischen Nachbehandlung von Mikrobauteilen. Das Teilprojekt bringt hierzu einerseits spezielle Charakterisierungsmethoden in den Sonderforschungsbereich ein, die bereits in den vorangegangenen Förderperioden entwickelt und adaptiert wurden. Andererseits sollen im hier beantragten Teilprojekt die zum Teil in Teilprojekt B5 für die Behandlung von Mikro-Formeinsätzen entwickelten mechanischen Oberflächenverfahren nun erstmals auf die Nachbehandlung von Mikrobauteilen übertragen werden.

Die dabei erzielten Ergebnisse werden in Zusammenarbeit mit den abformenden Teilprojekten A3, C1, C2, C3 und C5 sowie dem mit der Qualitätssicherung befassten Teilprojekt C4 in Prozess-Gefüge-Beziehungen zusammengefasst. Gemeinsam mit den Teilprojekten D2 und D3 werden diese den Eigenschaften bei mechanischer und tribologischer Beanspruchung gegenübergestellt und empirische Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen erarbeitet, die für die Produktentwicklung in Form eines Dimensionierungskonzepts bereitgestellt werden. Die Erstellung von Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen für das Urformen hochbelastbarer Mikrobauteile stellt weiterhin das wissenschaftliche Ziel des Teilprojekts dar. Hierbei kommt Urformprozessen mit Fügekomponenten wie dem Sinterfügen (TP C3), dem Montagemikroguss (TP C2) oder dem 2C- μ -PIM (TP C5) und Strategien zur Einstellung höchstfester Bauteilzustände (gemeinsam mit den TPs A3, B1 und C1) besondere Bedeutung zu.

Bereits in der vergangenen Förderphase wurden Proben aus Aluminiumbronze, die mittels Mikroguss hergestellt wurden ausführlich hinsichtlich Gefüge und Phasenzusammensetzung untersucht. Es zeigte sich, dass das Gießverfahren (Vakuumdruckguss (VDG) / Schleuderguss (SG)) einen signifikanten Einfluss auf das Mikrogefüge hat. Proben die mittels SG hergestellt wurden, weisen hauptsächlich globulare Körner auf, wäh-

rend bei VDG vermehrt auch lamellare Körner auftreten. Ebenso wird durch eine Wärmebehandlung die Ausbildung der κ -Phase begünstigt, was zu einer Verminderung im Anteil der β -Phase und vor allem in einer erhöhten Festigkeit des Materials resultiert.

Im Folgenden wird auf die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen angewandten Analysemethoden eingegangen, im Anschluss daran werden die Ergebnisse sortiert nach Werkstoff und Herstellungsprozess aufgeführt und diskutiert.

Röntgendiffraktometrische Methoden (XRD) wurden hauptsächlich angewandt, um Eigenspannungen zu analysieren aber auch um die Phasenzusammensetzung der Mikrobauteile zu analysieren. Hierzu wurden Experimente mit Synchrotronstrahlung an der Strahllinie G3 am HASYLAB (DESY) und unter Verwendung von konventioneller Röntgenstrahlung im Röntgenlabor der Struktur und Spannungsanalyse des Instituts für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde am KIT, Karlsruhe durchgeführt. Am HASYLAB stand vor allem die Verwendung des MaXIm-Aufbaus (Material X-Ray Imaging) im Vordergrund. Der MaXIm-Aufbau nutzt anstelle eines Szintillationszählers zur Registrierung der gebeugten Röntgenintensität einen 2-dimensionalen CCD-Detektor dem ein Multichannelplatte vorgeschaltet ist. In Kombination mit der parallelen Synchrotronstrahlung erlaubt dieser Aufbau für abbildende Röntgenbeugungsanalysen eine ortsaufgelöste Eigenspannungsanalyse mit einer nominellen Ortsauflösung von bis zu 14 μm . Aufgrund des verhältnismäßig geringen Photonenflusses der Biegemagnet-Synchrotronstrahlline G3 und der im Verhältnis zur nominellen Ortsauflösung des Experimentes 'grobe' Gefügeaufbau der untersuchten Bauteile und dem z. T. schwachen Reflexionvermögen der untersuchten Werkstoffphasen ist diese nominelle Ortsauflösung in keinem Falle erreichbar. Es muss stets mit einem Binning der Bildinformationen aus der CCD-Röntgenkamera ausgewertet werden. Zudem erfordert die Anwendung der $\sin^2\psi$ -Technik zur Eigenspannungsanalyse eine Verkipfung der Probe gegenüber dem einfallenden Röntgenstrahl, was zu einer Vergrößerung der lokalen Bereiche führt, über die die Beugungsinformation integriert wird. Gleiches gilt im übertragenen Sinne auch für Eigenspannungs- und Phasenanalysen an Mikrobauteilen unter Verwendung eines konventionellen Diffraktions-Messaufbaus unter Verwendung eines Szintillationszählers als Röntgendetektor. Aus den o. a. Gründen (gegrenzter Photonenfluss / Korngrößenverteilung) eine Mindestgröße der Primärblende gewählt werden, um statistisch abgesicherte Messdaten bei noch vertretbaren Zählzeiten gewinnen zu können. Dies führt bei verhältnismäßig hohen Kippwinkeln in ψ und geringen Beugungswinkeln 2θ zu einer starken, geometrisch bedingten Verbreiterung des Messflecks auf der Probe, was kombiniert mit den meist geringen Abmessungen der im SFB 499 untersuchten Proben und Bauteilen zum Auftreten unerwünschter Randeffekte führen kann, welche bei nicht ortsaufgelöster Messung zunächst nicht identifiziert werden können. Eine entscheidende Rolle kommt zudem der Korngröße der untersuchten Proben zu. Diese stellt vor allem bei Messungen unter Verwendung des oben beschriebenen MaXIm-Aufbaus ein wesentliches Problem dar. Bei einem grobkristallinen Gefüge (im Verhältnis zur nominellen Ortsauflösung des Messaufbaus) erfüllen lediglich kleine Bereiche auf der Probe die Beugungsbedingung nur bei unterschiedlichen Verkippungen ψ , so dass eine ortsaufgelöste Eigenspannungsanalyse, die für die Mikrosystemkomponenten erforderlich ist, in vielen Fällen nicht möglich ist.

Im Rahmen des SFB 499 wurden in dem hier dargestellten Projektzeitraum in erster Linie Verbundgussproben unter Verwendung des MaXIm-Aufbaus analysiert. Es handelte sich dabei um Musterbauteile zum Erproben des Verbundgussprozesses. Im Speziellen waren dies Keramikzahnräder aus ZrO_2 oder Al_2O_3 , welche mit Al-Bronze umgossen wurden. Neben der Vorwärmtemperatur der Gussform wurde auch der Gussprozess selbst variiert (Schleuderguss, Vakuumdruckguss). Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist bei diesen Materialpaarungen grundsätzlich davon auszugehen, dass sich während des Gießens abkühlbedingte Makroegenspannungen ausbilden. Dies konnte in den Keramikteilen der Verbundgussproben auch erfolgreich nachgewiesen werden. Eine Aussage zum Eigenspannungszustand im Umguss aus Al-Bronze ist allerdings nur sehr bedingt möglich, da aufgrund der Grobkörnigkeit dieses Materials keine ausreichende Kornstatistik während der Beugungsuntersuchungen erzielt werden konnte. Dies konnte selbst durch eine Rotation der Proben um Ihre Achse zur Erhöhung der Kornstatistik nicht wesentlich verbessert werden.

Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) im Rasterelektronenmikroskop des IAM-WK wurde vor allem während der Prozessoptimierung eingesetzt, um lokale Materialzusammensetzungen zu analysieren. Hierzu wird die Energie der mit dem Elektronenstrahl des Rasterelektronenmikroskops (REM) angeregten charakteristischen Röntgenstrahlung registriert und so das betreffende Element bestimmt. Bedingt durch den Durchmesser des Elektronenstrahls am REM des IAM-WK (W-Haarnadelkathode) und der Wechselwirkung des Primär-Elektronenstrahls mit dem untersuchten Material konnte hier eine maximal eine Auflösung von etwa 10 μm erreicht werden. Für die nähere Untersuchung der Diffusionsprozesse, die bei den mehrkomponentigen Bauteilen beim Verbundguss oder beim 2-Komponenten Spritzgießen (2C- μPIM) entstehen können, konnten auf diese Weise nicht aufgelöst werden. Für diese Untersuchungen wurden komplementäre

REM-Analysen unter Verwendung eines REM vom Typ Leo 1530 (Feldemitter) am Laboratorium für Elektronenmikroskopie (LEM) am KIT durchgeführt. In diesen ergänzenden Untersuchungen konnte eine Ortsauflösung und ein Bildkontrast erreicht werden, die ausreichend war, um eine anschließende Gefügeanalyse an Si_3N_4 durchzuführen.

Computertomografie (μ -CT) wurde eingesetzt, um qualitativ die Güte unterschiedlicher Herstellprozesse wie das Niederdruck Spritzgießen, den Mikro-Verbundguss und das 2-Komponenten Mikrospritzgießen (2C- μ PIM) zu charakterisieren. Da die Computertomografie ein bildgebendes Verfahren ist, das auf dem unterschiedlichen elektromagnetischen Absorptionsverhalten von Materialien beruht, eignet es sich besonders zur Charakterisierung von Fügebauteilen aus unterschiedlichen Materialien. Computertomografie ermöglicht z. B. die Analyse der Fügezonen der Materialverbunde und der lokalen (räumlichen) Porenverteilungen. Im Vergleich zur metallografischen Untersuchung ist die optische Auflösung bei Labor-CT-Geräten jedoch auf einige Mikrometer (Voxelgrösse) begrenzt – eine höhere Auflösung ist nur an Großforschungsanlagen beispielsweise unter Verwendung von Hochenergie-Synchrotronstrahlung möglich. Andererseits ist das Verfahren komplett zerstörungsfrei und prinzipiell auch auf Materialien anwendbar, welche sich aufgrund ihrer Konsistenz nicht für eine materialografische Präparation eignen (z.B. Grünlinge oder Braunlinge beim Sinterprozess). Zudem erlauben CT-Untersuchungen beispielsweise Aussagen zur räumlichen Verteilung der Poren, während mittels lichtmikroskopischer Methoden grunssätzlich nur ein ebener Anschnitt durch das Bauteil analysiert werden kann. Einschränkende äußere Parameter für die μ -CT-Untersuchungen sind das Materialvolumen der untersuchten Bauteile (kumulierte Materialdicke) und der Materialkontrast. CT-Analysen werden im Allgemeinen durchgeführt indem von der zu untersuchende Probe unter verschiedenen Winkeln derselben Drehachse Radiographie-Aufnahmen angefertigt und aus diesen über eine Rekonstruktions-Software auf die dreidimensionale Materialverteilung zurückgeschlossen wird. Materialien mit identischem Absorptionsverhalten können dabei nicht unterschieden werden.

Die Stereologie ist den Bereich der Gefügeanalyse eines Werkstoffes zuzuordnen und beschäftigt sich damit, aus zweidimensionalen Aufnahmen eines Gefüges auf die räumliche Verteilung der Gefügebestandteile zurückzuschließen.

Das Schliffbild einer Probe gibt schon bei einfachen, globularen Kornstrukturen keine exakten Informationen über die tatsächlichen Korngrößen, da nicht ersichtlich ist, an welcher Position die einzelnen Körner durch die Präparation geschnitten wurden. Bei Materialien mit komplexerem Gefüge erschwert sich das Rückenschließen von Schliffbildern auf die tatsächliche Mikrostruktur drastisch. Eine quantitative Gefügeanalyse ist dennoch erstrebenswert, da die Gestalt der Körner maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes nehmen, wie es zum Beispiel bei dem im Rahmen des SFB 499 untersuchten Siliziumnitrid der Fall ist. Der Streckungsgrad der Körner bei $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ ist beispielsweise ein entscheidender festigkeitsbestimmender Parameter aufgrund seiner Eigenschaft die Risszähigkeit maßgeblich zu erhöhen.

In der Praxis werden hierfür zunächst durch entsprechende Präparationen Schliffbilder erstellt und für jedes sichtbare Korn der minimale und der maximale Durchmesser bestimmt. Auf Grundlage einer angenommenen, idealisierten Kornform - die Körner wachsen aufgrund der hexagonalen Gitterstruktur in guter Näherung als Prismen mit sechseckigen Grundflächen - wird mit statistischen Methoden auf die Verteilung der gesuchten Parameter geschlossen [MüC94]. Als Indikator für die Güte der Ergebnisse dient hierbei das Konvergieren der Verteilungen gegen einen stabilen Wert. Ein Vergleich mit tatsächlichen Verteilungen ist nicht oder nur unter hohem Aufwand möglich und setzt u. a. die Verfügbarkeit von computertomografischen Methoden unter Verwendung von hochenergetischer Synchrotronstrahlung voraus.

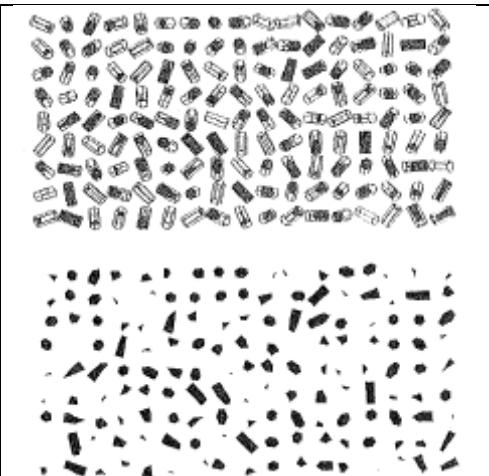


Abb. 1: schematische Darstellung der Schnittflächengeometrie von Si_3N_4 [Ohs00]

Mikrobiegeproben aus Siliziumnitrid

Mittels der Stereologie wurden Mikrobiegeproben aus β - Si_3N_4 untersucht, die mittels Niederdruck-Spritzgießen bzw. Heissgießen hergestellt wurden. Dazu wurden paraffinbasierte Formmassen aus Siliziumpulver und Sinteradditiven (Y_2O_3 , MgO , Al_2O_3) mit Pulverfüllgraden von etwa 57 Vol-% hergestellt. Der Herstellungsprozess wird ausführlich in [Mü109][Mü110] erläutert. Durch Variation der Mahldauer des Si-Pulvers wird über die resultierende Partikelgröße der für die Flüssigphasenbildung notwendige SiO_2 -Anteil eingestellt, d.h. ein feineres Si-Pulver bringt über die größere Oberfläche mehr SiO_2 in das System, wodurch das Volumen der Flüssigphase beim späteren Sintern zunimmt.

Die Entbinderung der Grünkörper erfolgt nach der Abformung und wird thermisch bis 500°C an Luft durchgeführt. Bei 1390°C wandeln die noch aus Silizium bestehenden Formkörper unter Stickstoffatmosphäre mit zusätzlichem Wasserstoffgehalt von 5% in einem Reaktionsbindungsprozess weitgehend in Si_3N_4 um. In einer anschließenden, separat ausgeführten Temperaturbehandlung (1700 bis 1800°C) in Stickstoffatmosphäre wird RBSN (reaction-bonded silicon nitride) durch Flüssigphasensinterung zu SRBSN verdichtet. Liegt bei diesem Schritt Atmosphärendruck vor, ist es notwendig die Probe in ein Pulverbett aus $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ zu betten, um die Zersetzung von Si_3N_4 zu minimieren. Beim Gasdrucksintern, oder beim Heiß-isostatischen Pressen (HIP) kann auf ein Pulverbett verzichtet werden, da über die Stickstoffatmosphäre ein Druck von mehreren 100 bar aufgebracht wird und die Zersetzung von Si_3N_4 auf diese Weise hinreichend unterdrückt wird.

Der überwiegende Teil der Probekörper wurde drucklos (also bei Atmosphärendruck) im Pulverbett gesintert. Zu Vergleichszwecken konnten aber einzelne Probenserien am IAM-KM in einem Sinter/HIP-Verfahren bei 1780°C und 200 bar ohne Pulverbett behandelt werden.

Bei der Herstellung wurden sowohl die Sinterparameter als auch die Zusammensetzung des Feedstock variiert. Die jeweiligen Werte können **Tabelle 1** und **Tabelle 2** entnommen werden. **Tabelle 1** enthält zusätzlich charakteristische Größen der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften.

Charge	Sintertemperatur [°C]	Sinterdauer [h]	Kornlänge [nm]	Streckungsgrad [-]	Porosität [%]	Anteil Sekundärphase [%]	R _t [μm]	σ ₀ [MPa]	m [-]
1	1800	1	350	2,2	2,4	-	5,9	1035	11,5
2	1750	1	350	3,0	-	8,9	7,0	920	13,2
3	1750	2	500	3,9	4,1	-	4,7	1161	19,2
4	1800	1	710	3,6	1,4	16,4	4,0	1234	13,0
5	1750	1	710	2,0	1,3	16,9	2,9	921	12,4
6	1800	1	260	1,9	1,4	20,8	2,8	873	11,8
7	1750	2	-	-	4,2	37,6	4,8	544	13,1
8	1700	1	-	-	7,5	36,1	3,9	540	13,7

- keine Daten vorhanden

Tabelle 1: Sinterparameter, Mikrostruktur- und mechanische Eigenschaften

Feedstock	F4	F5	F8	F9
Chargen	1 und 2	3 und 4	5 und 6	7 und 8
Y_2O_3 -Gehalt [Ma-%]	12,3	12,4	12,3	12,3
Al_2O_3 -Gehalt [Ma-%]	1,7	0,0	3,0	3,0
MgO -Gehalt [Ma-%]	0,0	0,7	0,0	0,0
Spez. Oberfläche nach BET [m^2/g]	7,8	10,5	9,1	6,3

bezogen auf die Masse des Si-Pulvers

Tabelle 2: Feedstockzusammensetzungen der unterschiedlichen Chargen

Im Zuge der materialografischen Präparation wurden die Proben warm eingebettet (Demotec) und sukzessive bis auf eine Korngröße von 1 μm mechanisch poliert. Das Warmeinbetten ist erforderlich, um ein Abdampfen des Einbettmittels beim anschließenden Plasmaätzen zu unterbinden, wodurch die Kornstruktur im REM nicht mehr erkennbar wäre. Zum Ätzen wurde ein Gemisch aus Sauerstoff und Tetrafluormethan (CF_4) verwendet und die Proben wurden bei einer Leistung von 60 W für 70 Sekunden geätzt. Das so entstandene

Profil wurde am Labor für Elektronenmikroskopie (LEM) am KIT im REM (Modell „Leo 1530“) untersucht und die erhaltenen Bilder für die stereografische Analyse hinsichtlich der Glas- und Si_3N_4 -Phase manuell binarisiert. Mittels einer Materialografie-Software (ImageC) wurde für jedes Korn pro Schliffbild der minimale und der maximale Durchmesser bestimmt, woraus in der Stereologie – in Form einer am IAM-KM verfügbaren Software – die Verteilung von maximaler Kornlänge über dem Streckungsgrad der Proben ermittelt wurden.

Aus der stereologischen Analyse geht hervor, dass die Gefüge der untersuchten Chargen – abhängig vom verwendeten Feedstock – charakteristische Merkmale aufweisen. Proben der Chargen 1 und 2 verfügen über mäßig lang gestreckte Nadeln, während bei den Chargen 3 und 4 große Körner bei ebenfalls hohem Streckungsgrad vorliegen. Die Sekundärphase ist homogen um die Körner und zwischen den Körnern verteilt. Chargen 5 und 8 verfügen über einen höheren Anteil an Sekundärphase, welche zudem noch inhomogen im Gefüge verteilt ist (Abb. 2). Der Anteil der Sekundärphase ist generell höher als es für makroskopische Proben zu erwarten ist. Die Ursache für die Inhomogenität könnte im Herstellungsprozess selbst liegen. Bei Zersetzungreaktionen während des Sinterns wird die verflüssigte Sekundärphase durch die Kapillarwirkung aus der Sockelplatte in die Mikroproben gesogen. Bei den Chargen 5 bis 8 ist der Streckungsgrad der Körner deutlich geringer. Die Porosität der Chargen schwankt zwischen 1 und 7 Vol.%, wobei die Chargen 5 und 6 im Vergleich die geringste und Chargen 7 und 8 die höchste Porosität aufweisen. Die Gefügekennwerte können Tabelle 1, entnommen werden. Tendenziell steigt die Oberflächenrautiefe mit dem Streckungsgrad der Körner an.

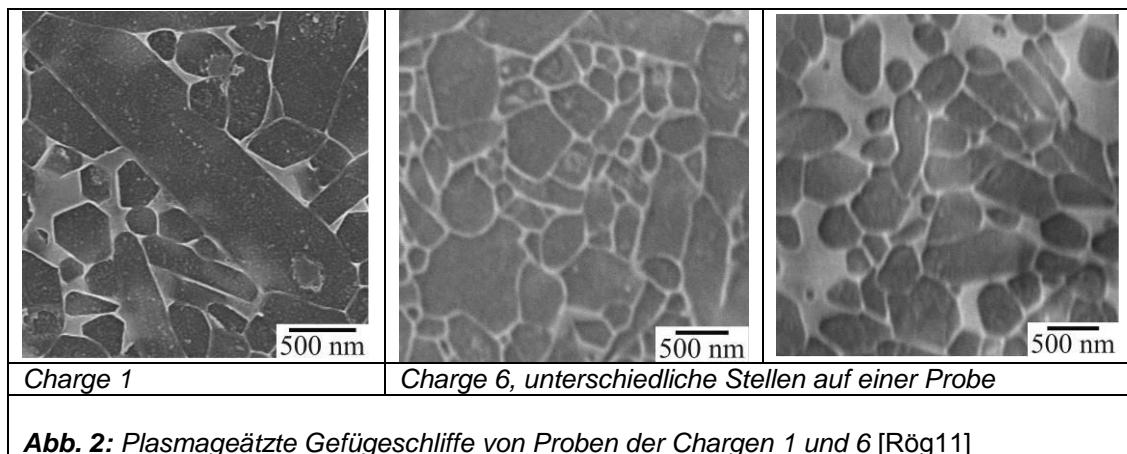


Abb. 2: Plasmageätzte Gefügeschliffe von Proben der Chargen 1 und 6 [Rög11]

Gefügeanalyse an heiß-isostatisch gepressten (HIP) Proben

Charge	Sintertemperatur [°C]	Sinterdauer [min]	Porosität [%]	Rt [μm]	σ_0 [MPa]	m [-]
Si15-SA01	1780	30*	2,5	17,5	-	-
Si15-SA03	1750	120	1,7	12,5	-	-
Si12-SA11	1780	50**	1,1	13,6	1203	12,9
Si14-SA22	1780	50**	1,4	-	990	-

* Temperatur- und Druckverlauf: 25 K/min 1200°C, 10 K/min 1780°C, 30 min 200 bar, 100-50 K/min abkühlen

** davon 20 min bei 200 bar heiß-isostatisches Pressen

Tabelle 3: Sinterparameter, mechanische und strukturelle Eigenschaften

Feedstock	F4	F5	F8
Chargen	Si15-SA01/SA03	Si14-SA22	Si12-SA11
Y_2O_3 -Gehalt [Ma-%]	12,3	12,3	12,3
Al_2O_3 -Gehalt [Ma-%]	3,0	1,5	1,5
MgO -Gehalt [Ma-%]	0,0	1,5	1,5
Spez. Oberfläche nach BET [m^2/g]	6,3	10,0	6,3

Tabelle 4: Feedstockzusammensetzungen der unterschiedlichen Chargen

Zusätzlich zu den im Pulverbett gesinterten Mikrobiegeproben wurden drei Chargen am IAM-KM ohne Pulverbett bei einem Umgebungsdruck von 200 bar bei 1780°C gesintert (Tabelle 3). Zu Vergleichszwecken wurde eine Vergleichscharge mit identischer Zusammensetzung unter Normalbedingungen hergestellt. Die

gefertigten Proben wurden im Rahmen einer Studienarbeit hinsichtlich Gefüge, Härte und Porosität sowohl in der Nähe des Sockels der Probe, als auch im davon abgewandten Teil untersucht (Abb. 3, Abb. 4, Tabelle 3). Dies geschah, um etwaige Einflüsse von Kapillareffekten zu analysieren, wie sie zu Beginn der Untersuchungen an Mikrobiegeproben aus Si_3N_4 auftraten. Es zeigte sich, dass weder das Gefüge noch die Härte signifikant in den unterschiedlichen Bereichen der Probe variieren. In Abb. 3 sind daher lediglich die Verteilungen der Gefügeparameter der vier Chargen allgemein wiedergegeben, auf die Aufteilung zwischen sockelnahem und sockelfernem Bereich wurde entsprechend verzichtet. Die Herstellungsparameter der unterschiedlichen Chargen können Tabelle 3 und Tabelle 4 entnommen werden.

Es ist zu beobachten, dass der Streckungsgrad der Körner bei allen untersuchten Chargen zwar in einem ähnlichen Bereich variiert, die Häufigkeitsmaxima jedoch bei unterschiedlichen Werten auftreten. Ähnlich verhält es sich mit den Kornlängen, wenngleich der Effekt hier deutlich schwächer ausgeprägt ist.

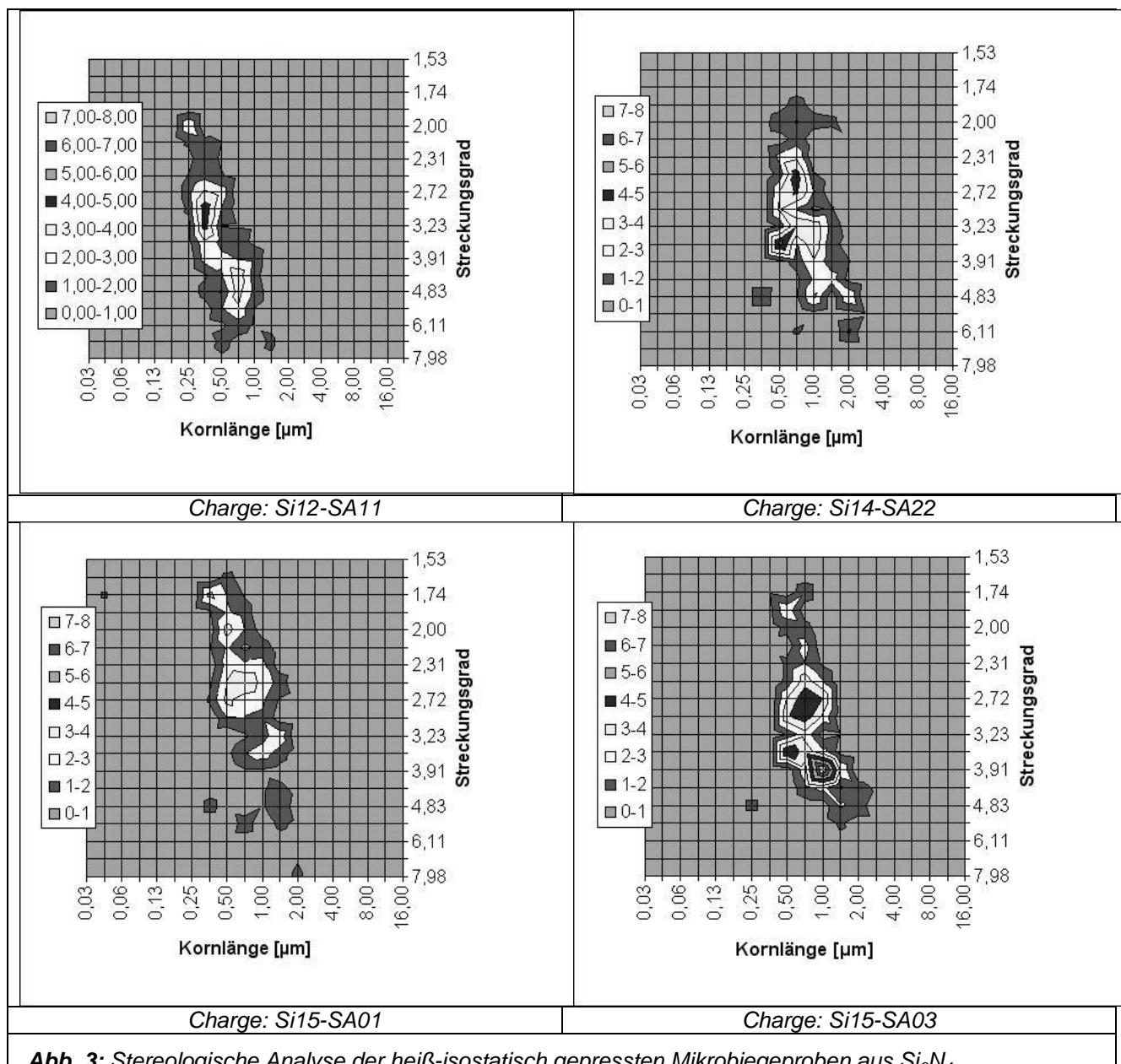


Abb. 3: Stereologische Analyse der heiß-isostatisch gepressten Mikrobiegeproben aus Si_3N_4

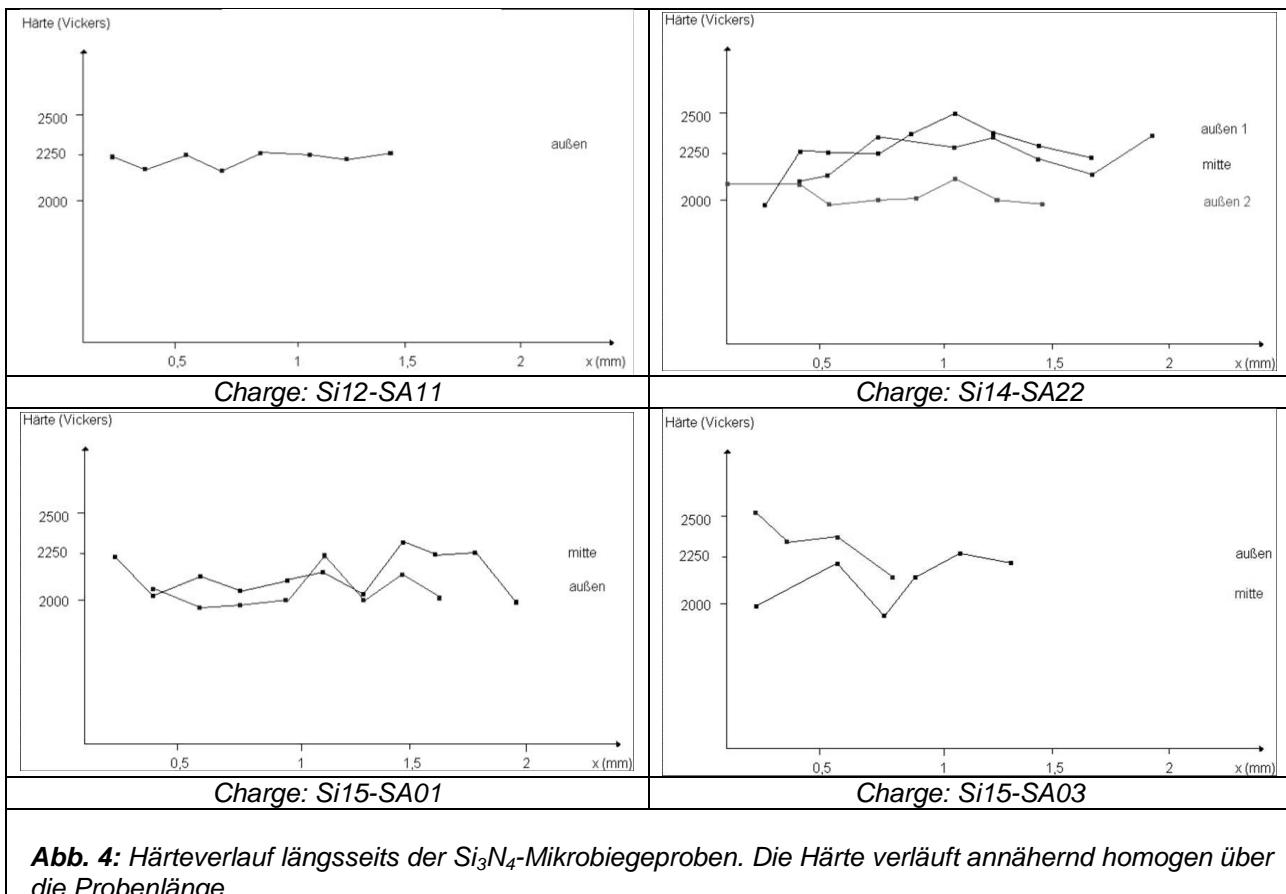


Abb. 4: Härteverlauf längsseits der Si_3N_4 -Mikrobiegeproben. Die Härte verläuft annähernd homogen über die Probenlänge.

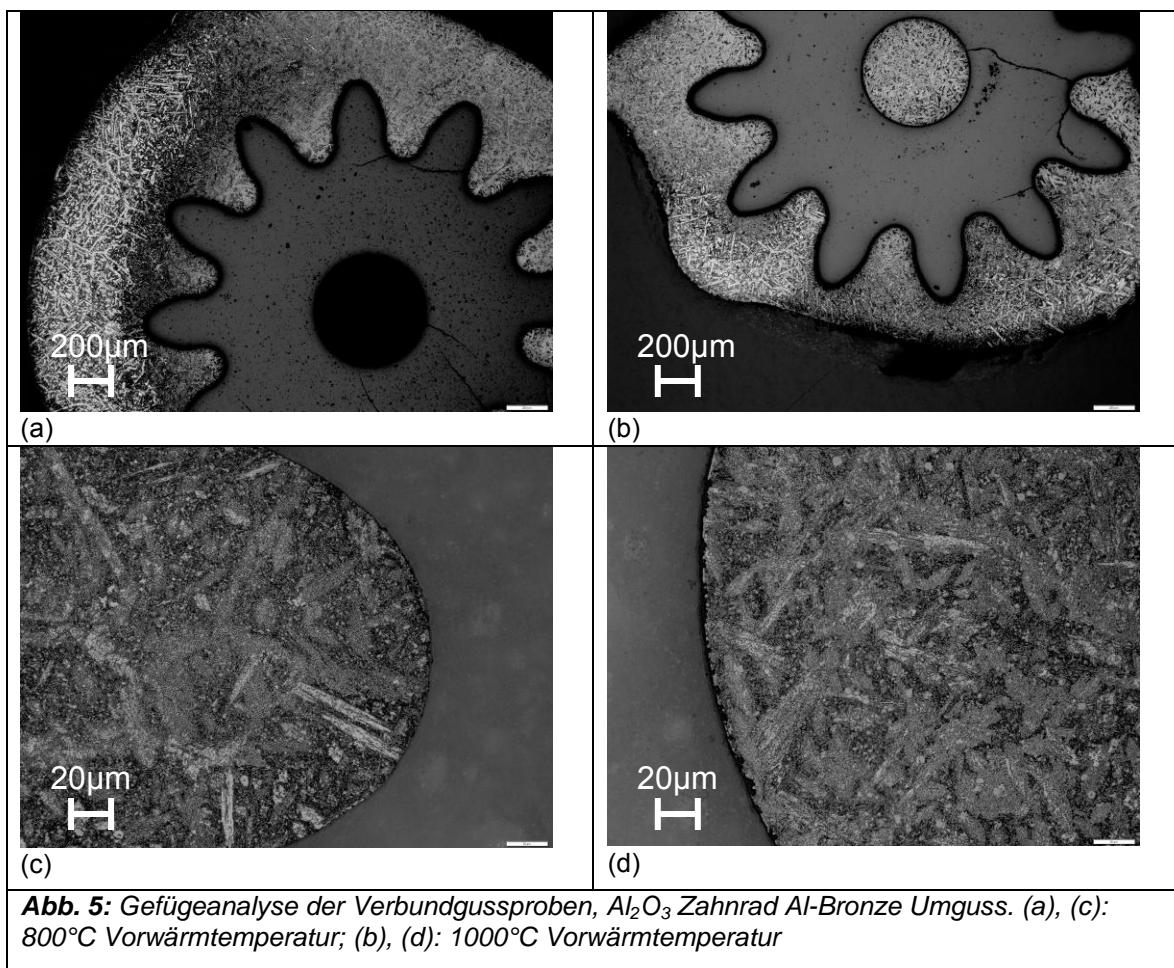
Verbundgussproben aus Aluminiumoxid-Aluminiumbronze und Zirkonoxid-Aluminiumbronze

Gefügeanalyse:

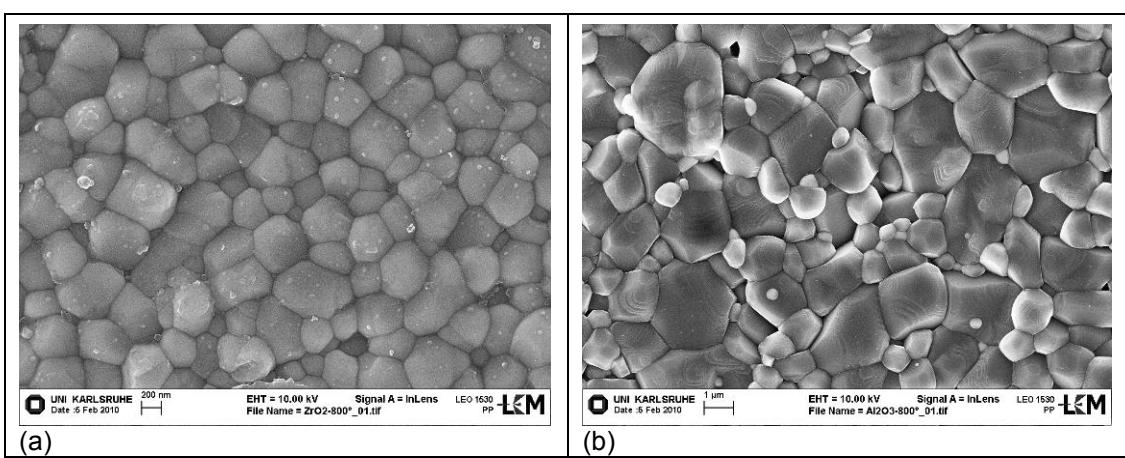
Im Rahmen der Arbeiten zum Mikro-Verbundguss wurden in Teilprojekt D1 Musterbauteile bestehend aus Keramikzahnrädern (Al_2O_3 , ZrO_2), die mit Aluminiumbronze umgossen wurden (Abb. 5), untersucht. Ziel war die Ermittlung des Einflusses der Prozessparameter und des Gießverfahrens (Vakuumdruckguss, Schleuderguss) auf die Qualität des Umgusses, das Gefüge und den Eigenspannungszustand in den Testproben.

Für die Gefügeanalyse der Aluminiumbronze wurden zwei umgossenen Proben eingebettet (Demotec 20), poliert und mit Ferrinitrat (10%) angeätzt. Die zu beobachtenden Risse in den Zahnrädern stammen von der Präparation, ebenso das Fehlen der Aluminiumbronze innerhalb des Zahnrads in Abb. 5 (a).

Bei der Herstellung der Proben wurde jeweils die Vorwärmtemperatur der Gussform variiert (800°C und 1000°C), was die Abkühlgeschwindigkeit der Schmelze und somit die Gefügeausbildung beeinflussen kann. Bei beiden Proben ist die typische, nadelförmige Gestalt der α -Phase (helle Bereiche) zu erkennen. Tendenziell ist in der Probe, die unter Verwendung einer Vorwärmtemperatur von 800°C gefertigt wurde, ein höherer Anteil an der dunkleren β -Phase vorhanden (Abb. 5 c und d). Es ist unsicher, ob dies den unterschiedlichen Abkühlbedingungen zugeschrieben werden kann. Wie im Falle der Mikrozugproben aus Aluminiumbronze zu beobachten war, besteht grundsätzlich die Möglichkeit einer nicht homogenen Legierungszusammensetzung bedingt durch die Zusammensetzungstoleranz des kommerziell erhältlichen Materials.



An einzelnen, nicht umgossenen Keramikzahnrädern derselben Charge, wie sie für die Verbundgussproben verwendet wurden, wurde ebenfalls eine Gefügeanalyse durchgeführt. Die mit einer Schicht von 5 nm Platin besputterten, ansonsten aber nicht präparierten Proben, konnten mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops hinsichtlich ihrer mittleren Korngroße analysiert werden (**Abb. 6**). Mittels Linienschlittverfahren wurde der mittlere Korndurchmesser beim Al_2O_3 -Zahnrad zu 1,589 µm, bei dem aus ZrO_2 zu 0,418 µm bestimmt.



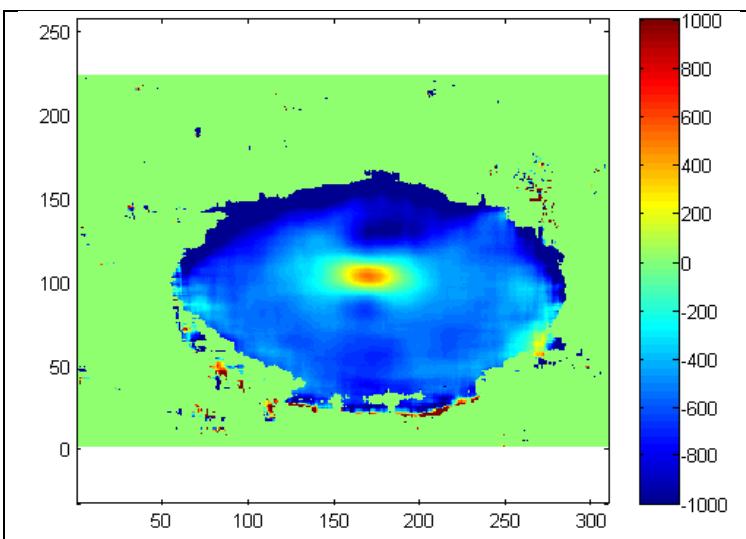
Eigenspannungsanalyse mittels MaXIm:

Abb. 7: Eigenspannungsanalyse des umgossenen Al_2O_3 Zahnrads mit MaXIm. Eigenspannungen in MPa, Messrichtung vertikal

An einer Probe derselben Charge (Al_2O_3 -Zahnrad, Al-Bronze Umguss, Vorwärmtemperatur 1000°C) wurden an der G3 Beamlne am HASYLAB/DESY in Hamburg Eigenspannungsanalysen mittels des MaXIm-Aufbaus durchgeführt. Wie bereits in früheren Förderphasen gezeigt ist eine Eigenspannungsanalyse an Mikroproben aus ZrO_2 grundsätzlich möglich [Kas05]. Die Auswertung der Messdaten ergab im vorliegenden Fall, dass bei den bislang untersuchten Proben ohne mechanische Nachbearbeitung der Oberflächen im Rahmen der Messgenauigkeit der durchgeföhrten Untersuchungen Eigenspannungen in der Größenordnung um 0 MPa bestimmt wurden.

Es ist jedoch aufgrund der schwachen Kornstatistik (lokale Korngrößenverteilung) bei Proben dieser Größenordnung aus Al_2O_3 eine Eigenspannungsanalyse mittels Röntgendiffraktometrie nicht ohne eine zusätzliche Rotation der Proben um die Symmetrie-

achse des Zahnrads möglich. Diese Vorgehensweise erfolgt allerdings zu Lasten der experimentell erreichbaren Ortsauflösung. Im Hinblick auf die Rotation der Proben ist es unumgänglich, Drehachse und Symmetrieachse möglichst deckungsgleich anzutragen. Zusätzlich wurde die Messung im Ω -Modus bei vier unterschiedlichen Positionen in χ durchgeführt ($\chi = 0^\circ - 4,5^\circ$; $\Delta\chi = 1,5^\circ$) und die mit MaXIm erhaltenen Bilder für jeden Schritt in 2θ über die vier χ Winkel gemittelt. Auch diese Vorgehensweise erfolgte zur Erhöhung der lokalen Kornstatistik. Im Experiment wurde bei Röntgenwellenlängen im Bereich von $\text{MnK}\alpha$ -Strahlung die Lage der Beugungspeaks der $\{116\}$ -Ebenen im Bereich von $81,3^\circ \leq 2\theta \leq 82,2^\circ$ mit einer Schrittweite in 2θ von $\Delta 2\theta = 0,03^\circ$ ermittelt. Die Distanzwinkel (Verkippung der Probe) wurden zwischen $\omega = 40,85^\circ - 5,677^\circ$ in insgesamt sieben Schritten variiert.

An das über die erhaltenen Bilder ermittelte Intensitätsprofil an jedem Bildpunkt wurden mittels der Bildverarbeitungssoftware IDL eine Gauß-Kurve angepasst und so die jeweilige Peakposition der Röntgeninterferenzlinien in 2θ als Funktion des Orts auf der Probenoberfläche ermittelt. Eine Auswertung Eigenspannungen unter Verwendung des $\sin^2\psi$ -Verfahrens ergab eine Verteilung der Eigenspannungen in der Keramik wie sie in **Abb. 7** dargestellt ist. Die in vertikaler Richtung geringfügig verzerrte Gestalt des Bauteils ist in der Anordnung der Probe gegenüber dem MaXIm-Detektor begründet (Projektion der gegenüber der Kameraachse verkippten Probe). Die Auflösung der Messung wird durch die maximale Verzerrung bei $\omega = 5,677^\circ$ bestimmt. Die Bereiche, in welchen die Rotationssymmetrie gebrochen scheint, röhren von der Drehung der Probe um die Symmetrieachse her. Offensichtlich erfüllen einzelne Körner die Braggsche Beugungsbedingung nur für spezielle Kombinationen der Goniometerwinkel χ und φ .

Über den Großteil der Probe liegt ein Druckeigenspannungszustand in radialer, sowie in tangentialer Richtung bezüglich des Zahnrads vor (**Abb. 7**). In dem Bereich außerhalb und innerhalb dieses Druckspannungsbereichs liegt jeweils Al-Bronze vor, welche bei der verwendeten Wellenlänge und den berücksichtigten Beugungswinkel keinen Reflex aufweist. Die in der Probenmitte vorliegende Zugeigenspannung beruht offensichtlich auf einem Artefakt infolge der Datenanalyse (Fitting).

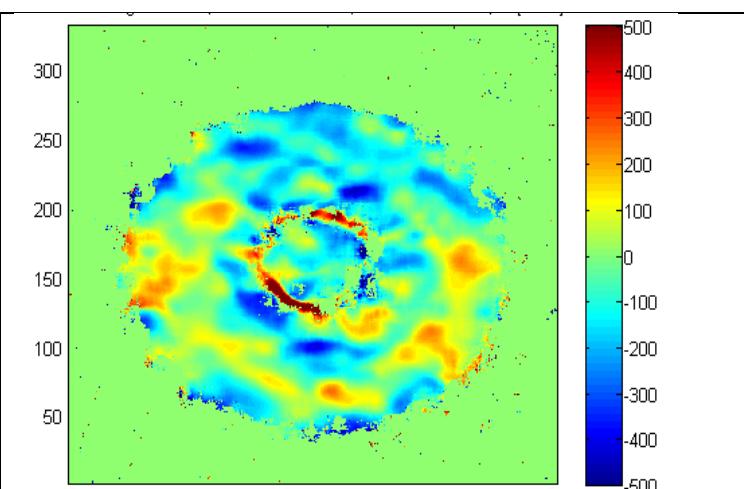


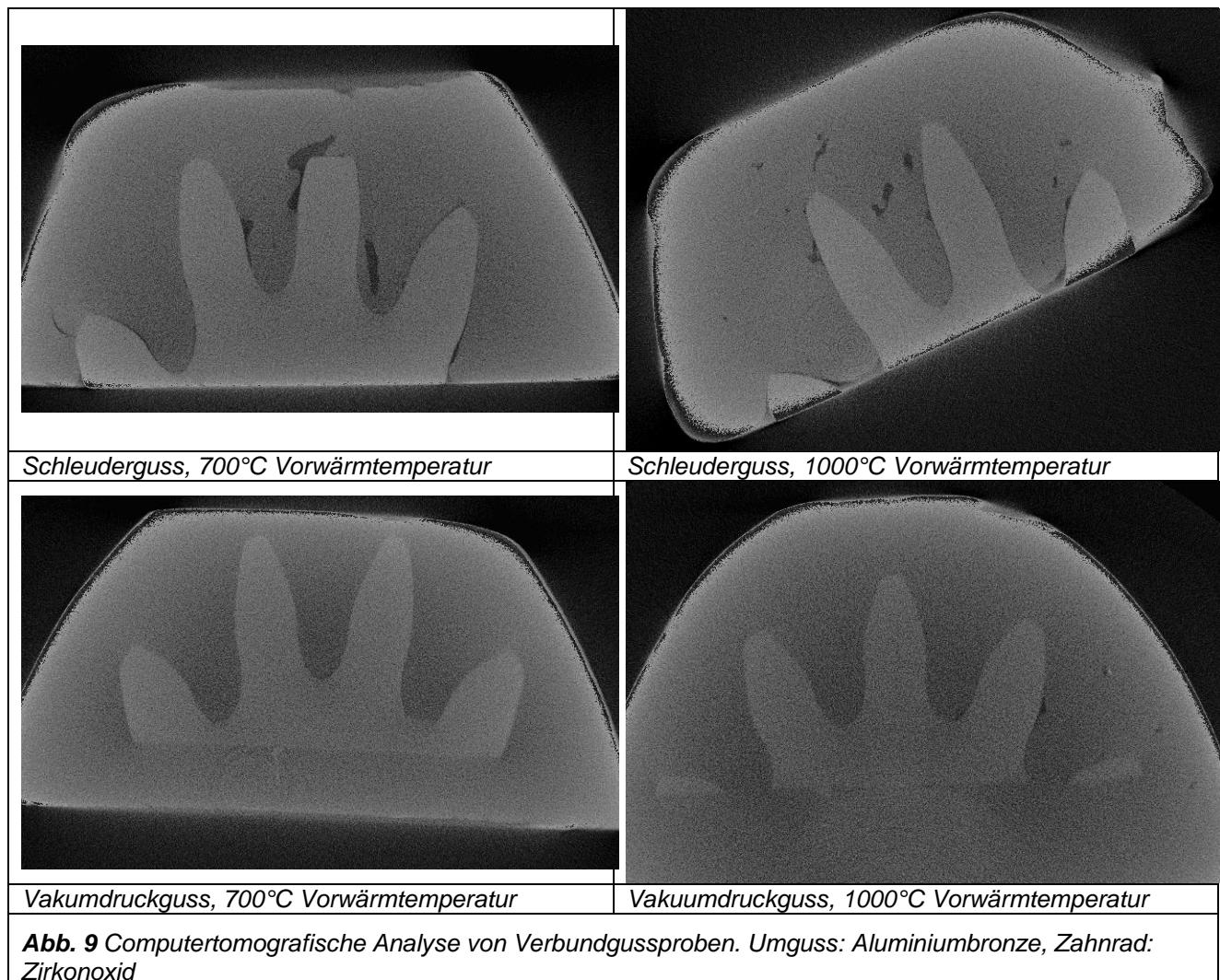
Abb. 8: Eigenspannungsanalyse in Aluminiumbronze Umguss

Bei derselben Wellenlänge wurde auch eine Messung an dem Umguss aus Aluminiumbronze, an den {220}-Ebenen der Kupfermatrix vorgenommen. Der Messbereich in 2θ betrug $107,4^\circ \leq 2\theta \leq 108,9^\circ$ mit einer Schrittweite von $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$. Die Auswertung (**Abb.8**) weist eine deutliche Fluktuation der Eigenspannungen über die Bauteiloberfläche auf, mit Variationen von verhältnismässig hohen Zug- bis zu hohen Druckeigenspannungen. Die z. T. starken lokalen Schwankungen der Daten sind in der unzureichenden Kornstatistik aufgrund der Grobkörnigkeit des Umguss-Materials begründet.

Computertomografische Untersuchungen

Im Laufe der Prozessoptimierung wurden Verbundgussproben mit Hilfe eines μ -Computertomografen untersucht, um Poren und Einschlüsse in der Probe zu lokalisieren und die Qualität der Fügezone zu charakterisieren. Eine μ -CT-Analyse bietet sich hierzu an, da zunächst eine Beurteilung des Prozesses an sich im Vordergrund stand. Durch Betrachten des gesamten Probenvolumens ist diesbezüglich eine bessere bzw. einfachere Charakterisierung gewährleistet, als z.B. bei einer metallografischen Analyse im ebenen Anschnitt des Bauteils.

Die Untersuchungen wurden an einem μ -CT der Fa. YXLON unter Verwendung eines verhältnismässig kleiner Fokus (Transmissionsröhre) mit einer Beschleunigungsspannung von 140 kV bei einem Strom von 0,02 mA durchgeführt. Der Abstand zwischen Probe und Strahlungsquelle betrug 6 mm, der Abstand zwischen Detektor und Probe 669,3 mm. Diese Abbildungsbedingungen entsprechen einer etwa 118-fachen Vergrößerung. Die Auflösung der rekonstruierten Bilder betrug ca. 2 μm pro Voxel. Die Rekonstruktion selbst wurde mittels der Rekonstruktions-Software des μ -CT-Herstellers YXLON durchgeführt.



Die untersuchten Proben unterscheiden sich in dem Gießverfahren (Vakuumdruckguss und Schleuderguss). Zudem wurde die Vorwärmtemperatur der Gussform ($T_V=700^\circ\text{C}$ / $T_V=1000^\circ\text{C}$) variiert. Es zeigt sich, dass tendenziell bei den durch Vakuumdruckguss gefertigten Proben eine geringere Porendichte und eine höhere

Qualität des Umgusses vorliegen. Beim Schleuderguss ist hingegen zu beobachten, dass bei einer Vorwärmtemperatur von 700°C hauptsächlich Poren in der Fügezone entstehen, während bei $T_V=1000^\circ\text{C}$ die Poren eher inmitten der Aluminiumbronze angeordnet sind. Dies tritt beim Vakuumdruckguss mit $T_V=1000^\circ\text{C}$ ebenso, jedoch in geringerem Ausmaß auf (siehe **Abb.9**). Die unter Vakuumdruckguss gefertigte Probe mit einer Vorwärmtemperatur von 700°C ist im Rahmen der Messgenauigkeit des μ -Computertomografen weitgehend porenfrei.

Mik zugproben aus Aluminiumbronze:

Ziel dieser Förderphase im Teilprojekt D2 war es unter anderem, Prozess-Gefüge Eigenschaftsbeziehungen für die im SFB 499 verwendeten Materialien aufzustellen. Neben der Korrelation von mechanischen Eigenschaften mit gefügespezifischen Charakteristika erfordert dies jedoch auch einen stabilen Prozess, welcher reproduzierbare Ergebnisse gewährleistet. In der vergangenen Förderphase stellte gerade dies bei Aluminiumbronze ein Problem dar. Unterschiedliche Chargen mit identischen Herstellungsparametern wiesen teils gravierende Unterschiede in Korngröße und Phasenzusammensetzung auf (**Abb.10a**). Begründen lässt sich dies durch einen stark vergrößerten Einfluss der Angussform auf die Abkühlgeschwindigkeit der Proben. Aufgrund des im Vergleich zu Makroproben größeren Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen ist die Abkühlgeschwindigkeit der Proben zum Einen höher, zum Anderen kommt somit der gleichmäßigen Abkühlgeschwindigkeit aller Proben einer Charge eine größere Bedeutung zu.

Element (Ma.-%)	Al	Ni	Fe	Cu
DIN EN 17 665	8,5 – 11,0	4,0 – 6,0	2,0 – 5,5	Rest
Gemessen	9,95 – 10,14	4,58 – 4,65	4,45 – 4,61	Rest

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung der abgegossenen Aluminiumbronzelegierung

Die in **Abb. 10 a** dargestellten Gefügebilder stammen von unterschiedlichen Chargen Aluminiumbronze, mit nominell identischen Herstellungsparametern, gegossen unter Verwendung eines stabförmigen Angusses. Die Abbildungen zeigen deutlich, dass die Korngrößen der betrachteten Proben signifikant variieren. **Abb. 10 b** stellt im Vergleich dazu Stichproben aus ebenfalls nominell identischen Chargen dar, die mithilfe eines ringförmigen Angusses gefertigt wurden. Die Abbildungen lassen deutlich eine über die Proben gleichmäßige Korngröße erkennen.

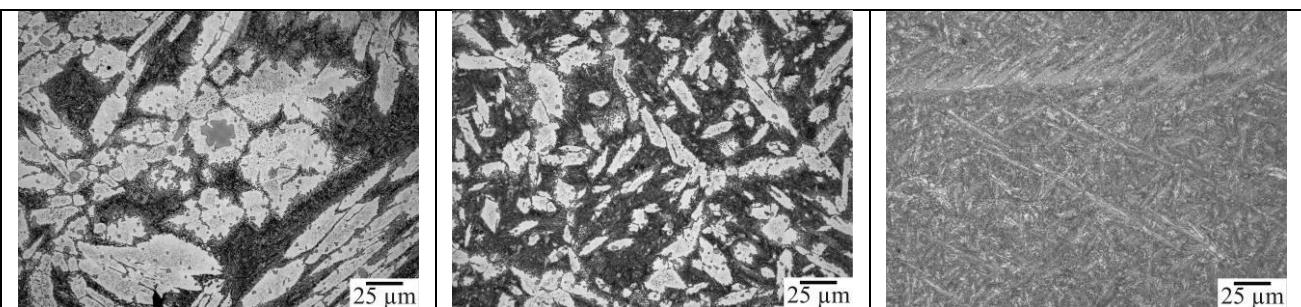


Abb. 10 a: Mik zugproben, Aluminiumbronze, stabförmiger Anguss

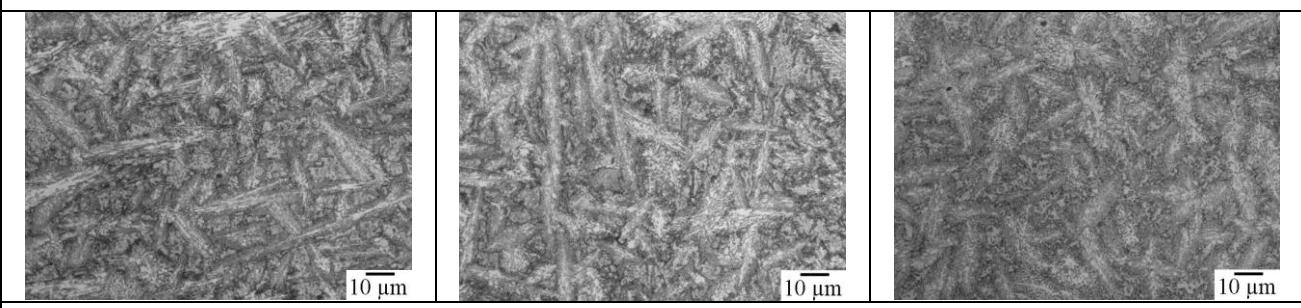


Abb. 10 b: Mik zugproben, Aluminiumbronze, Vorwärmtemperatur 1000°C, ringförmiger Anguss

Eine weitere, allerdings noch nicht genauer untersuchte Erklärung für die Schwankungen im Gefüge könnten lokale Inhomogenitäten der Legierungszusammensetzung sein. Die Zusammensetzung der Aluminiumbron-

zelegierungen ist genormt. Somit sollten die Toleranzbereiche (**Tabelle 5**) für Mikroproben eventuell strikter ausgelegt werden, um die Reproduzierbarkeit der Gefügeausbildung zu erhöhen.

2C- μ PIM Proben Al_2O_3 - ZrO_2 :

Ein weiteres Teilziel in der letzten Förderphase war die Eruierung des Potenzials des 2-Komponenten-Mikropulverspritzgießens für die Herstellung zweikomponentiger Systeme. Die wissenschaftlichen Grundlagen dafür sollten anhand einer Welle-Nabe Verbindung erarbeitet werden, wobei gezeigt werden sollte, dass sowohl feste als auch bewegliche Verbindungen mittels 2C- μ PIM realisiert werden können. Neben dem geeigneten Werkzeug sind hierfür vor allem auch passende Materialpaarungen ausschlaggebend, die spezielle Randbedingungen erfüllen müssen.



Abb. 11: 2C- μ PIM im Längsschliff, fester Verbund, Weißlichtmikroskopische Aufnahme

Für bewegliche Verbindungen muss die Welle, welche aus Aluminiumoxid bestehen soll, bei niedrigeren Temperaturen beginnen zu schwinden und insgesamt ein höheres Schrumpfmaß aufweisen, als das Zahnrad aus Zirkonoxid, was ein Freisintern ermöglicht. Feste Verbindungen hingegen erfordern ein identisches Schrumpfmaß der beiden Komponenten. Es besteht ansonsten die Gefahr des Aufbrechens der Verbindung an der Grenzfläche nach dem Sintern bzw. der Ausbildung hoher Eigenspannungen, die das Risswachstum fördern und zum vorzeitigen Versagen des Bauteils führen könnten. Die Prozessparameter müssen hierfür an die jeweilige Verbindungsvariante angepasst werden, ebenso stellen der Pulverfüllgrad der Formmasse und die Auswahl der Keramikpulver weitere Variablen dar. Die Arbeiten im Teilprojekt D1 trugen dazu bei, geeignete Parameter für den 2C- μ PIM Prozess zu ermitteln. Im Fokus dabei standen vor allem feste Verbindungen.

In **Abb. 11** ist eine Aufnahme mit einem Weißlichtmikroskop von einem Längsschliff einer 2-Komponentenprobe dargestellt. Neben den Rissen in der Al_2O_3 -Welle sind dort weiße Schlieren zu erkennen, welche mittels EDX-Analyse als zirkonhaltig identifiziert werden konnten und sehr wahrscheinlich aus dem ZrO_2 -Zahnrad stammen. Um beurteilen zu können, ob die Risse und auch die Verteilung des Zirkonoxids während des Sinterns oder bereits vorher stattfindet, wurde sowohl eine gesinterte Probe als auch eine Probe im Grünkörperzustand computertomografisch untersucht. Querschnitte der untersuchten Proben sind in **Abb. 12** zu erkennen.

Die Messungen wurden ebenfalls mit dem am IAM-WK verfügbaren μ -Computertomografen der Firma YXLON bei einer Beschleunigungsspannung von 100 kV bzw. 90 kV für den Grünkörper durchgeführt. Die Auflösung beider Messungen beträgt ca. 1 μm pro Voxel. Die Rekonstruktion erfolgte mit der YXLON-Rekonstruktions-Software, die grafische Bearbeitung der Ergebnisse erfolgte mittels der Software Avizo Fire 6.3.

ZrO_2 verfügt bei der verwendeten Röntgenstrahlung über eine höhere Absorption als Al_2O_3 und wird in der Rekonstruktion daher heller dargestellt (weiße Bereiche). Der umgebende schwarze Bereich ist Luft, ebenso die schwarzen Bereiche innerhalb der Probe, wobei es sich um Risse handelt (**Abb. 12** links). Bei dem Grünkörper (**Abb. 12** rechts) sind teilweise Bereiche in der Welle vorhanden, an denen weniger Strahlung in Al_2O_3 absorbiert wird. Dies ist ein Indiz dafür, dass dort weniger des Al_2O_3 -Pulvers vorhanden ist, eine Aussage wie viel Binder an diesen Stellen vorliegt, kann an dieser Stelle jedoch nicht gemacht werden, da die Absorption des Bindermaterials nicht bekannt ist. Die Messungen demonstrieren jedoch eindeutig, dass sich das Zirkonoxid bei den verwendeten Herstellungsparametern bereits beim Spritzgießen der Rohmasse in der Welle ausbreitet hat.

Insgesamt zeigen die dargestellten Ergebnisse, dass im Rahmen der Untersuchungen im Sonderforschungsbereich 499 anspruchsvolle Charakterisierungsaufgaben durch Anpassung der Methoden auf die Anwendung im Mikrobereich erfolgreich durchgeführt werden konnten. Durch die Kooperation mit den weiteren Teilprojekten ist es auf diese Weise gelungen, wesentliche neue Einblicke in die Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Mikrokomponenten zu gewinnen.

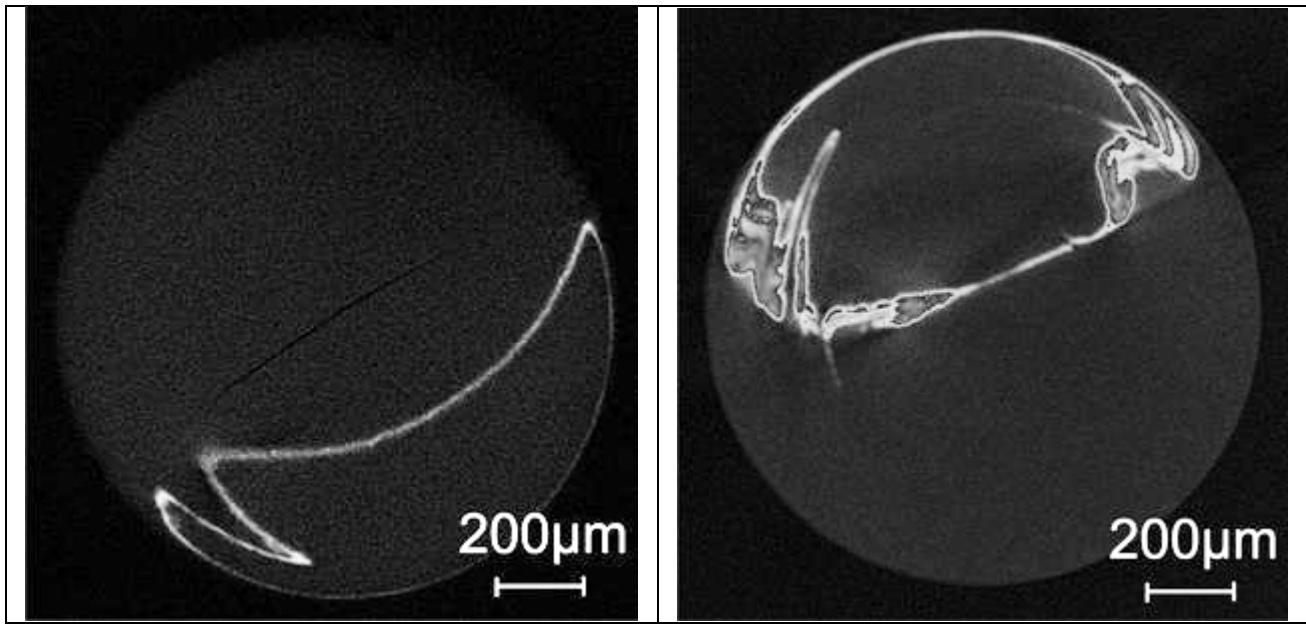


Abb. 12: Computertomografische Aufnahmen zweier 2C- μ PIM Proben (links): Al_2O_3 -Welle, gesinterte Probe (rechts): Al_2O_3 -Welle, Grünkörper

Literatur:

- [KAS05] B. Kasanická, Th. Wroblewski, V. Schulze, D. Löhe: Analysis of residual stresses in slip cast and micro injection moulded microcomponents made of zirconia; ICRS 7, Xian-China 2004, In: Materials Science Forum Vols. 490-491, pp. 503-508, July 2005.
- [MüC94] F. Mücklich, S. Hartmann, M.J. Hoffmann, G.A. Schneider, J. Ohser, G. Petzow: Quantitative Description of Si_3N_4 Microstructures, Key Engineering Materials Vols. 89-91 (1994) pp. 465-470
- [MüI09] M. Müller, W. Bauer, R. Knitter: Processing of micro-components made of sintered reaction-bonded silicon nitride SRBSN. Part 1: Factors influencing the reaction-bonding process. Ceramics International, 35, 2577 – 2585 (2009)
- [MüI10] M. Müller, J. Rögner, B. Okolo, W. Bauer, R. Knitter: Processing of micro-components made of sintered reaction-bonded silicon nitride SRBSN. Part 2: Sintering behaviour and micro-mechanical properties. Ceramics International, 36, 707-717 (2010)
- [Ohs00] J. Ohser, F. Mücklich: Statistical Analysis of Microstructures in Materials Science, John Wiley & Sons Ltd. (2000)
- [Rög11] J. Rögner: Mechanische Eigenschaftenurgeformter Mikroproben aus CuAl10Ni5Fe4 , ZrO_2 und Si_3N_4 , Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker Verlag GmbH, Aachen (2011)

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

- a) Arbeiten in Publikationsorganen mit wissenschaftlichen Qualitätssicherung, und Buchveröffentlichungen
- [1] B. Kasanická, B. Okolo, G. Baumeister, M. Auhorn, T. Beck, A. Wanner, J. Haußelt, D. Löhe, V. Schulze: On the relationship between microcasting process, material states and mechanical properties in the gold alloy Stabilor® G, Materials Science and Engineering A 501 (2009) S. 70 – 80
 - [2] H. Autenrieth, B. Okolo, V. Schulze, A. Wanner: Surface workhardening and residual stresses induced by micro cutting processes, Advances in X-ray Analysis Vol. 52, (2009), S. 608 – 615
 - [3] M. Müller, J. Rögner, B. Okolo, W. Bauer, R. Knitter: Processing of micro-components made of sintered reaction-bonded silicon nitride (SRBSN). Part 2: Sintering behaviour and micro-mechanical properties, Ceramics International 36 (2010) S. 707 – 717

b) Andere Veröffentlichungen

- [4] J. Rögner, B. Okolo, J. Schneider, K.-H. Lang, A. Wanner, V. Schulze: Charakterisierung und Prüfung von Mikrobauteilen. In: F. Vollertsen, S. Büttgenbach, O. Kraft, W. Michaeli (Hrsg.): 4. Kolloquium Mikroproduktion. Bias Verlag, Bremen ISBN: 978-3-933762-32-0 (2009), S. 105 – 110
- [5] J. Rögner, M. Müller, B. Okolo, E. Kerscher, A. Wanner, V. Schulze: Microstructure and mechanical properties of micro sized silicon nitride specimen produced by hot molding, Proceedings ISNT 2009, 6th International Conference on Nitrides and Related Materials, March 15-18, 2009, Karlsruhe, S. 106 - 107
- [6] B. Okolo, J. Rögner, E. Kerscher, T. Beck, V. Schulze, A. Wanner, D. Löhe: Size Effects in Aluminum Bronze Cast Specimens. In: Bernd Michel, Klaus-Dieter Lang (Eds.): Smart Systems Integration and Reliability. Honorary volume on the occasion of Herbert Reichl's 65th birthday. Goldenbogen Verlag, Dresden, 2010, S. 740-749, ISBN 978-3-932434-77-8

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit 01.01.2000 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1	Wanner, Alexander, Prof. Dr.rer.nat. Dipl.-Ing.	WK, SSA	IAM-WK	4	
	2	Löhe, Detlef, Prof. Dr.-Ing.	WK	IAM-WK	1	
	3	Schulze, Volker, Prof. Dr.-Ing. habil.	FuB	IAM-WK	2	
	4	Dr.-Ing. Jens Gibmeier	WK, SSA	IAM-WK	4	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	5	Reif, A.		IAM-WK	4	
	6	Reich, W.		IAM-WK	6	
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	7	Okolo, Brando, Dr.	WK	IAM-WK	39,5	
	8	Maisenbacher, Jens	WK, SSA	IAM-WK	39,5	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	9	Föll, Florian		IAM-WK	19,75	
	10	Ohl, Adelheid		IAM-WK	19,75	

WK = Werkstoffkunde, SSA = Struktur- und Spannungsanalyse, FuB = Fertigung u. Bauteilverhalten, GE = Gefüge und Eigenschaften, Phys. = Physik, mach = Maschinenbau

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

- 1 Prof. Dr.rer.nat. Dipl.-Ing. Alexander Wanner, Sprecher der Kollegialen Leitung des Instituts für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde; Leiter des Teilprojekts,
- 2 Prof. Dr.-Ing. Detlef Löhe: Leiter des Teilprojektes
- 3 Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze: Akademischer Oberrat und Leiter der Abteilung Fertigung und Bauteilverhalten,
- 4 Dr.-Ing. Jens Gibmeier: Wissenschaftlicher Leiter der Abteilung Struktur und Spannungsanalyse am IAM-WK
- 5 Alexandra Reif (Metallographin): Mitarbeiterin im Metallographischen Labor,
- 6 Werner Reich (Techniker): Mitarbeiter in der Mechanischen Werkstatt.

Die unter 1 bis 6 aufgeführten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind im Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde beschäftigt und werden aus der Grundausstattung finanziert. Sie können jeweils nur in einem beschränkten Umfang für das geplante Forschungsvorhaben eingesetzt werden.

Prof. Wanner und Prof. Schulze greifen insbesondere koordinierend ein, leiten den aus der Ergänzungsausstattung beantragten wissenschaftlichen Angestellten zur wissenschaftlichen Arbeit an und stellen ihren Erfahrungsschatz für das Teilprojekt zur Verfügung. Frau Reif ist als Metallographin im metallographischen Laboratorium tätig und unterstützt den aus der Ergänzungsausstattung beantragten technischen Angestellten bei und mit metallographischen Arbeiten zur Bewertung der Probekörper und Mikrobauteile. Herr Reich ist in der mechanischen Werkstatt als Facharbeiter tätig und unterstützt den aus der Ergänzungsausstattung beantragten technischen Angestellten bei und mit mechanischen Arbeiten im Bereich des Vorrichtungsbau.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

7 Dr.rer.nat. Brando Okolo (Wissenschaftlicher Mitarbeiter, E13Ü):

Dieser wissenschaftliche Mitarbeiter war im Zeitraum Januar 2009 bis Juli 2009 zuständig für die im Teilprojekt vorzunehmenden Weiterentwicklungen der Versuchseinrichtungen insbesondere für die mechanischen und thermischen Nachbehandlungsschritte, die Beschaffung der Proben, die Planung, Durchführung und Auswertung der Versuche und der begleitenden Untersuchungen sowie die wissenschaftliche Aufarbeitung der Ergebnisse. Neben der Bearbeitung des Teilprojekts koordinierte er die Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten des SFBs und übernahm die Präsentation der Ergebnisse auf Vortragsveranstaltungen, bei Konferenzen und im Rahmen von Veröffentlichungen.

8 Dipl.Phys. Jens Maisenbacher (Wissenschaftlicher Mitarbeiter, E13):

Dieser wissenschaftliche Mitarbeiter war im Zeitraum August 2009 bis Dezember 2011 zuständig für die im Teilprojekt vorzunehmenden Werkstoffanalysen insbesondere für die Anpassung der angewandten Analysemethoden auf die Fragestellung. Hierzu zählen Weiterentwicklungen der Analysemethoden / Instrumentierungen sowie die Durchführung und Auswertung der Versuche und der begleitenden Untersuchungen sowie die wissenschaftliche Aufarbeitung der Ergebnisse. Er koordinierte die Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten des SFBs und übernahm die Präsentation der Ergebnisse auf Vortragsveranstaltungen, bei Konferenzen und im Rahmen von Veröffentlichungen.

9 A. Ohl

Frau Ohl ist als Metallographin im metallographischen Laboratorium tätig und unterstützte im Zeitraum Januar 2011 bis Dezember 2011 die aus der Grundausstattung finanzierten technischen Angestellten (Frau Reif) bei und mit metallographischen Arbeiten zur Bewertung der Probekörper und Mikrobauteile.

10 W. Reich

Dieser technische Mitarbeiter ist in der mechanischen Werkstatt als Facharbeiter tätig und unterstützte im Zeitraum Januar 2009 bis Dezember 2010 den aus der Grundausstattung finanzierten technischen Angestellten Herrn Reich bei und mit mechanischen Arbeiten im Bereich des Vorrichtungsbau.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt D2

5.1.1 Titel

Mikromechanische Kennwerte – Verhalten von Mikroproben und -bauteilen unter quasistatischen und zyklischen, ein- und mehrachsigen Beanspruchungen

Micromechanical Properties – Behaviour of Micro Specimens and Micro Parts at Quasistatic and Cyclic, Uni- and Multiaxial Loadings

5.1.2 Projektleitung

Lang, Karl-Heinz, Dr.-Ing., geb. 16.03.1955, deutsch
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde (IAM-WK)
Campus Süd
Engelbert-Arnold-Straße 4
D-76128 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608 - 42605
E-Mail: karl-heinz.lang@kit.edu

Kraft, Oliver, Prof. Dr. rer. nat., geb. 04.11.1964, deutsch
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Angewandte Materialien – Werkstoff und Biomechanik (IAM-WBM)
Campus Nord

Telefon: 0721 / 608 - 24815
E-Mail: Oliver.Kraft@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

5.2.1.1 Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragsstellung

Im Folgenden wird zunächst ein kurzer Überblick über den Kenntnisstand auf den in Teilprojekt D2 für die aktuelle Förderphase als neue Aspekte vorgesehenen Gebieten der lokalen Eigenschaftsmessung mittels Indenterversuchen, bauteilnahe Beanspruchung mit Bezug auf Werkstoffverhalten unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen sowie der komplizierten mehrachsigen Beanspruchung gegeben.

Lokale Eigenschaftsmessung

Zum Nachweis und zur Quantifizierung von lokalen Streuungen der mechanischen Eigenschaften – sowohl ungewünschter durch die Herstellung bedingter als auch gezielt eingestellter – bieten sich registrierende Häremessungen im Submikrometerbereich (Nanoindentation) [OLI92] an, da mit dieser Methode die Eigenschaften mit einer lateralen Auflösung im Mikrometerbereich erfasst werden können, z.B. [KRA01]. Dabei hat sich die Nanoindentation in den letzten Jahren von einer experimentellen Methode zu einem normierten Standardverfahren entwickelt [ISO 14577-1 bis -4]. Durch die Kombination mit Finite Element Simulation gelingt es außerdem quantitativ das Spannungs-Dehnungsverhalten eines metallischen Werkstoffs aus den Indentationskurven zu gewinnen, z.B. [SCH04] [HUB06]. Hierbei werden verschiedene Spitzengeometrien oder sphärische Eindringkörper verwendet.

Bauteilnahe Beanspruchung mit Bezug auf Werkstoffverhalten unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen

Zahnradern, die im LIGA-Verfahren aus Nickel hergestellt wurden, zeigten im nicht nachbearbeitet Herstellungszustand einen höheren Widerstand gegenüber einem korrosiven Angriff in Luft bzw. in wässriger Lösung als im polierten Zustand [WAL05]. Die getesteten Nickel-Zahnräder mit einem Durchmesser von 1,8 mm wiesen herstellungsbedingt drei unterschiedliche Oberflächenzustände auf. Hierbei zeigte die Ni-Oberfläche aus dem LIGA-Prozess einen deutlich besseren Korrosionswiderstand als nach einer mechanischen Bearbeitung.

schen Politur. Dies wird mit einer Änderung der Oberflächeneigenschaften während des Polierprozesses zurückgeführt.

Der Einfluss einer 3,0 % NaCl-Lösung auf das quasistatische und zyklische Rissausbreitungsverhalten von $50 \times 30 \times 30 \mu\text{m}^3$ großen Mikroproben aus Nickel wurde in [WAN07] untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Korrosion besonders die Oberflächen im Bereich der Kerbe angreift, weil dort die höchste Zugspannung auftreten. Oberflächenfehler und –rauheit setzen den Korrosionswiderstand von metallischen Mikroproben stärker herab als bei Makrobauteilen.

Die Untersuchungen von [KAH08] zeigen den Einfluss von Feuchtigkeit auf die Dicke der Oxidationsschicht von Polysiliconfilmen und den hieraus resultierenden Effekt auf die Risszähigkeit. Es wird berichtet, dass das untersuchte Material ab einer Oxidschichtdicke von 45 nm gegen Spannungsrißkorrosion anfällig wird.

Den Einfluss von kathodischer Korrosion auf polykristallines Silizium untersucht [HON08]. Die $80 \times 300 \mu\text{m}^2$ großen Folien (Anode und Kathode) wurden in Abständen von 2 bis 80 μm zueinander mit Spannungen bis 100 V beaufschlagt und bei einer relativen Feuchte von 57 % getestet. Die Mikroproben zeigten ein gegenüber Makroproben verändertes Korrosionsverhalten, woraus ein deutlicher Einfluss von Umgebungsmedien auf das Verhalten von MEMS-Bauteilen abgeleitet wurde.

Das Ermüdungsverhalten von Mikrobauteilen aus elektrolytisch abgeschiedenem Nickel wurde in [BOY04] unter Bedingungen untersucht, bei denen Oberflächenoxidation auftritt. Die Proben hatten einen Messbereich von $800 \times 250 \times 26 \mu\text{m}^3$ und wurden in einer Form aus PMMA hergestellt. Bei den zyklischen Versuchen mit einer Frequenz von 20 Hz wiesen die Bereiche mit starken Intrusionen und Extrusionen von aktiven persistenten Gleitbändern bis zu 100 mal dickere Oxidschichten auf als die Bereiche ohne plastische Verformungsspuren. In den stark oxidierten Bereichen initiierten Ermüdungsrisse. Der Ausschluss von Sauerstoff erhöhte die Lebensdauer der Proben um bis zu einer Größenordnung. Im Gegensatz dazu zeigten Ermüdungsversuche an Cu-Schichten, die 3 μm und dünner waren, keine verstärkte Bildung von Oxidschichten und keinen Einfluss der Oxidation auf das Lebensdauerverhalten [SCH03].

In [KRU05] wird von quasistatischen und zyklischen Rissausbreitungsversuchen an Aluminiumoxid unter dem Einfluss von Feuchtigkeit berichtet. Die Untersuchungen zeigen deutlich, dass die intrinsische Festigkeit dieser Keramik durch Luftfeuchtigkeit um ca. 30 % im Vergleich zu Versuchen in trockener Stickstoffatmosphäre absinkt. Für Anrisse mit Startlängen von 20 bis 60 μm wurde bedingt durch die Feuchtigkeit schnelleres Risswachstum und ein niedrigerer Schwellenwert für einsetzende Ermüdung festgestellt [KRU05].

Die sonstigen Untersuchungen zu Korrosion speziell für Aluminiumbronze beziehen sich im Allgemeinen auf die Entwicklung noch korrosionsbeständigere Legierungen [SIN92] bzw. das Korrosionsverhalten von makroskopischen Proben bzw. Bauteilen [ASH01].

Mehrachsige Beanspruchung

Das mechanische Verhalten von Mikroproben und -bauteilen wird überwiegend in quasistatischen und zyklischen Zug-, Biege- und - in deutlich geringerem Umfang – Torsionsversuchen ermittelt. Es liegen nur wenige Untersuchungen zu mechanischen Eigenschaften von Bauteilen mit typischen Abmessungen von einigen 100 μm (in allen drei Raumrichtungen) mit ingenieurwissenschaftlichem Interesse vor. Untersuchungen unter dreiachsigen oder komplexen mehrachsigen Beanspruchungen durch Überlagerung finden sich in der zugänglichen Literatur nicht. Es gibt lediglich eine Untersuchung, die für Aluminiumoxid und Siliziumnitrid einen Einfluss einer Torsionsbeanspruchung auf die Ermüdungslebensdauer beobachtet, der sich nicht mit der Normalspannungshypothese erklären lässt, sondern eine lebensdauerverkürzende Wirkung der Schubspannungskomponenten vermuten lässt [SCH07].

Aus diesem Grund besteht erheblicher Forschungsbedarf, um Aussagen über die mikrospezifischen Effekte bei überlagerten Beanspruchungen im Hinblick auf das Werkstoffverhalten und die Dimensionierung von Mikrokomponenten treffen zu können.

Das Ziel in der letzten Förderphase ist daher die mikrospezifische Charakterisierung von mikrourgeformten Proben und Bauteilen bei mehrachsiger Beanspruchung sowie die Untersuchung des Rissausbreitungsverhaltens bei quasistatischen und zyklischen Beanspruchungen. Die quantitative Analyse des Werkstoffverhaltens in kleinen Dimensionen und dessen wissenschaftliches Verständnis dienen als Grundlage für das mikrospezifische Dimensionierungskonzept.

Im Einzelnen werden folgende Forschungsziele verfolgt, wobei in erster Linie Proben aus ZrO_2 und Aluminiumbronze untersucht werden. Neu hinzu kommen Bauteile, die mit den beiden innovativen Herstellverfahren 2C- μ -PIM (TP C5) und Sinterfügen (C3) hergestellt wurden und Grenzflächen aus unterschiedlichen Werkstoffen aufweisen:

- Das Verformungs- und Versagensverhalten wird bei mehrachsigen Beanspruchungen analysiert. Zur Bewertung werden verschiedene Vergleichsspannungshypothesen betrachtet, mit denen gezielt der Einfluss der Mehrachsigkeit auf das Verformungs- und Versagensverhalten in Mikrodimensionen bewertet werden kann und ein breiteres Verständnis für die mikrospezifischen Versagensmechanismen geschaffen wird.

- Die Auswirkungen eines inhomogenen Gefüges auf die Variation der mechanischen Eigenschaften innerhalb von Mikroproben bzw. Bauteilen wird mittels registrierender Härtemessung eingehend untersucht. Dabei ist vor allem die Quantifizierung der Streuung der mechanischen Eigenschaften von besonderer Bedeutung, da auf das schwächste Glied ausgelegt werden muss.
- Das Bruchverhalten von ZrO_2 -Mikroproben wird untersucht. Hierzu werden Rissausbreitungsexperimente durchgeführt, auf denen ein Bewertungskonzept aufgebaut wird, das über die bisher bestehende Betrachtung mit Hilfe von Kerbformzahlen und Weibull-Statistik hinausgeht.
- Das zyklische Rissausbreitungsverhalten und die Risszähigkeit metallischer Mikroproben wird quantifiziert und sowohl bei quasistatischer als auch bei zyklischer Beanspruchung mit der Mikrostruktur korreliert.
- Die Beeinflussung insbesondere des Ermüdungsverhaltens durch eine zusätzliche Korrosionsbeanspruchung wird untersucht. Für Mikrobauteilen können solche Umgebungseffekte sehr wichtig sein, da auf Grund des großen Oberfläche/Volumen-Verhältnisses Korrosion noch stärkere Auswirkungen als in der Makrotechnik haben kann.
- Die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen, die im 2C- μ -PIM-Verfahren (TP C5) und durch Sinterfügen (C3) hergestellt werden, für die bislang nur eine exemplarische Charakterisierung möglich war, werden umfassend ermittelt. Dazu werden geeignete Methoden zur mechanischen Charakterisierung entwickelt, wie z.B. Push-Out-Versuche, mit denen die Grenzflächenfestigkeit an rotationsymmetrischen Welle-Nabe-Verbindungen ermittelt und die zyklische Beanspruchbarkeit der Fügeflächen charakterisiert werden kann.
- Die bisher erfassten Zusammenhänge werden für die Standardwerkstoffe ZrO_2 und Aluminiumbronze durch Daten für die vorstehend angesprochenen Beanspruchungsarten um für die Auslegung wichtige Werkstoffeigenschaften in Zusammenarbeit mit den TP A3, B1, C1 und C2 vervollständigt. Dabei werden Prozessführungen erarbeitet, die bei μ -Bauteilen aus keramischen Werkstoffen die gezielte Defektvermeidung und somit Steigerungen der Festigkeit ermöglichen. Die bei den oben beschriebenen Aufgabenfeldern erzielten Ergebnisse werden in Zusammenarbeit mit den abformenden Teilprojekten A3, C1, C2, C3 und C5, den charakterisierenden Teilprojekten D1 und D3 sowie dem mit der Qualitätssicherung befassten Teilprojekt C4 in Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen zusammengefasst, die in das von A1 erarbeitete Dimensionierungskonzept eingehen.

5.2.1.2 Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

Lokale Eigenschaftsmessung mittels Indenterversuchen

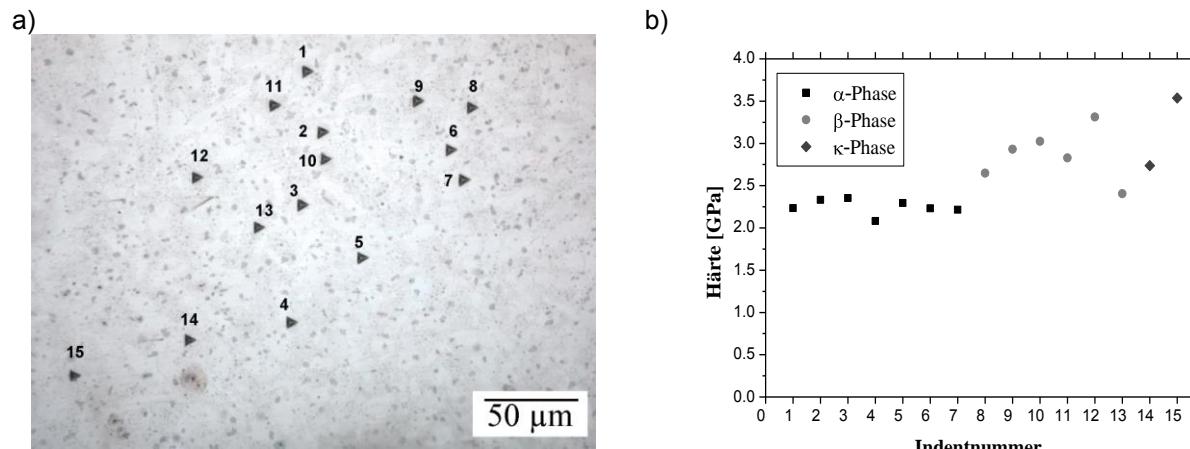


Abbildung 1: a) LM-Aufnahme der Nanoindentationen in Aluminiumbronze; b) Bestimmte Härte aus den einzelnen Indentationen

Zur genaueren Beschreibung der Einflüsse der einzelnen Phasenanteile, wurde die Härte der α -, β - und größerer κ_{II} -Phasen der Aluminiumbronze mittels Nanoindentation¹ ermittelt. Eine lichtmikroskopische Auf-

¹ Die Nanoindentationsmessungen wurden in Zusammenarbeit mit der Nachwuchsgruppe von Dr. C. Eberl am Institut für Angewandte Materialien (IAM-WBM) des KIT durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse sind bislang nicht veröffentlicht.

nahme der einzelnen Nanoindentationen zeigt Abbildung 1a). Die Härte der nummerierten Eindrücke wird in Abbildung 1b) gezeigt. Die Härten der Phasen $\alpha : \beta : \kappa_{\parallel}$ stehen in einem Verhältnis von 1 : 1,27 : 1,39, wobei nur zwei Härtemesswerte der κ_{\parallel} -Phase erfasst wurden. Die κ_{\parallel} -Ausscheidungen wurden bei der Indentation in die sie umgebende weichere α -Phase eingedrückt, wodurch die gemessene Härte gegenüber der tatsächlichen reduziert wird. Die Tendenz dieser Ergebnisse entspricht den Erwartungen, die aus dem Vergleich der Härte von einphasigen kubisch flächenzentrierten, feinen martensitischen und intermetallischen Phasen entspringen. Dieses Ergebnis korreliert mit den beobachteten Zusammenhängen zwischen den Mikrostrukturen und den mechanischen Eigenschaften. Es zeigt sich auch, dass die mikrostrukturellen Variationen im Vergleich zu den Bauteilabmessungen auf einer deutlich geringeren Längenskala auftreten und das Materialverhalten innerhalb des Bauteils deshalb als weitestgehend homogen angenommen werden kann.

Verformungs- und Versagensverhalten bei mehrachsiger Beanspruchung

Zur Ermittlung des Verformungs- und Versagensverhaltens bei mehrachsiger Beanspruchung wurde eine Mikrotorsionsprüfmaschine verwendet. Auf den Motor der Torsionsmaschine wurde ein Mikro-Harmonicdrive-Getriebe der Fa. Micromotion (Modell MHM-10-500-P-S-SPM0013) aufgesetzt, so dass eine Untersetzung von 500:1 realisiert wurde. Dadurch können bei Torsion Beanspruchungsgeschwindigkeiten erreicht werden, die ähnlich denen bei Zugversuchen bei Dehnaten von $d\varepsilon/dt = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ bis 10^{-3} s^{-1} liegen.

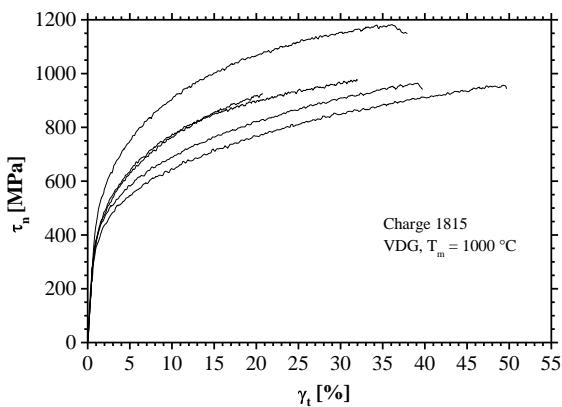


Abbildung 2: Nennschubspannung in Abhängigkeit der Totalscherung für Mikrotorsionsproben der Charge 1815 (VDG, $T_m = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Das Verformungs- und Versagensverhalten der Aluminiumbronze bei quasistatischer Torsionsbeanspruchung wurde an den drei unterschiedlichen Chargen 1814, 1815 und 1818 durchgeführt. Die Gefüge dieser drei Chargen sind ähnlich und weisen eine feinnadelige Struktur der α -Körner und fein verteilte κ -Teilchen auf.

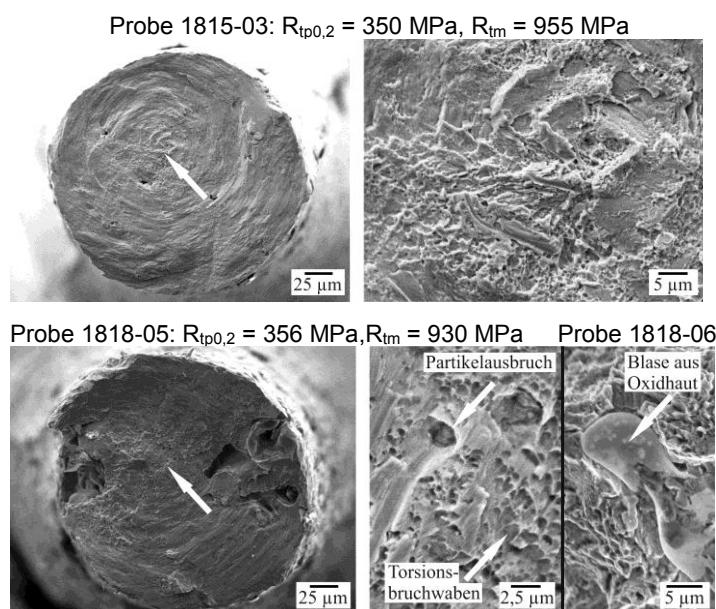
Exemplarisch sind die ermittelten Nennschubspannungs-Totalscherungskurven von fünf Proben der Charge 1815 in Abbildung 2 dargestellt. Von den untersuchten Chargen weist diese die größte Streuung der mechanischen Eigenschaften auf. Die Schergrenze R_{teS} beträgt $298 \pm 39 \text{ MPa}$ und die 0,2 %-Schergrenze $R_{tp0,2}$ liegt bei $397 \pm 52 \text{ MPa}$. Bis auf eine Probe versagen die Proben bei 922 bis 970 MPa. Die torsionsstabilste Probe erreicht 1184 MPa. Als Mittelwert ergibt sich für die Torsionsfestigkeit R_{tm} ein Wert von $997 \pm 104 \text{ MPa}$. Die Bruchscherung γ_B der Charge 1815 beträgt $34,2 \pm 10,6 \%$.

Die Kennwerte der mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Streuungen sind ähnlich groß wie die der Kennwerte aus den Mikrozugversuchen. Die Streuung der Kennwerte je Charge beträgt 3 bis 13 %. Die Chargen 1814 und 1815 weisen mit 977 und 997 MPa ähnliche Torsionsfestigkeiten auf. Hier fällt die Charge 1818 mit $R_{tm} = 910 \pm 16 \text{ MPa}$ deutlich ab. Dies kann auf die bei dieser Charge auftretenden Lunker zurückgeführt werden (vgl. Abbildung 3 Probe 1818-05). Die Torsionsbeanspruchung führt zu einer inhomogenen Spannungsverteilung mit der höchsten Beanspruchung an der Oberfläche der Probe. Da die Lunker nur zum Teil an der Probenoberfläche und überwiegend im Inneren des Probenquerschnitts liegen, ist die Auswirkung der Lunker erst bei höheren Belastungen (also bei R_{tm}) zu erkennen. Die im Vergleich mit den beiden anderen Chargen deutlich geringere Streuung der Schubfestigkeit der Charge 1818 ist somit ebenfalls eine Folge der bei allen Proben dieser Charge auftretenden Lunker. Die mittleren Bruchscherungen aller Chargen liegen in einem engen Bereich zwischen 31,4 und 35,5 %. Auch hier zeigt sich bei Charge 1818 die Auswirkung der Lunker entsprechend in einer geringeren Bruchscherung. Generell ist die Streuung der Bruchscherung hoch.

Die in Abbildung 3 gezeigten Bruchflächen der Probe 1815-03 ($R_{tp0,2} = 350 \text{ MPa}$, $R_{tm} = 955 \text{ MPa}$) lassen vereinzelt kleine Poren und Mikrolunker mit Durchmessern von 2 bis 6 μm erkennen. Die Bruchflächen sind stark plastisch verformt. Dies resultiert aus einer Relativbewegung der Bruchflächen während der Rissausbreitung. Der als Gewaltbruch zu erkennende Bereich, der auch die Position der Drehachse der Probe darstellt, befindet sich meist nahe der Probenmitte. Dieser Bereich weist üblicherweise Durchmesser um 50 μm auf.

Tabelle 1: Mechanische Kennwerte der Mikrotorsionsproben (VDG, $T_m = 1000^\circ\text{C}$).

Charge		R_{teS} [MPa]	$R_{tp0,2}$ [MPa]	R_{tm} [MPa]	γ_B [%]
1814	Minimum	249	334	898	17,1
	Maximum	305	411	1022	54,3
	Mittelwert	276	379	977	35,5
	Stabw.	22	35	49	15,7
1815	Minimum	263	350	922	19,0
	Maximum	359	485	1184	48,0
	Mittelwert	298	397	997	34,2
	Stabw.	39	52	104	10,6
1818	Minimum	251	349	894	24,0
	Maximum	310	374	930	38,6
	Mittelwert	280	362	910	31,4
	Stabw.	29	10	16	6,0

**Abbildung 3:** REM-Bilder der Bruchflächen von Mikrotorsionsproben (VDG, $T_m = 1000^\circ\text{C}$).

gegossenen Modellen vorhanden waren und sich in die Gussform übertragen haben. Bei Poren im Volumen der Proben sind teilweise beim Gussprozess eingeschwemmte Oxidhäute der Schmelze zu erkennen. Dies ist im rechten Ausschnitt anhand der Probe 1818-06 gezeigt.

Die untersuchten Chargen der Mikrotorsionsproben weisen ähnliche Gefüge auf, wie die Chargen 1701 bis 1703, an denen Zugversuche durchgeführt wurden. Folglich wurden die Kennwerte der mechanischen Eigenschaften dieser Chargen verwendet. Für den Vergleich der Ergebnisse der Torsionsversuche mit denjenigen der Zugversuche wurden die Beanspruchungen der Torsionsversuche mit Hilfe der Vergleichsspannungshypothese nach von Mises in eine einachsige Normalspannung umgerechnet:

$$\sigma_v^{(v.M.)} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (1)$$

Bei der Torsionsprüfung kann eine Normalspannung σ durch einen fehlerhaften Einbau oder einen Verzug der Probe entstehen, die die Probe zusätzlich axial belastet. Bei den für den Vergleich anzusetzenden Schubspannungen ($\tau > 250$ MPa) kann eine zusätzliche Axialspannung von maximal 25 MPa vernachlässigt werden. Höhere Axialspannungen können auf Grund der in der Mikrotorsionsprüfmaschine verwendeten Federscheibenkopplung ausgeschlossen werden. Die angesetzten Schubspannungen, die sich daraus ergebenden Vergleichsspannungen und die entsprechenden Festigkeitswerte der Chargen 1701 bis 1703 sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Auf der Bruchfläche der Probe 1818-05 ($R_{tp0,2} = 356$ MPa, $R_{tm} = 930$ MPa) sind deutlich große Lunker sowohl an der Probenoberfläche als auch im Volumen der Probe zu erkennen. Diese Lunker mit Abmessungen von 40 bis 60 µm an der Oberfläche führen auf Grund ihrer Kerbwirkung zu einem Absinken der Schergrenze um ca. 20 % im Vergleich mit Proben, bei denen sich die Lunker nicht an der Oberfläche befinden. Im Ausschnitt links sind die durch die Torsionsbeanspruchung entstandenen Wabenstrukturen einer typischen Gewaltbruchfläche gut zu erkennen. Ferner sind die Spuren eines harten Partikels (vermutlich κ_{II}) zu sehen, der aus dem umgebenden Gefüge herausgebrochen ist und über die Bruchfläche geschoben wurde. Wie bereits erwähnt, weisen die Proben der Charge 1818 deutliche Lunker und Poren auf. In den offenen Defekten an der Oberfläche sind z. T. Reste der Gussform (bestehend aus Feinsand und Gips) zu erkennen. Dies lässt darauf schließen, dass die Defekte bereits auf den spritz-

Bei Schubspannungen, bei denen eine plastische Verformung der Probe einsetzt bzw. bei einer plastischen Scherung von 0,2 % erreicht wird, liegen die Vergleichsspannungen um 56 bzw. 42 % höher als die entsprechenden Werte der Nennspannung der Mikrozugversuche. Da die Schubspannung bei der Torsion an der Oberfläche der Probe maximal ist und nach innen linear bis auf Null abfällt, treten bei dieser Belastung die Eigenschaften der Oberfläche deutlicher hervor. Auf Grund der Struktur der Gussoberfläche mit all ihren Unebenheiten und Defekten ist zu vermuten, dass lokal bereits früh plastische Verformungen auftreten, sodass es hier zu einer Stützwirkung der umgebenden Bereiche kommt. Zum anderen führt die bei inhomogenen Beanspruchungsverteilung auftretende Stützwirkung durch Spannungsumlagerung von hoch beanspruchten hin zu geringer belasteten Bereichen zu einer insgesamt höheren Belastbarkeit. Ein weiterer Punkt, der insbesondere für die Belastung bei einsetzender Plastifizierung gilt, ist, dass im Zugversuch das gesamte Volumen gleichmäßig beansprucht wird und damit sämtliche Defekte wie Poren und Lunker wirksam sind. Defekte, die sich nicht an der Oberfläche der Torsionsproben befinden, tragen somit erst später zu einer Schädigung bei. Und zwar desto später, je weiter sie sich im Inneren der Probe befinden. Dies erklärt auch, weshalb die Festigkeiten der Charge 1818 trotz der großen Anzahl an Poren und Lunkern nur wenig niedriger ausfällt, als bei den Chargen 1814 und 1815.

Tabelle 2: Vergleich der Mikrotorsionsversuche mit Mikrozugversuchen.

	τ	$\sigma_v^{(v.M.)}$	σ	$\sigma_v^{(v.M.)} / \sigma$
einsetzende Plastifizierung	285	494	317	1,56
0,2 % plastische Deformation	379	656	462	1,42

Dauerfestigkeitsschaubilder von Aluminiumbronze

Zur Einbringung in das Dimensionierungskonzept sind abgeschätzte Wechsel- und Kerbwechselfestigkeiten der Aluminiumbronze in Abbildung 4 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.a) und b) die Dauer- und Kerbdauerfestigkeiten in Haigh-Diagrammen dargestellt. Dabei wurden die Abschätzungen nach Goodman und Gerber so angesetzt, dass sie auf der Geraden für das jeweilige Lastverhältnis äquidistant zu den gemessenen Werten $R_{(K)D}$ sind. Da jede dritte Probe einer Charge mit Kerbproben ungekerbt war, wurde an diesen R_m bestimmt und die gekerbten Proben zyklisch getestet. Da für die Abschätzung von $R_{(K)W}$ nach Goodman und Gerber aber R_{km} benötigt wird, wird diese entsprechend dem Vergleich der quasistatischen Eigenschaften gekerbter und ungekerbter Proben mit $R_{km} = 1,25 R_m$ berechnet. Die entsprechenden Daten sind in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zusammengestellt.

In Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.a) ist zu erkennen, dass ausgehend von den Versuchen bei $R = 0,1$ die Abschätzung der Wechselfestigkeit R_w 184 MPa ergibt. Die Kerbwechselfestigkeit R_{kw} liegt mit 162 MPa erwartungsgemäß niedriger. Da die Kerbwirkungszahl β_k mit 1,13 deutlich unter α_k mit ca. 2,0 liegt, ist nur von einer geringen Kerbempfindlichkeit der Mikroproben aus CuAl10Ni5Fe4 auszugehen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier Mikroproben mit Gussfehlern (Guss Haut, Poren und Lunkern) untersucht werden und so die geometrischen Kerben keine starke zusätzliche Schädigungswirkung haben. Basierend auf den Versuchen bei $R = 0,5$ ergibt sich entsprechend Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.b) für Proben mit einer feinen Mikrostruktur eine mit 210 MPa höhere Kerbwechselfestigkeit als für Proben mit einer groben Mikrostruktur mit $R_{kw} = 165$ MPa. Dies zeigt, dass die Mikrostruktur, verglichen mit der Kerbe, den dominierenden Faktor bzgl. des zyklischen Verhaltens der Mikroproben aus CuAl10Ni5Fe4 darstellt. Die durch die Kerbwirkung im Kerbgrund induzierten Maximalspannungen relaxieren bei einem duktilen Material innerhalb weniger Zyklen. Dieser Effekt ist umso ausgeprägter, je größer der R -Wert.

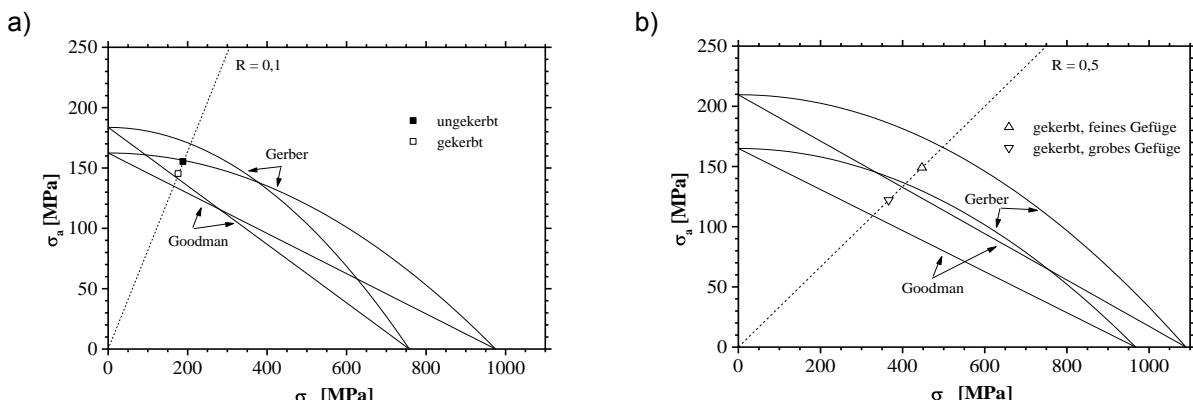


Abbildung 4:a) Haigh-Diagramm für ungerbte und gekerbte Mikrozugproben bei $R = 0,1$ b) Haigh-Diagramm für gekerbte Mikrozugproben mit feiner und grober Mikrostruktur bei $R = 0,5$.

Bereich ist, der plastisch verformt wird. Dadurch sind die Wöhlerkurven ungekerbter und gekerbter Proben im Zeitfestigkeitsbereich nahezu deckungsgleich (siehe Finanzierungsantrag TP D2 2009 bis 2011). Zudem erklärt dieser Effekt auch die Unempfindlichkeit des Materials auf die bei $R = 0,5$ im Vergleich zu $R = 0,1$ deutlich höhere Mittelspannung. Folglich ist R_{KW} mit 210 MPa (abgeschätzt aus den Versuchen mit $R = 0,5$) trotz der Kerben, aber mit einer deutlich feineren Mikrostruktur, höher als R_w (abgeschätzt aus den Versuchen mit $R = 0,1$).

Tabelle 3: Abschätzung der Wechselfestigkeiten gekerbter und ungekerbter Mikrozugproben.

Probenform	ungekerbt	gekerbt	gekerbt	gekerbt
Gefüge	grob	gemischt	fein	grob
Lastverhältnis R	0,1	0,1	0,5	0,5
R_m [MPa]	758	780	872	774
R_{km} [MPa]	-	975	1090	967,5
$R_{(K)D}$ [MPa]	155	145	149	122
$R_{(K)W}$ [MPa]	184	162	210	165

* ermittelt an den ungekerbten Proben der Chargen, ** Abschätzung

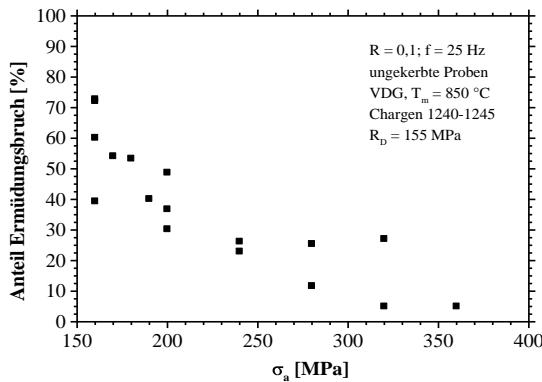


Abbildung 5: Anteil der Ermüdungsbruchfläche als Funktion der Spannungsamplitude für ungekerbte Mikrozugproben bei $R = 0,1$ und $f = 25$ Hz.

reich nicht stark auswirkt, da sich die Risse nicht entlang der Korngrenzen orientieren. Es kommt aber vor, dass sich die Ermüdungsrisse entlang der Phasengrenzen orientieren. Die Bruchflächen der quasistatisch untersuchten Mikrozugproben zeigen eine deutlichere Wechselwirkung mit der Mikrostruktur.

Rissinitiierungs- und Ausbreitungsverhalten

Zur Bestimmung des Risswiderstands von ZrO_2 -Mikrobiegeproben wurden am LEM des KIT in 16 Proben der drucklos heißgegossenen Charge F mittels eines fokussierten Ionenstrahls (FIB) eine scharfe Kerbe eingebracht. Die Kerbtiefe variiert dabei zwischen 1 und 15 μm , der Kerbradius zwischen 10 bis 25 nm und der Flankenwinkel zwischen 10° und 15° . Dadurch ergibt sich in ausreichender Näherung eine Kerbgeometrie bzw. -größe wie bei natürlichen Fehlern. Die besten Ergebnisse bezüglich der Kerbqualität wurden mit einer Strahlstromstärke von 10 nA und einer Sollschnitttiefe von 50 μm erzielt. Für die Berechnung des kritischen Spannungsintensitätsfaktors K_c der keramischen Proben wurde ein Geometriefaktor $Y = f(a/h)$ für lange Querrisse verwendet. Damit ergibt sich:

$$K_c = \frac{F_{\max} l}{bh^{\frac{3}{2}}} \left[2,9 \left(\frac{a}{h} \right)^{\frac{1}{2}} - 4,6 \left(\frac{a}{h} \right)^{\frac{3}{2}} + 21,8 \left(\frac{a}{h} \right)^{\frac{5}{2}} - 37,6 \left(\frac{a}{h} \right)^{\frac{7}{2}} + 38,7 \left(\frac{a}{h} \right)^{\frac{9}{2}} \right] \quad (2)$$

für $0 \leq \frac{a}{h} \leq 0,6$

mit der Maximalkraft F_{\max} , der Breite b und Höhe h des Probenquerschnitts, dem Auflagerabstand l sowie der Kerbtiefe a [Nic93].

Ermüdungsbruchflächenanalyse

Der Anteil der Ermüdungsbruchfläche an der Gesamtbruchfläche für die aufgebrachten Spannungsamplituden bei ungekerbten Mikrozugproben ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden**. Abbildung 5 dargestellt. Erwartungsgemäß nimmt der Anteil an Ermüdungsbruch mit steigender Spannungsamplitude ab. Die Ermüdungs- und Gewaltbruchflächen spiegeln die strukturellen Eigenschaften der Mikrostrukturen wider. Im Zentrum der Bruchwaben sind häufig kleine κ -Partikel zu finden (ähnlich Gusseisen mit Kugelgraphit). Beim Ermüdungsbruch werden diese spröden Partikel verformungsarm durchtrennt.

Die Ermüdungsbrüche verlaufen in der Regel transkristallin. Das erklärt, weshalb sich die Mikrostruktur bei den Ermüdungsversuchen im Zeitfestigkeitsbe-

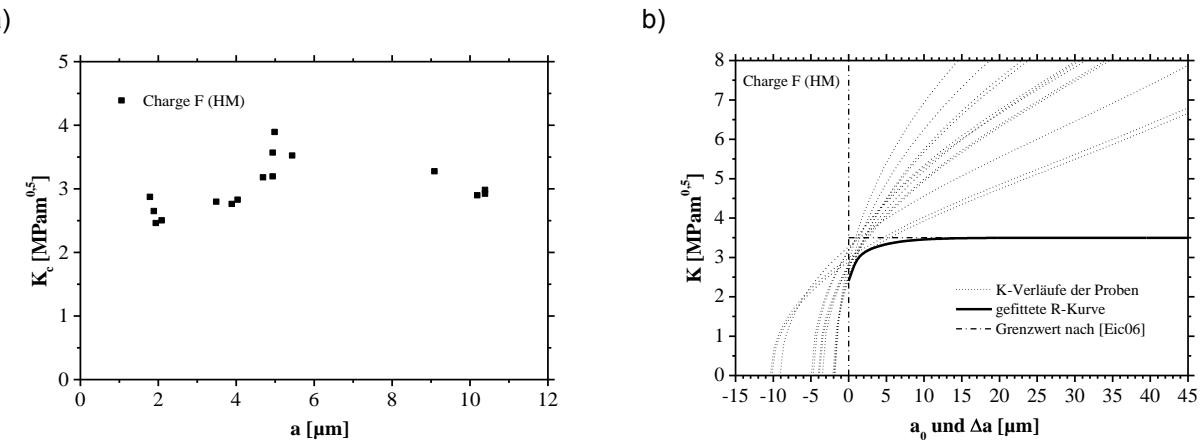


Abbildung 6: a) Kritischer Spannungsintensitätsfaktor in Abhängigkeit der Kerbtiefe für die Charge F, b) Auswertung der Risszähigkeitsversuche für Charge F.

Da der Risswiderstand bei einem Material mit R-Kurvenverhalten von der Größe des versagensauslösenden Defekts abhängig ist, wurden bei den Proben die Tiefe a der mittels FIB eingebrachten Kerbe zwischen 1,9 und 10,4 μm variiert. Die Ergebnisse der Dreipunktbiegeversuche sind in Abbildung 6a) dargestellt. Bei Kerbtiefen in der Größenordnung natürlicher Defekte, wie z. B. Poren mit Durchmessern von 1 bis 2 μm, beträgt der Spannungsintensitätsfaktor 2,4 bis 2,9 MPam^{0.5}. Für tiefere Kerben bis 5,5 μm steigt der Spannungsintensitätsfaktor auf Werte bis 3,9 MPam^{0.5} an. Die Proben mit 9,0 bis 10,4 μm Kerbtiefe weisen Spannungsintensitätsfaktoren zwischen 2,9 und 3,3 MPam^{0.5} auf. Der Anstieg der kritischen Spannungsintensität mit größeren Anfangsdefekten im Bereich zwischen 2 und 5 μm ist nur gering. Bei noch größeren Anfangsdefekten ist keine weitere Steigerung von K_c zu erkennen.

Anhand der an der ermittelten kritischen Spannungsintensitätsfaktoren kann eine R-Kurve für Mikroproben aus ZrO₂ abgeleitet werden. Ausgehend von der FIB-Kerbe wächst der Riss zunächst stabil, bis die Kurve, die die Belastung an der Riss spitze repräsentiert, die R-Kurve tangiert. Die Kurven der Spannungsintensitätsfaktoren sind für verschiedene Kerbtiefen für ausgewählte Proben der Charge F in Abbildung 6b) dargestellt. Die Kurven beginnen bei der Kerbtiefe, die mit $-a_0$ als x-Achsenabschnitt eingetragen ist. In positiver Achsrichtung ist die Rissverlängerung Δa aufgetragen.

Die R-Kurve wird in einem konservativen Verfahren als untere Grenzkurve an die ermittelten K - Δa -Verläufe angenähert. Als Näherungsfunktion wurde wie in [Fün09] Gleichung (3) verwendet:

$$K = K_{th} + C_1(1 - e^{-\Delta a/t_1}) + C_2(1 - e^{-\Delta a/t_2}) \quad (3)$$

K_{th} ist der Schwellenwert des Spannungsintensitätsfaktors. Der zweite Summand beschreibt die Stärke (C_1) und die Dauer (t_1) des Steilanstiegs der R-Kurve und der dritte Summand die Stärke (C_2) und die Dauer (t_2) der Annäherung an den Plateauwert. Die Parameter der ermittelten R-Kurve sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Die R-Kurve beginnt bei K_{th} mit einem Wert von 2,4 MPam^{0.5}. Der Anstieg ist relativ steil. Als Plateauwert für lange Risse wurde nach [Eic06] ein Wert von 3,5 MPam^{0.5} angesetzt. Der flache Verlauf der R-Kurve ist dadurch zu erklären, dass bedingt durch die mit 0,27 μm geringe Korngröße die Umwandlung des tetragonalen Gitters in ein monoklines keine deutliche Verstärkung bzw. Riss spitzenabschirmung durch die resultierenden Druckspannungen hervorruft. Zusätzlich steigt der Risswiderstand durch extrinsische Effekte wie z. B. die Bildung elastischer Brücken und Rissverzweigung.

Tabelle 4: Parameter der R-Kurve für ZrO₂.

K_{th} [MPam ^{0.5}]	C_1 [MPam ^{0.5}]	t_1 [μm]	C_2 [MPam ^{0.5}]	t_2 [μm]
2,4	0,62	3,75	0,48	0,59

Die Festigkeiten der Charge F liegen in einem Bereich von 1800 und 2500 MPa. Ausgehend von $K_c = 2,4$ MPam^{0.5} und einem Geometriefaktor $Y = 0,72$ für einen halbrellsförmigen Oberflächendefekt, liegt die kritische Defektgröße a_c zwischen 0,57 und 1,09 μm. Damit liegt sie im Bereich der charakteristischen Gefügeabmessungen. D. h. ein Defekt in der Größe von 2 bis 3 Körnern kann zum Versagen der Probe führen. Damit lässt sich auch verstehen, weshalb vor allem bei den hochfesten Chargen oftmals der versagensauslösende Defekt nicht identifiziert werden kann. Da die übrigen Chargen aus Standardpulver bzgl.

Korngröße und Porosität eine sehr ähnliche Gefügecharakteristik aufweisen, wurde auf weitere R-Kurvenmessungen an ZrO_2 verzichtet. Auf Grund der geringen mechanischen Festigkeiten der Chargen I bis L aus nanoskaligem Pulver wurden entsprechende Untersuchungen ebenfalls nicht durchgeführt.

Zur Untersuchung des Risswiderstands von Si_3N_4 in Abhängigkeit der Größe des versagensauslösenden Defekts wurden bei den Proben der Chargen 5 bis 8 die jeweilige Tiefe a der mittels FIB eingebrachten Kerbe zwischen 1,5 und 11,5 μm variiert. Wie für ZrO_2 gezeigt, wurden aus den gemessenen kritischen Spannungsintensitätsfaktoren als Funktion der Kerbtiefe einzelne R-Kurven für die Chargen 5 und 6 sowie eine gemeinsame R-Kurve für die Chargen 7 und 8 abgeleitet. Die Parameter zur Beschreibung der R-Kurve nach Gleichung (3) stehen in Tabelle 5.

Tabelle 5: Parameter der R-Kurven für Si_3N_4 .

Charge	K_{th} [MPam 0,5]	C_1 [MPam 0,5]	t_1 [μm]	C_2 [MPam 0,5]	t_2 [μm]
5	1,45	0,41	0,59	4,05	16,77
6	1,90	0,11	$6 \cdot 10^{-7}$	4,09	17,98
7 und 8	1,01	1,28	6,80	18,59	363,68

In Abbildung 7 a) sind für die Proben der Charge 5 die Verläufe des Spannungsintensitätsfaktors K im Moment des Bruches über der Kerbtiefe a_0 und der Rissverlängerung Δa und die konservativ angeglichene R-Kurve aufgetragen. Der Schwellenwert K_{th} der Risszähigkeit beträgt 1,45 MPam 0,5 . Die R-Kurve steigt über ca. 40 μm bis zum hier nicht direkt bestimmmbaren Plateauwert flacher an als bei [Fün09]. Der Plateauwert

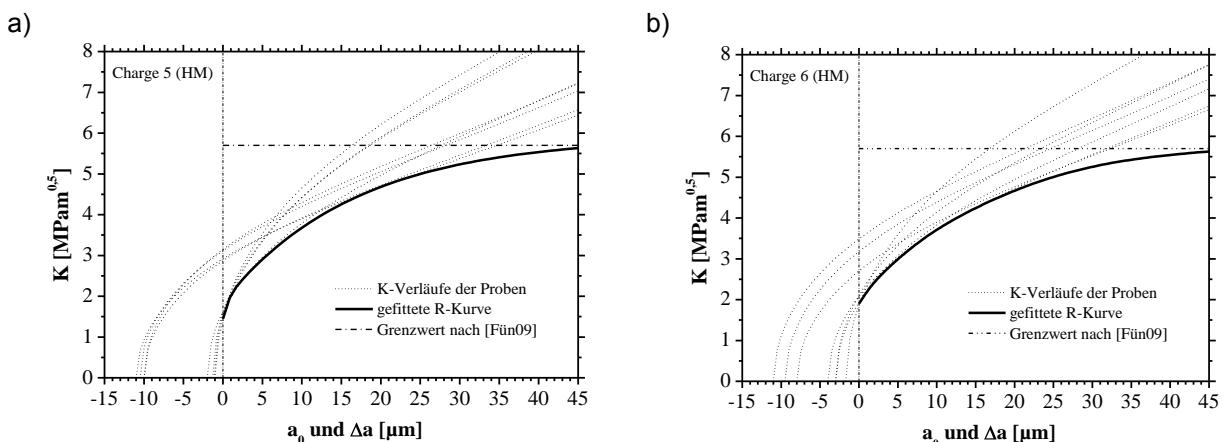


Abbildung 7: a) Auswertung der Risszähigkeitsversuche für die Charge 5 und b) Charge 6.

wurde auf den in [Fün09] an Siliziumnitrid mit den Additiven Y_2O_3 und Al_2O_3 ermittelten Wert von 5,7 MPam 0,5 gesetzt. Die Festigkeit von Charge 6 im Dreipunktbiegeversuch war der der Charge 5 sehr ähnlich. Dementsprechend ergibt sich auch bei der R-Kurve eine gute Übereinstimmung. Die ermittelte R-Kurve mit den zugehörigen Spannungsintensitätsfaktorverläufen der untersuchten Proben ist in Abbildung 7 b) dargestellt. Der Schwellenwert K_{th} liegt bei 1,90 MPam 0,5 . Dieser Wert ist etwas höher als bei Charge 5 mit 1,45 MPam 0,5 , da die Kerbe mit der kleinsten Tiefe bei Charge 6 mit 1,7 μm tiefer ist als bei Charge 5 mit 1,0 μm . Damit ergibt sich ein nahezu identischer Verlauf der R-Kurven für die Chargen 5 und 6.

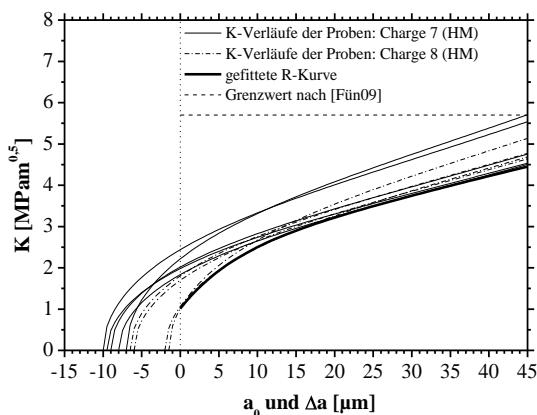


Abbildung 8: Auswertung der Risszähigkeitsversuche für die Chargen 7 und 8.

Pumpe fördert das Gesamtvolumen von 1l Ringer-Lösung DAB 7 der Firma Serag-Wiessner KG mit einer Rate von 32,7 Liter pro Stunde über Schläuche zur eingespannten Probe, so dass diese während des Versuchs komplett umspült wird. Die Ringerlösung enthält 8,6 g NaCl, 0,3 g KCl und 0,33 g CaCl₂ pro Liter. Die Lösung sammelt sich im Polymerteller und fließt über Schläuche wieder zum Sammelbehälter der Lösung. Die bisher verwendeten Probenfassungen aus Vergütungsstahl wurden durch Fassungen aus V4A-Stahl ersetzt, um bimetallische Reaktionen und eine Korrosion der Fassung zu verhindern.

Die Spannungswöhlerlinie in Abbildung 9a) zeigt das Lebensdauerverhalten von Mikroproben aus Aluminiumbronze an Laborluft und unter dem zusätzlichen Korrosionseinfluss der Ringerlösung. Während die Aluminiumbronze an Laborluft im untersuchten Lebensdauerbereich ein Dauerfestigkeitsplateau zeigt, wird dies in Ringerlösung durch den umgebungsbedingten Materialverlust nicht erreicht. Die schützende Passivoxidschicht ist nicht resistent genug um Korrosionsreaktionen aufgrund der gelösten Chlorid-Ionen zu vermeiden. Die beiden Wöhlerlinien nähern sich im LCF-Bereich an und vergrößern ihren Abstand voneinander mit zunehmender Bruchlastspielzahl aufgrund des mit der Lebensdauer zunehmenden Anteils des Korrosionseinflusses. Beim Ausbau der gebrochenen Proben nach etwa 10⁶ Zyklen, war kein fester Zusammenhalt der beiden Probenhälften festgestellt worden. Dies deutet auf eine hohe Dichte an Sekundärrissen hin, die wohl zum Großteil zusammengewachsen sind.

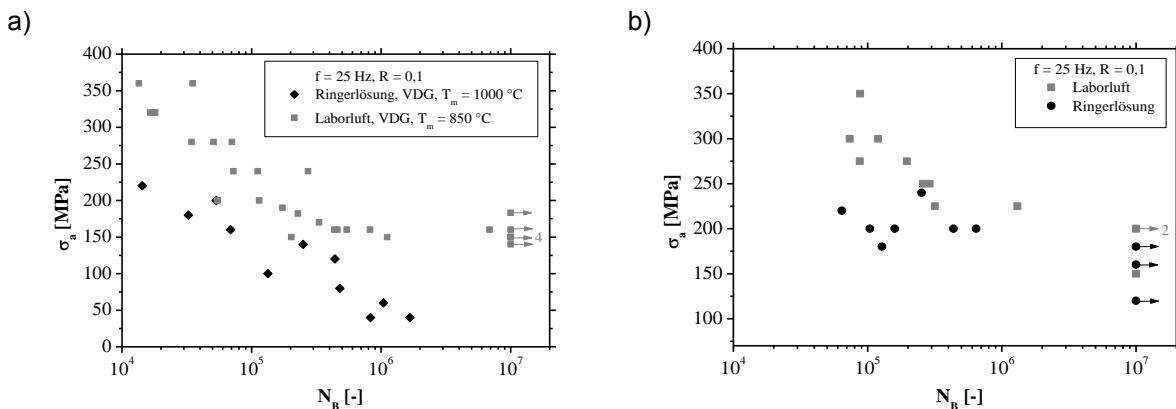


Abbildung 9: Spannungswöhlerlinien an Laborluft und in Ringerlösung für a) Aluminiumbronze und b) X5CrNiCuNb 17 4 PH

Zusätzlich zur Aluminiumbronze wurde das Korrosionsermüdungsverhalten des aus Carbonyleisen gewonnenen hochreinen martensitaushärtenden Stahls X5CrNiCuNb 17 4 PH (Precipitation Hardening) untersucht. Abbildung 9b) zeigt das Lebensdauerverhalten dieses Stahls an Laborluft und in Ringerlösung. Die Ermüdungsfestigkeit wird durch die Ringerlösung im Vergleich zur Aluminiumbronze deutlich geringer reduziert. So erreichen die Mikroproben aus 17 4 PH noch bei Spannungsamplituden von 120 bis 180 MPa die Grenzlastspielzahl 10⁷. Nach dem Bruch besaßen die Probenhälften noch einen starken Materialzusammenhalt, so dass wohl nur ein Anriß zum Bruch geführt hat. Dies deutet auf einen lokalen Oberflächenangriff (Lochfraß) mit anschließender Ermüdungsrissausbreitung (Schwingungsrisskorrosion) hin.

Die beiden Chargen 7 und 8 weisen in den Biegeversuchen vergleichbare Festigkeiten auf. Daher werden sie wie Abbildung 8 zeigt zusammen betrachtet. Der Schwellenwert liegt mit $K_{th} = 1,01 \text{ MPam}^{0,5}$ niedriger. Der Anstieg fällt ebenfalls schwächer aus und auch der Plateauwert wird entsprechend kleiner sein. Die Ursache für die geringere Risszähigkeit sind der kleinere Kornstreckungsgrad, die höhere Porosität und der höhere Anteil an Sekundärphase.

Betriebsnahe Beanspruchungen

Die Mikrozugmaschine wurde so modifiziert, dass die Proben eine Ermüdungsbeanspruchung im Zugschwellbereich mit zusätzlicher Korrosionsbeanspruchung durch eine Ringerlösung ausgesetzt wurden. Dazu wurde die untere Probenfassung in einen Polymer-Teller befestigt. Eine

Mikro- und Bauteilprüfung

Die Ergebnisse der für die Teilprojekte A3, C1, C2, C3, C5 durchgeführten Mikro- und Bauteilprüfungen sind in den Berichten der jeweiligen Teilprojekte enthalten.

Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen (PGEB)

Bei der Aluminiumbronze wurden Zusammenhänge zwischen dem Gefüge und den mechanischen Eigenschaften festgestellt. Das Gefüge mit den höchsten Festigkeiten von $R_{p0,2} = 488$ MPa und $R_m = 925$ MPa wurde bei den Chargen 1708 und 1709 festgestellt und weist nadelige α -Körner umgeben von einem Saum aus κ_{III} -Phasen auf. Der α -Anteil ist relativ gering, die Anteile von β und κ_{III} sind hoch. Auch sind viele κ_{II} -, κ_{IV} - und κ_V -Ausscheidungen zu erkennen. Das nochmals feinere Gefüge der Chargen 1698 und 1699 weist sowohl an den Korngrenzen als auch im Inneren der ehemaligen β -Körner feine α -Nadeln auf, die ebenfalls von κ_{III} umgeben sind. Der Anteil an β -Phase ist hier deutlich größer als der an α und κ_{III} . Die Festigkeit ist mit $R_{p0,2} = 432$ MPa und $R_m = 874$ MPa etwas geringer. Gröbere Gefüge, wie z. B. bei den Chargen 1704 bis 1706, die sich durch einen in etwa gleich großen Anteil von α und β auszeichnen und mehr gröbere globulare κ_{II} -Ausscheidungen aufweisen als feine lamellare κ_{III} -Ausscheidungen, liefern entsprechend geringere Festigkeiten von $R_{p0,2} = 335$ MPa und $R_m = 774$ MPa. Diese Chargen wurden mittels VDG und bei $T_m = 1000$ °C hergestellt. Das Gefüge der VDG-Chargen 1240 bis 1245 mit $T_m = 850$ °C ist nahezu identisch ausgebildet und weist auch in etwa gleiche Festigkeiten auf: $R_{p0,2} = 349$ MPa und $R_m = 758$ MPa.

Um eine Vorhersage über die Festigkeit von ZrO_2 zu ermöglichen, wurde auf Basis der Chargen A bis G eine multiple Regression entwickelt, wie sie in [Kas06] beschrieben wurde. Diese berücksichtigt die Einflüsse der Porosität, der Rautiefe und des Kantenradius auf die charakteristische Biegefestigkeit und gibt somit eine Abschätzung für die zu erwartende Festigkeit:

$$\sigma_{0,3PB, \text{berechnet}} = a + b \cdot \text{Porosität} + c \cdot \text{Kantenradius} + d \cdot \text{Rauheit} \quad (4)$$

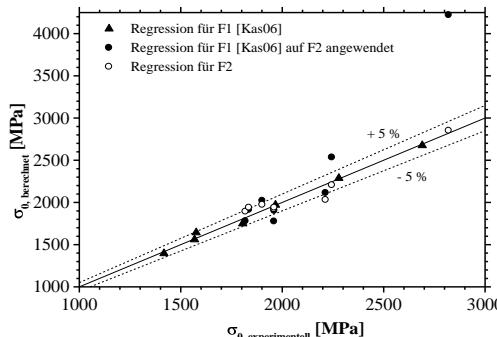
Die Parameter a bis d sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Der Parameter a stellt dabei keine Mindestfestigkeit sondern lediglich einen Bezugswert für den Wert Null von Porosität, Kantenradius und Rautiefe dar, da der Wert für c immer größer Null ist.

Tabelle 6: Parameter der Regressionen: F1 [Kas06, Kas08] und F2.

Feedstock	a [MPa]	b [MPa/%]	c [MPa/ μ m]	d [MPa/ μ m]
F1	1692	-176	92	-133
F2	1787	0	36	0

Abbildung 10a) zeigt den Vergleich der mittels oben genannter Gleichung berechneten und der experimentell ermittelten Festigkeit für die Chargen aus den Feedstockvarianten F1 und F2. Für die Chargen a bis g zeigt die F1-Regression eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten mit der experimentell ermittelten Festigkeit. Die Eignung zur Vorhersage wurde durch weitere Versuche an Chargen aus F1 bestätigt [Kas06]. Dagegen ergeben sich für die Chargen A – H zum Teil große Abweichungen von bis zu 11 % (Charge E). Für Charge D ergibt sich eine Abweichung von 33 %, die auf den sehr großen Wert des Kantenradius zurückzuführen ist, der nach der Regression von Kasanická mit 92 MPa pro Mikrometer Kantenradius gewichtet ist.

a)



b)

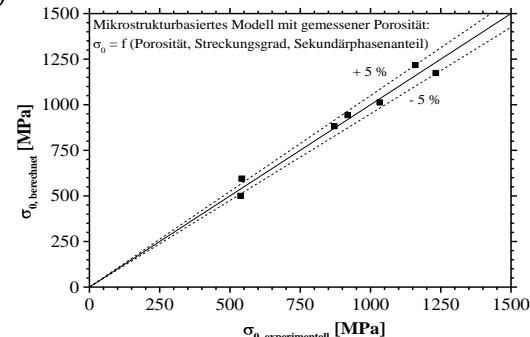


Abbildung 10:a) Vergleich der berechneten und experimentell ermittelten Festigkeiten für F1 und F2;
b) Vergleich der berechneten und experimentell ermittelten Festigkeiten für Si_3N_4 mit der multiplen Regression III unter der Berücksichtigung rein mikrostruktureller Parameter.

Diese Ergebnisse zeigen, dass für ein anderes Material bzw. bereits für einen anderen Feedstock eine neue Regression bzw. eine Anpassung der Parameter erforderlich ist. Die für F2 ermittelten Parameter können Tabelle 6 entnommen werden (bedingt durch eine einheitliche Neuauswertung der Chargen, zeigen die Parameter für F2 leicht andere Werte als in [Rög08b]). Auf Grund der geringen Werte und den geringen Variationsbereich der Porosität und der Rautiefe, werden die Parameter b und d zu Null gesetzt, d.h. der Einfluss der in sehr engen Grenzen liegenden Porosität und Rautiefe auf die vorhergesagte Festigkeit wird vernachlässigt. Wie aus Abbildung 10a) hervorgeht, führt die speziell für die Chargen aus F2 erstellte Regression zu einer guten Übereinstimmung der berechneten und experimentellen Festigkeitswerte (der Korrelationskoeffizient R^2 beträgt 0,92). Der maximale Fehler beträgt 9 % für Charge F, wobei die experimentelle Festigkeit höher ist als die berechnete. Im Durchschnitt ist der Fehler kleiner als 4 %.

Für eine Bewertung der festigkeitsbeeinflussenden Faktoren von Si_3N_4 wird eine multiple Regression erstellt, mit der auch eine rechnerische Vorhersage der Festigkeit von Mikrobiegeproben aus Si_3N_4 möglich sein sollte. Zunächst werden, analog zu ZrO_2 , die Einflüsse der gemessenen Porosität, des Kantenradius und der Rautiefe nach Gleichung (4) berücksichtigt. Diese multiple Regression I, deren Parameter a bis d in Tabelle 7 zusammengefasst sind, berücksichtigt jedoch nicht den deutlichen Einfluss des Streckungsgrades der Körner und der Anteil an Sekundärphase auf die Festigkeit von Si_3N_4 . Daher wird Gleichung (4) der multiplen Regression um diese Parameter erweitert:

$$\begin{aligned}\sigma_{0,3\text{PB},\text{berechnet}} = & a + b \cdot \text{Porosität} + c \cdot \text{Kantenradius} + d \cdot \text{Rauheit} \\ & + e \cdot \text{Streckungsgrad} + f \cdot \text{Sekundärphasenanteil}\end{aligned}\quad (5)$$

Die Anwendung auf die Chargen 1 und 3 – 8 ergibt die in Tabelle 7 zusammengefassten Parameter II, wobei eine deutlich genauere Vorhersage der Festigkeit gegenüber der Verwendung von Gleichung (4) erzielt wird ($R^2 = 0,97$; ohne Charge 2, da hier kein Wert der gemessenen Porosität vorliegt; für den Streckungsgrad wird der Wert 2,00 verwendet der dem Häufigkeitsmaximum entspricht). Bei den Regressionen I und II ist zu bemerken, dass der Parameter c für den Kantenradius jeweils negativ eingeht. Dies widerspricht sowohl den Erfahrungen mit ZrO_2 , als auch dem Zusammenhang von Festigkeit der einzelnen Proben einer Charge und deren Kantenradius. Allerdings ist im Chargenvergleich dieser Effekt von anderen Einflüssen überlagert. Der Parameter d für die Rautiefe ist jeweils positiv, d.h. mit steigender Rautiefe nimmt die Festigkeit zu. Dies ist physikalisch nicht korrekt, lässt sich aber mit der Auswirkung des Kornwachstums von Si_3N_4 erklären. Ein starkes Kornwachstum führt zu einem höheren Streckungsgrad der Körner. Dieses wiederum steigert die Festigkeit des Materials, bewirkt aber gleichzeitig eine höhere Rauheit der Oberfläche. Daher werden die Einflüsse des Kantenradius und der Rautiefe nicht mehr berücksichtigt. Somit ergibt sich:

$$\begin{aligned}\sigma_{0,3\text{PB},\text{berechnet}} = & a + b \cdot \text{Porosität} + e \cdot \text{Streckungsgrad} \\ & + f \cdot \text{Sekundärphasenanteil}\end{aligned}\quad (6)$$

Die entsprechenden Parameter der multiplen Regression III sind ebenfalls in Tabelle 7 zusammengefasst (für den Streckungsgrad der Chargen 7 und 8 wird ein Wert von 1,6 angesetzt). Der positive Wert des Parameters e sowie der negative Wert des Parameters f sind physikalisch sinnvoll: Ein größerer Streckungsgrad steigert die Festigkeit, ein höherer Anteil an Sekundärphase reduziert die Festigkeit. Wie in Abbildung 10b) dargestellt ist, ergibt die multiple Regression III eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten und der experimentell ermittelten Festigkeiten ($R^2 = 0,97$). Die durchschnittliche Abweichung beträgt 4,5 %, die maximale Abweichung 8,9 %. Ein bedeutender Vorteil von Gleichung (6) ist auch, dass hier ausschließlich mikrostrukturelle Parameter einfließen. Damit ist mit dieser Gleichung auch ein Vergleich nicht nur von Mikrobiegeproben, sondern auch von Mikrobauteilen (z.B. Mikrozahnrädern) möglich.

Tabelle 7: Parameter der multiplen Regressionen I bis III für Si_3N_4 .

Regression	a [MPa]	b [MPa/%]	c [MPa/ μm]	d [MPa/ μm]	e [MPa]	f [MPa/%]
I	1302	-85	-103	145	-	-
II	1121	-32	-29	24	93	-12
III	844	-33	-	-	148	-9

5.2.1.3 Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Probleme bei der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der einzelnen Phasen der Aluminiumbronze zeigten sich dadurch, dass die Phasen κ_{III} , κ_{IV} und κ_V zu klein sind, um deren Härte isoliert zu erfassen. Die κ_{II} -Phase ist zum Teil in der weicheren α -Phase eingelagert, so dass die gemessene Härte der κ_{II} -Phase tendenziell geringer ist als deren tatsächliche Härte. Hinreichend groß kann die κ_I -Phase sein, allerdings ist deren Auftreten im Gefüge ungewünscht. Die Bestimmung von Gradienten der mechanischen Eigenschaften, z.B. entlang der Gießrichtung, wurde für die Aluminiumbronze nicht durchgeführt, da sich in den verschiedenen Chargen so unterschiedliche Gefüge ausbildeten, dass keine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden konnte. Da ZrO_2 einphasig ist und keine herstellungsbedingte Gradienten der Mikrostruktur auftreten würden keine Nanoindentation durchgeführt.

Das Verformungs- und Versagensverhalten unter Torsionsbeanspruchung wurde nur an glatten Proben aus Aluminiumbronze ermittelt, weil keine gekerbte Proben zur Verfügung standen. Es wurden keine Torsionsversuche mit Proben aus ZrO_2 durchgeführt, da dieser Werkstoff aufgrund seines spröden Versagensverhaltens sehr empfindlich auf Biegekomponenten reagiert. Die realisierte Einspann- und Belastungsvorrichtung konnte nicht hinreichend genau ausgerichtet werden, um fertigungsbedingte Verzüge der Proben auszugleichen, wodurch Messungen unter Torsionsbeanspruchung nicht reproduzierbar waren. Die Erweiterung der Torsionsprüfmaschine um eine Zug/Druck-Belastungseinheit konnte nicht realisiert werden, da das Harmonic Drive Getriebe keine Axialkräfte aufnehmen kann.

Bei der Untersuchung des Rissinitiierungs- und Ausbreitungsverhalten traten bei der K_{Ic} -Bestimmung für Aluminium-Bronze aufgrund der hohen Duktilität keine aussagekräftigen Werte für die Rissöffnung auf. Im Gegenzug wurde der Anteil an der Ermüdungsbruchfläche bestimmt und der Einfluss von Kerbe und Gefüge mittels Goodman und Gerber-Nährung ermittelt.

5.2.1.4 Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich,

Die Prozess-Gefüge- Eigenschafts-Beziehungen wurden in enger Kooperation mit den TP A3 und C2 sowie D1 erarbeitet. Begleitend wurden Mikro- und Bauteilprüfungen für die Teilprojekte A3, C1, C2, C3, C5 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Berichten der jeweiligen Teilprojekte enthalten.

5.2.1.5 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs.

Untersuchungen von [Eic07] an Y_2O_3 stabilisierten 3Y-TZP (TZP: Tetragonal Zirconia Polycrystals) zeigen einen mit der Korngröße $d = 0,11 - 0,48 \mu m$ ansteigenden Plateauwert des Spannungsintensitätsfaktors von 2,8 bis 3,9 $MPam^{0,5}$. Mit einer Korngröße von $0,27 \mu m$ bei Charge F des ZrO_2 ergibt sich hiermit eine gute Übereinstimmung bezüglich des R-Kurvenverhaltens.

Die Steilheit des Anstiegs der R-Kurve von Si_3N_4 hängt stark von der Zusammensetzung der Korngrenzephase (Art, Menge und Mengenverhältnisse der Additive) ab. Diese ist beim Feedstock der Charge 5 anders als in [Fün09] und die Gesamtmenge an Additiven ist höher, weshalb der flachere R-Kurvenverlauf der Charge 5 plausibel ist. Die ermittelten Schwellenwerte K_{th} der R-Kurve von Si_3N_4 der Chargen 5 und 6 stehen in sehr guter Übereinstimmung mit Literaturwerten. [Kou04] bestimmt für SRBSN den Schwellenwert K_{th} zu $1,46 MPam^{0,5} < K_{th} < 1,95 MPam^{0,5}$.

Die Ausgangsstellen der Ermüdungsrisse in Aluminiumbronze sind in der Regel Unebenheiten oder Poren in der Gussoberfläche oder Mikrolunker im Volumen. Letztlich sind das alles Defektstellen, wie sie für gegossene Bauteile typisch sind [Ott94, Ott01]. Übereinstimmend mit den Untersuchungen von [Cul78a] ist festzustellen, dass der Ermüdungsrißverlauf in Aluminiumbronze stark von den κ -Ausscheidungen beeinflusst wird.

Das Korrosionsermüdungsverhalten von Aluminiumbronze in einer NaCl-Lösung wurde an makroskopischen Proben in [Col78] untersucht. Das Messvolumen betrug dabei das 1.590-fache und das Oberfläche/Volumen-Verhältnis war 17 mal geringer als das der untersuchten Mikroproben. Bei rein wechselnder Beanspruchung bei einer Frequenz von 20 Hz wurde die ertragbare Spannungsamplitude bei 10^7 Zyklen um 25 bis 30 % reduziert. Aufgrund des deutlich höheren Volumens der Makroproben wird die Ermüdungsfestigkeit weniger reduziert als die der Mikroproben. Die Ermüdungsfestigkeit der Makroproben an Luft entspricht etwa der in Ringerlösung bei $N_B = 10^6$. Dadurch zeigt sich ein Korrosionseinfluss aufgrund des höheren Volumens und des geringeren Oberfläche zu Volumenverhältnisses erst oberhalb von $N_B = 10^6$. Bei den Mikroproben hingegen, zeigt der Angriff der Oberfläche stärkere Auswirkungen, so dass bei $N_B < 10^6$ eine deutlich reduzierte zeitfest ertragbare Spannungsamplitude festgestellt wird. Die deutliche Reduzierung der

Ermüdungsfestigkeit an Makroproben wurde durch eine hohe Dichte an zusammenhängenden Sekundärrissen erzeugt, die offensichtlich auch bei den Mikroproben auftritt. An Makroproben wurde bei geringeren Spannungsamplituden der Bereich zwischen benachbarten α -Körnern angegriffen, der als Stelle für Risseinleitung und Rissausbreitung dient. Folglich neigt die Risseinleitung und Rissausbreitung mit zunehmenden Korrosionseinfluss von transkristallin zu interkristallin zu wechseln. Aufgrund der interkristallinen Risseinleitung und Rissausbreitung können hinreichend viele Sekundärrisse gebildet werden, die den verringerten Zusammenhalt der beiden Probenhälften erklären.

Das Schwingungsrißkorrosions-Verhalten von X5CrNiCuNb 17 4 PH wurde in [Sch89] an makroskopischen Proben mit einem Messstreckendurchmesser von 5 mm untersucht. Die Korrosionszeitfestigkeit für $3 \cdot 10^7$ Zyklen betrug in der 0,01 M NaCl-Lösung bei einer Mittelspannung von 250 MPa um 170 MPa, während in 22%iger NaCl-Lösung die ertragbare Spannungsamplitude nur auf 140 MPa reduziert wurde. Damit liegt die Korrosionszeitfestigkeit der Makroproben etwa auf dem Niveau der Mikroproben. Die Reduktion der zeitfest ertragbaren Spannungsamplitude resultiert aus der erhöhten NaCl-Konzentration, die zu einer verstärkten Anfälligkeit des Werkstoffs gegen den risseinleitenden Lochfraß führt. Die interkristalline Korrosion in Aluminiumbronze scheint zu einem deutlich stärkerem Abfall der Ermüdungsfestigkeit zu führen als die Schwingungsrißkorrosion in 17 4 PH.

Literatur:

- [ASH01] Ashour, E. A.: Effect of sulfide an the stress corrosion behaviour of a copper-aluminium alloy in saline water; Journal of material science; 36 (2001); pp. 201-205
- [BOY04] Boyce, B. L.; Michael, J. R.; Kotula, P. G.: Fatigue of metallic microdevices and the role of fatigue-induces surface oxides; acta materialia; 52 (2004); pp. 1609-1619
- [Cul78a] Culpan, E. A.; Barnby, J. T.: The metallography of fracture in cast nickel aluminium bronze; Journal of Materials Science; 13; (1978); S. 323-328
- [Col78] Collins, P.; Duquette, D. J.: Corrosion Fatigue Behaviour of a Duplex Aluminum Bronze Alloy; The metallography of fracture in cast nickel aluminium bronze; Corrosion: A Journal of Science and Engineering; 34; (1978); S. 119-124
- [Eic06] Eichler, J.; Hoffman, M.; Eisele, U.; Rödel, J.: R-curve behaviour of 2Y-TZP with submicron Grain size; Journal of the European Ceramic Society; 26; (2006); S. 3575-3582
- [Eic07] Eichler, J.; Rödel, J.; Eisele, U.; Hoffman, M.: Effect of Grain Size on Mechanical Properties of Submicrometer 3Y-TZP: Fracture Strength and Hydrothermal Degradation; Journal of the American Ceramic Society; 90 9; (2007); S. 2830-2836
- [Fün09] Fünfschilling, S.; Fett, T.; Hoffmann, M. J.; Oberacker, R.; Jelitto, H.; Schneider, G. A.; Härtelt, M.; Riesch-Oppermann, H.: Bridging stresses from R-curves of silicon nitrides; Journal of Materials Science; 44; (2009); S. 3900-3904
- [HON08] Hon, M.; DelRoi, F.; White, J.; Kendig, M.; Carraro, C.; Maboudian, R.: Cathodic corrosion of polycrystalline silicon MEMS; sensors and actuators; im Druck; doi: 10.1016/j.sna.2007.12.006
- [HUB06] Huber, N.; Tyulyukovskiy, E.; Kraft, O.: On the analysis of the stress-strain behavior of thin metal films on substrates using nanoindentation; Philosophical Magazine; Vol.86 Nos. 33-35 (2006); pp. 5505-5519
- [KAH08] Kahn, H.; Avishai, A.; Ballarini, R.; Heuer, A. H.: Surface oxide effects on failure of polysilicon MEMS after cyclic and monotonic loading; scripta materialia; im Druck; doi: 10.1016/j.scriptamat.2007.12.025
- [Kas06] Kasanická, B.; Müller, M.; Auhorn, M.; Schulze, V.; Bauer, W.; Beck, T.; Ritzhaupt-Kleissel, H. J.; Löhe, D.: Correlations between production process, states and mechanical properties of microspecimens made of zirconia; Microsystem Technologies; 12; (2006); S. 1133-1141
- [Kas08] Kasanická, B.: Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen für das Urformen von Mikroproben; Dissertation, Universität Karlsruhe (TH); Shaker Verlag GmbH, Aachen; (2008)
- [Kou04] Kounga Njiwa, A. B.; Fett, T.; Rödel, J.; Quinn, G. D.: Crack-Tip Toughness Measurements on a Sintered Reaction-Bonded Si_3N_4 ; Journal of the American Ceramic Society; 87 8; (2004); S. 1502-1508
- [KRA01] Kraft, O.; Saxa, D.; Haag, M.; Wanner, A.: The effect of temperature and strain rate on the hardness of Al and Al-based foams as measured by nanoindentation; Z. Metallk.; 92 (2001); pp. 1068-1073
- [KRU05] Kružic, J. J.; Cannon, R. M.; Ritchie, R. O.: Effects of moisture on Grain-Boundary strength, fracture, and fatigue properties of alumina; Journal of the american ceramic society; 88 8 (2005); pp. 2236-2245
- [Nic93] Nickel, J.: Beanspruchungszustand; In: Sähn, S.; Göldner, H.; Bruch- und Beurteilungskriterien in der Festigkeitslehre; 2. verb. Auflage; Fachbuchverlag Leipzig; (1993)

- [OLI92] Oliver, W. C.; Pharr, G. M.: An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentations experiments; *J. Mater. Res.*; 7 (1992); pp. 1564-1583
- [Ott94] Ott, D.: Analysis of Common Casting Defects; *Gold Technology*; 13; (1997); S. 2-15
- [Ott01] Ott, D.: *Handbook on Casting and Other Defects in Gold Jewellery Manufacture*; London: World Gold Council; Nachdruck; (2001)
- [Rög08b] Rögner, J.; Kerscher, E.; Schulze, V.; Löhe, D.: Mechanical Properties of Primary Shaped Notched Micro Specimens Made of Aluminum Bronze; *Advanced Engineering Materials*; 10 6; (2008); S. 529-533
- [SCH03] Schwaiger, R.; Dehm, G.; Kraft, O.: Cyclic Deformation of Polycrystalline Cu Films; *Phil. Mag.*; 83 (2003); pp. 693-710
- [SCH04] Schwaiger, R.; Kraft, O.: Analyzing the mechanical behavior of thin films using nanoindentation, cantilever microbeam deflection, and finite element modelling; *J. Mat. Res.*; 19 (2004); pp. 315-324
- [SCH07] Schwind, Th.; Kerscher, E.; Lang, K.-H.; Löhe, D.: Influence of biaxial cyclic loadings on the fatigue behaviour of high-performance-ceramics containing glassy phases. 10th International Conference and Exhibition of the European Ceramic Society, 17.-21.07.2007 Berlin, pp. 248-253, ISBN 3-87264-022-4
- [SIN92] Singh, R. N.; Tiwari, S. K.; Singh, W. R.: Effects of Ta, La and Nd additions on the corrosion behaviour of aluminium bronze in mineral acids; *Journal of applied electrochemistry*; 22 (1992); pp. 1175-1179
- [WAL05] Wall, F. D.; Martinez, M. A.; Vandenavyle, J. J.: Corrosion behaviour of structural nickel electrodeposit; *Microsystem Technologies*; 11 (2005); pp. 319-330
- [WAN07] Wang, X.; Lu, P.; Dai, N.; Liao, C.; Wang, Y.; Zheng, Q.; Guo, X.; Zhang, Q.: Femtosecond laser direct fabrication of metallic micrcantilevers for a micro-corrosion-Fatigue test; *Journal of Micromechanics and Microengineering*; 17 (2007); pp. 1307-1313
- [Sch89] Schmidt-Thomas, Kh. G.; Happele, Th.; Wunderlich, R.: Untersuchung des SwRK-Verhaltens des hochreinen martensitaushärtenden Stahles X5CrNiCuNb 17 4 PH im Vergleich zum weichmartensitischen Stahl X4CrNiMo 16 5 1 ESU in chloridhaltigen wäßrigen Medien Teil 2; *Werkstoffe und Korrosion*; 40 (1989); S. 427-436

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

- **Begutachtete Veröffentlichungen**

- [1] Müller, M.; Rögner; Bauer, W.; Knitter, R.: Influence of the surface constitution on the as-sintered strength of Si_3N_4 microspecimens, *Mat Science and Engng A* 528 (2011) S. 7895– 7900
- [2] Rögner, J.; Lang, K.-H.; Baumeister, G; Schulze, V.: Microstructure and mechanical properties of micro tensile specimens made of CuAl10Ni5Fe4 produced by micro casting, *Microsyst Technol* 17, (2011) S. 301–311, DOI 10.1007/s00542-011-1234-x
- [3] Rögner, J: Mechanische Eigenschaftenurgeformter Mikroproben aus CuAl10Ni5Fe4, ZrO_2 und Si_3N_4 ; Dissertation, Karlsruhe Institut für Technologie, 2010
- [4] Okolo, B., Rögner, J.; Kerscher, E.; Beck, T.; Schulze, V.; Wanner A.; Löhe, D.: Size Effects in Aluminium Bronze Cast Specimens: Smart Systems Integration, Michel, B.; Lang, K.-D. (Eds.), Verlag Goldenbogen Dresden (2010)
- [5] Müller, M.; Rögner, J.; Okolo, B.; Bauer, W.; Knitter, R.: Processing of micro-components made of sintered reaction-bonded silicon nitride (SRBSN). Part 2: Sintering behaviour and micro-mechanical properties; *Ceramics International* 36 (2010) 707–717

- **Nicht begutachtete Veröffentlichungen**

- [6] Rögner, J.; Müller, M., Lang, K.-H.; Schulze, V.: Sintered Reaction Bonded Silicon Nitride for Micro Mechanical Components, *Proceedings of the 7th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture 4M*, Bertrand Fillon, Chantal Khan-Malek and Stefan Dimov (Eds.), (2010), S. 231- 235, Research Publishing, Bourg en Bresse and Oyonnax, France, DOI 10.3850/978-981-08-6555-9_132
- [7] Rögner, J.; Okolo, B.; Schneider, J.; Lang, K.-H.; Wanner, A.; Schulze, V.: Charakterisierung und Prüfung von Mikrobauteilen, 4. Kolloquium Mikroproduktion, Vollertsen, F.; Büttgenbach, S.; Kraft, O.; Michaeli (Eds.), W.; Bias-Verlag, 2009, Bremen
- [8] Müller, M., Bauer, W., Knitter, R. and Rögner, J.: Processing of Complex-Shaped Micro Parts by Reaction-Bonding and Sintering of Silicon Nitride, in *Advanced Processing and Manufacturing Technologies for Structural and Multifunctional Materials IV: Ceramic Engineering and Science Proceed-*

- ings, 31 (2010) (eds T. Ohji, M. Singh and S. Mathur), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
doi: 10.1002/9780470944066.ch20
- [9] Çetinel, F. A.; Müller, M.; Rögner, J.; Bauer, W.; Haußelt, J.: *Influence of dispersant on rheology of zirconia-paraffin feedstocks and mechanical properties of micro parts fabricated via LPIM*, Ceramic Engineering and Science Proceedings 31 (8), 2010, 31-43.

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit Januar 2000 im Sonderforschungsbereich gefördert.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufen-de Num- mer	Name, aka- demischer Grad, Dienststel- lung	engere Fachzu- gehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniver- sitären Einrich- tung	Mitarbeit im Projekt in Wo- chenstunden	Katego- rie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1	Kerscher, E., Dr.-Ing.	GE	IWK 1 (IAM-WK)		
	2	Kraft, O., Prof. Dr. rer. nat	Materialforschung	izbs (IAM-WBM)		
	3	Löhe, D., Prof. Dr.-Ing.	WK	IWK I (IAM-WK)		
	4	Lang, K.-H., Dr.-Ing.	S	IWK I (IAM-WK)		
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	5	Lunz, N.				
	6	Welker, R.				
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	7	Rögner, J., Dipl.-Ing.	WK	IWK I (IAM-WK)	39,5	
	8	Gelmedin, D., Dipl.-Ing.	WK	IWK I (IAM-WK)		
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	9	Cand. mach.				
	10	Höhne, S.				

Kürzel	Beschreibung
WK	Werkstoffkunde
GE	Gefüge und Eigenschaften
S	Schwingfestigkeit

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

- 1 Dr.-Ing. E. Kerscher:
Akad. Rat und Leiter der Abteilung „Gefüge und Eigenschaften“ am IWK I (IAM-WK), Wissenschaftliche Federführung des Teilprojektes
- 2 Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kraft:
Lehrstuhl für Zuverlässigkeit im Maschinenbau am izbs (IAM-WBM), Leitung des Teilprojektes gemeinsam mit Dr.-Ing. E. Kerscher

- 3 Prof. Dr.-Ing. D. Löhe:
Leiter des Instituts für Werkstoffkunde I
- 4 Dr.-Ing. K.-H. Lang:
Leiter der Abteilung „Schwingfestigkeit“ am IWK I (IAM-WK)
- 5 N. Lunz:
Techniker, zuständig für Hard- und Software der Mess- und Regelungselektronik
- 6 R. Welker:
Techniker, zuständig für Versuchstechnik und –durchführung

Die unter 1) und 3) bis 6) aufgeführten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind am Institut für Werkstoffkunde I (IAM-WK) beschäftigt und werden aus der Grundausstattung finanziert. Die unter 1) bis 3) aufgeführten Institutsmitglieder sind in ihrer Funktion als Instituts- bzw. Abteilungsleiter vorwiegend mit der Koordination der Arbeiten im Teilprojekt und der strategischen Planung der in Zukunft anzugehenden Forschungsarbeiten befasst. Dr. Kerscher und Prof. Dr. Kraft leiten das Teilprojekt und sind in dieser Funktion unmittelbare Beitreuer des Wiss. Mitarbeiters. Dr. Lang verfügt auf Grund seiner langjährigen Tätigkeit als Leiter der Abteilung „Schwingfestigkeit“ über umfassende Kompetenz im Bereich der Ermüdungsrissausbreitung und wirkt beratend im Teilprojekt mit. Die Techniker 5) und 6) tragen mit ihrer umfangreichen Erfahrung beim Aufbau und der Instandhaltung komplexer Versuchseinrichtungen im Bereich Elektronik (N. Lunz) und Mechanik (R. Welker) entscheidend zum Erfolg des Teilprojekts bei.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

- 7 Dipl.-Ing. J. Rögner (wissenschaftlicher Mitarbeiter) und
- 8 Dipl.-Ing. D. Gelmedin (wissenschaftlicher Mitarbeiter):
Aufgabe des wiss. Mitarbeiters ist die weitgehend selbständige Planung, Durchführung, Auswertung und wissenschaftliche Aufarbeitung der vorgesehenen Versuche, die wissenschaftliche Durchdringung der Ergebnisse, der Methoden zur Bewertung mehrachsiger Beanspruchungen, der Beschreibung von Rissausbreitungsprozessen in Mikroproben und –bauteilen, der Korrosionsversuche sowie der Hochgeschwindigkeitszugversuche. Er koordiniert gemeinsam mit den abformenden Teilprojekten die Beschaffung der Proben und zusammen mit TP D1 die mikroskopischen Untersuchungen, die zur Interpretation der gewonnenen Versuchsergebnisse dienen. Des Weiteren obliegt ihm das direkte Zusammenwirken mit den Bearbeitern der anderen Teilprojekte des SFB und der Bericht über den Fortgang der Arbeiten auf Seminaren, Arbeitskreissitzungen sowie nationalen und internationalen Fachtagungen. Diese komplexe Aufgabenstellung erfordert zwingend einen Mitarbeiter mit abgeschlossenem Hochschulstudium im Bereich Maschinenbau mit Schwerpunkt Werkstoffkunde oder Werkstoffwissenschaften.
- 9 Cand. mach. N.N. (studentische Hilfskraft):
Die studentische Hilfskraft unterstützt den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei Routinearbeiten im Bereich der Versuchsvorbereitung, -durchführung und -auswertung sowie bei der Dokumentation der Ergebnisse.
- 10 S. Höhne (Techniker, E8Ü):
Dem technischen Mitarbeiter obliegt der Aufbau der in dieser Antragsphase neu einzurichtenden Versuchsanlage. Während der gesamten Laufzeit wirkt er an der Konstruktion und Fertigung von Zubehör für die Versuchseinrichtungen mit und ist für deren regelmäßige Wartung und Instandhaltung verantwortlich. Des Weiteren unterstützt er den wissenschaftlichen Mitarbeiter bei den umfangreichen Arbeiten zur Versuchsvorbereitung, Probenvermessung und Probenpräparation.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt D3

5.1.1 Titel:

Tribologie – Tribologische Aspekte der Funktionssicherheit von Mikrokomponenten

Tribology – Reliability of micro components under tribological demands

5.1.2 Projektleitung

Schneider, Johannes, Dr.-Ing., geb. 17.11.1965, deutsch

Karlsruher Institut für Technologie KIT

Institut für Angewandte Materialien IAM-ZBS

Kaiserstr. 12

76128 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608 22916

Telefax: 0721 / 608-922916

E-Mail: johannes.schneider@kit.edu

Zum Gahr, Karl-Heinz, Prof. Dr.-Ing., geb. 14.10.1943, deutsch

Karlsruher Institut für Technologie KIT

Institut für Angewandte Materialien IAM-AWP

Kaiserstr. 12

76128 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608 23897

Telefax: 0721 / 608 24567

E-Mail: karl-heinz.zumgahr@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

5.2.1.1 Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Im Bereich von mikro- und feinwerktechnische Systemen mit beweglichen Teilen, wie z.B. Mikrogetriebe oder -motoren, sind tribologische Fragestellungen unter verschiedenen Gesichtspunkten von großer Bedeutung. Zum einen wird die Funktionsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Mikrosysteme sehr oft durch das Reibungs- und Verschleißverhalten der eingesetzten Materialien bestimmt. So können beispielsweise hohe Reibungskräfte das Anlaufen eines Mikromotors verhindern oder zu einer unzulässigen Erwärmung des Mikrosystems führen und bereits geringe Verschleißbeträge können durch lose Verschleißpartikel zum Funktionsverlust führen. Zum anderen können aufgrund von vielfältigen Skaleneffekten Erkenntnisse zum tribologischen Verhalten von Materialpaarungen aus dem Makrobereich nicht ohne weiteres auf den Mikrobereich angewendet werden [WIL_06, ACH_10]. Tribologische Fragestellungen ergeben aber nicht nur beim Betrieb von Mikrosystemen, sondern auch bei der Fertigung von Mikrokomponenten. Sollen Mikrobauenteile aus metallischen oder keramischen Materialien genutzt werden, bietet sich für deren Herstellung in Großserie insbesondere das μ -Pulverspritzgießen (μ PIM) an [ZAU_06, ATT_11]. Die für das μ PIM notwendigen Formeinsatzwerkzeuge, die durch die gefüllten und teils hoch abrasiven Formmassen einer enormen Verschleißbeanspruchung ausgesetzt, müssen dabei zur Sicherstellung einer gleichbleibend hohen Qualität der abgeformten Bauteile einen hohen Verschleißwiderstand aufweisen.

Das Teilprojekt D3 beschäftigt sich daher im Rahmen seiner Forschungsarbeiten mit der wissenschaftlichen Aufklärung der tribologischen Wechselwirkungen im mikrotribologischen Gleit- und Wälzkontakt sowie mit dem Verschleiß- und Entformungsverhalten beim Mikro-Pulverspritzgießen. Durch das vertiefte Verständnis der Einflüsse von Mikrostruktur, Oberflächen- und Randschichtzustand, die sich fertigungsbedingt einstellen, sowie der Beanspruchungs- und Umgebungsbedingungen auf das tribologische Verhalten soll die Basis für die Entwicklung von tribologisch hoch beanspruchbaren, funktionssicheren mechanischen Mikrosystemen und Abformwerkzeugen geschaffen werden.

Im Rahmen der bisherigen mikrotribologischen Untersuchungen unter Gleit- und Wälzbeanspruchung wurden als Problemfelder insbesondere das unbefriedigende Reibungs- und Verschleißverhalten der keramischen Gleitpaarungen im Trockenlauf sowie das Fehlen eines angepassten, mikroauglichen Schmierungskonzeptes identifiziert. Die erfolgreiche Lösung dieser Fragestellungen ist für die Realisierung von tribologisch hoch belastbaren, funktionssicheren mechanischen Mikrosystemen aus metallischen und keramischen Materialien unumgänglich. Daher wurden in der jetzt abgeschlossenen Förderphase die Möglichkeiten einer Bauteil-Nachbehandlung zur Verbesserung der tribologischen Belastbarkeit untersucht. Hierbei stand insbesondere die Reduzierung der Verschleißintensität und der Reibungszahl der keramischen Eigenpaarungen im Trockenlauf im Vordergrund. Als Verfahren zur gezielten Beeinflussung des Oberflächen- und Randschichtzustandes wurden das abrasive Mikrostrahlen (Kooperation mit Teilprojekt D1) sowie eine thermische Nachbehandlung sowie eine lasergestützte Wirkflächentexturierung betrachtet. Im Hinblick auf das 2K-Mikropulverspritzgießen von beweglichen Bauteilverbindungen erfolgten tribologische Modelluntersuchungen an Fremdpaarungen. Weiterhin wurden in Modelluntersuchungen die Möglichkeiten zum Einsatz von Festschmierstoff-Vorbeschichtungen sowie einer werkstoffseitigen Optimierung z.B. durch das Einbringen tribologisch günstiger zweiter Phasen (Kooperation mit Teilprojekt A3) evaluiert. Ergänzt wurden die mikrotribologischen Modellversuche durch Experimente zur Aufklärung geometrischer und mikrostruktureller Skaleneffekte unter Gleitbeanspruchung.

Die Ergebnisse der bisher durchgeführten Modelluntersuchungen zum μ PIM haben deutlich gemacht, dass neben der Auswahl der Formeinsatzmaterialien insbesondere deren fertigungsbedingter Oberflächen- und Randschichtzustand sowie die Zusammensetzung der Formmassen einen maßgeblichen Einfluss auf das Verschleiß- und Entformungsverhalten haben. Daher wurden in Kooperation mit den Teilprojektpartnern, die sich mit der Strukturierung (Teilprojekte B4, B6, Z3) bzw. mit der Nachbehandlung (Teilprojekt B5) von Formeinsätzen sowie mit der Formmassenentwicklung (Teilprojekt B1) beschäftigen, die Modelluntersuchungen zum Verschleiß- und Entformungsverhalten von Formeinsätzen fortgeführt, um die Auswirkungen neuer Fertigungs- und Nachbehandlungsverfahren bzw. -strategien sowie neu entwickelter Bindersysteme zu charakterisieren.

5.2.1.2 Mikrokomponenten unter Gleit- und Wälzbeanspruchung

Versuchsmaterial

Für die Modelluntersuchungen zum Verhalten unter Gleit- und Wälzbeanspruchung wurden scheibenförmige (Mikrotribometer: Ø 8 mm x 2 mm; Makrotribometer: Ø 30 mm x 6 mm) keramische Probekörper aus Zirkondioxid (ZN101B, 3Y-TZP) und Siliziumnitrid (SL200BG) mit polierten Oberflächen ($R_a = 0,2 - 0,3 \mu\text{m}$) eingesetzt. Neben den polierten Scheiben wurden auch solche eingesetzt, die nach dem Polieren bei 1300°C an Umgebungsatmosphäre für 2 h geglüht (nur ZrO_2) oder durch abrasives Mikrostrahlen (Teilprojekt B5) mit einem Gemisch aus SiC - und Al_2O_3 -Partikeln mit Glaskugeln (Körnung jeweils 10 bis 20 μm) behandelt wurden. In Abb. 1 sind REM-Gefügeaufnahmen der beiden Keramiken sowie von ZrO_2 -Oberflächen in unterschiedlichen Bearbeitungszuständen dargestellt. Die Si_3N_4 -Keramik SL200BG war bei einer mittleren Korngröße von 1,2 μm durch eine ausgeprägte Glasphase gekennzeichnet (Abb. 1a). Die Härte lag bei 1650 HV0,5. Die ZrO_2 -Keramik ZN101B mit einer Härte von 1330 HV0,5 wies eine mittlere Korngröße von 0,3 μm auf. Durch die thermische Nachbehandlung bildete sich auf der Oberfläche der ZrO_2 -Scheiben eine ausgeprägte Reliefstruktur entsprechend der Korngröße der Keramik (Abb. 1d) aus. Die Rauheitskennwerte stiegen durch die thermische Nachbehandlung nur unwesentlich an. Das abrasive Mikrostrahlen dagegen führte zu einem Aufrauen der Oberflächen und zu einem Anstieg des R_a -Wertes auf 0,16 μm (Abb. 1e). Als Gegenkörper im Gleitkontakt wurden Keramik- (ZrO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4) bzw. Hartmetallkugeln (WC-Co mit 6% Co) mit dem Durchmesser von $1,588 \pm 0,025 \text{ mm}$ (Mikrotribometer) bzw. 4,0 bis 10,3 mm (Makrotribometer) verwendet. Die im polierten Anlieferungszustand eingesetzten Kugeln wiesen mittlere R_a -Werte zwischen 0,014 μm (ZrO_2) und 0,019 μm (WC-Co) auf. Zusätzlich wurden verschiedene ZrO_2 -Qualitäten (CeO_2 - bzw. Y_2O_3 -stabilisiert) aus den Teilprojekten B1 bzw. C5 sowie Si_3N_4 -Keramiken mit variiertem Anteil an BN, die im Teilprojekt A3 entwickelt wurden, in die mikrotribologischen Untersuchungen unter einsinniger Gleitbeanspruchung mit einbezogen. Bei den Untersuchungen im Wälzkontakt wurden standardmäßig polierte Scheiben mit ebener Mantelfläche gegen solche mit einer gekrümmten Mantelfläche (Krümmungsradius = 4 mm) gepaart. Zusätzlich wurden auch unter Wälzbeanspruchung Probekörper mit den bereits oben beschriebenen alternativen Oberflächenzuständen in die Untersuchungen einbezogen.

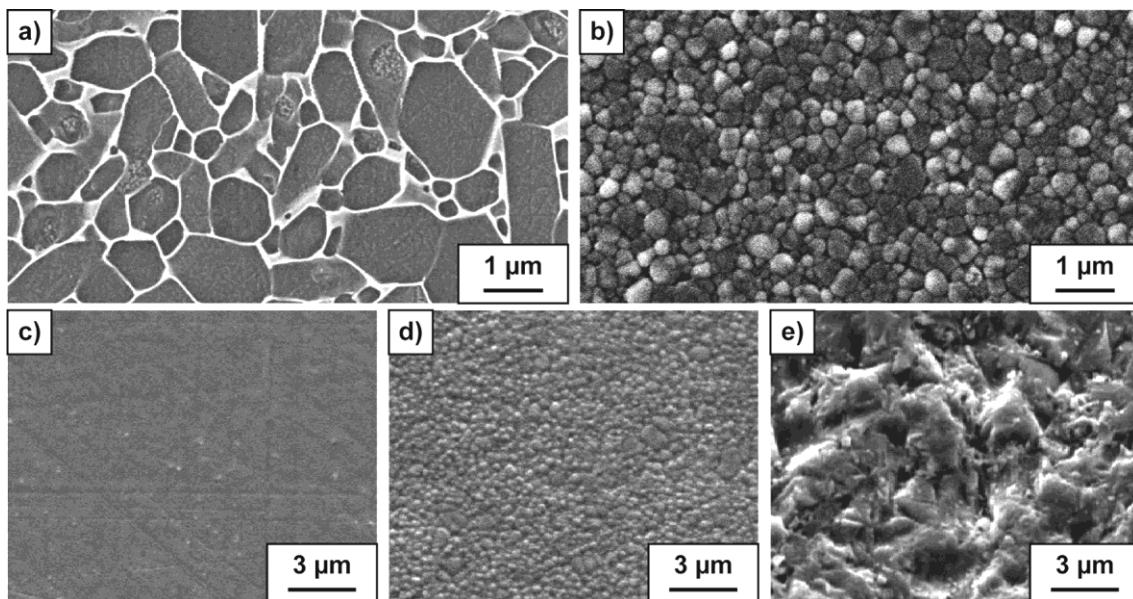


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Gefügeaufnahmen der tribologisch charakterisierten (a) Si_3N_4 - (SL200BG) und (b) ZrO_2 - (ZN101B) Keramiken sowie Aufnahmen der Oberflächen unterschiedlich bearbeiteter ZrO_2 -Scheiben: (c) poliert, (d) poliert und 2 h bei 1300°C geglüht, (e) poliert und mikrogestrahl mit einem Gemisch aus SiC , Al_2O_3 und Glasperlen (TP B5).

Experimentelle Methoden

Die mikrotribologischen Experimente unter ungeschmierter, einsinniger Gleitbeanspruchung (Abb. 2a) erfolgten bei Raumtemperatur und einer relativen Luftfeuchte von 50% in einem Kugel/Scheibe-Mikrotribometer über einen Gleitweg von 1000 m. Als Standardbedingungen wurden eine Normalkraft von 400 mN und eine Gleitgeschwindigkeit von 400 mm/s gewählt. Darüber hinaus wurden Versuchsläufe bei Normalkräften von 100, 200 und 800 mN durchgeführt. Ergänzend zu den Untersuchungen im Mikrotribometer wurden im Hinblick auf die Charakterisierung von geometrischen und mikrostrukturellen Skaleneffekten in einem Makrotribometer Modellversuche mit Normalkräften zwischen 0,75 und 5 N durchgeführt, wobei die übrigen Belastungs- und Umgebungsbedingungen denen der mikrotribologischen Experimente glichen.

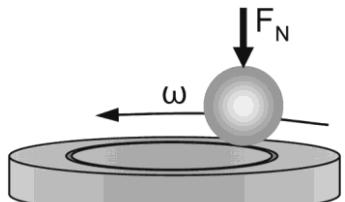
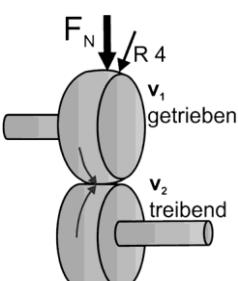
a) Gleitkontakt	Mikrotribometer	Makrotribometer	
	Normalkraft F_N Gleitgeschwindigkeit v Gleitweg s Temperatur T Umgebungsmedium Kugeldurchmesser \varnothing_K Scheibendurchmesser \varnothing_S Reibspurdurchmesser \varnothing_{RS}	100 - 800 mN 400 mm/s 1000 m RT ($20 - 22^\circ\text{C}$) Luft, 50% rel. Feuchte 1,588 mm 8 mm 6 mm	0,75 - 5 N 400 mm/s 1000 m RT ($20 - 22^\circ\text{C}$) Luft, 50% rel. Feuchte 4,0 - 10,3 mm 30 mm 16 bzw. 24 mm
b) Wälzkontakt	Normalkraft Wälzgeschwindigkeit Schlupf Überrollungen Temperatur Umgebungsmedium Scheibendurchmesser Radius der Kontaktfläche	$F_N = 250 \text{ mN}$ $v_1 = 800 \text{ mm/s}, v_2 = 880 \text{ mm/s}$ $S = 10\%$ $N = 8 \cdot 10^5$ $T = \text{RT} (20 - 22^\circ\text{C})$ destilliertes Wasser $\varnothing_S = 8 \text{ mm}$ $r_K = 4 \text{ mm} (\text{nur getriebene Scheibe})$	
			

Abb. 2: Schematische Darstellung der Modellsysteme, Versuchsparameter und Probengeometrien für die tribologischen Untersuchungen unter (a) Gleit- und (b) Wälzbeanspruchung.

Für die Untersuchungen im Wälzkontakt wurden in einen speziell hierfür entwickelten Modelltribometer zwei unabhängig voneinander angetriebene, scheibenförmige Prüfkörper mit definiertem Schlupf aufeinander abgewälzt (Abb. 2b). Als Standardbedingungen wurden eine Normalkraft von 250 mN, eine Umfangsgeschwindigkeit $v_1 = 800$ mm/s der getriebenen Scheibe und 8×10^5 Überrollungen gewählt, wobei über die Geschwindigkeit $v_2 = 880$ mm/s der treibenden Scheibe ein Schlupf von 10% eingestellt wurde.

Während der Versuchsläufe wurden die Reibungszahl und der lineare Verschleißbetrag kontinuierlich aufgezeichnet. Nach Versuchsende wurden zusätzlich die Verschleißbeträge sowohl für die Scheiben als auch die Kugeln bestimmt. Hierbei konnte in der Regel an den Scheiben aus den Gleitversuchen kein messbarer Verschleiß festgestellt werden, so dass sich die Angaben zu Verschleißbeträgen im weiteren Verlauf stets auf die Kugeln beziehen.

Einfluss des Gegenkörpers (Fremdpaarungen) unter Gleitbeanspruchung

Im Hinblick auf die Realisierung beweglicher Bauteilverbindungen mit Hilfe des 2K-Mikropulverspritzgießens im Teilprojekt C5 wurden umfangreiche Untersuchungen mit ZrO_2 in Fremdpaarung mit Al_2O_3 und WC-Co durchgeführt. In Abb. 3 sind die Reibungszahl und der lineare Verschleißbetrag für die Paarungen der ZrO_2 -Keramik ZN101B mit ZrO_2 -, Al_2O_3 - bzw. WC-Co-Kugeln unter ungeschmierter Gleitbeanspruchung in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg dargestellt. Die Reibungszahl der ZrO_2 -Selbstpaarung erreichte nach einem Gleitweg von etwa 100 m ein Maximum mit Werten um $\mu = 1,0$ und fiel anschließend rasch auf einen quasistationären Wert um $\mu = 0,66$ ab. Während auf den ersten 100 m Gleitweg an der ZrO_2 -Selbstpaarung auf kein messbarer Verschleiß auftrat bzw. ein leicht negativer Verschleißbetrag auf den Aufbau einer Schicht aus Abriebpartikeln in der Kontaktzone hindeutete, stieg der lineare Verschleißbetrag anschließend kontinuierlich an und erreichte zu Versuchsende nach einem Gleitweg von 1000 m einen Wert um 35 μm . Im Gegensatz hierzu wiesen die beiden Fremdpaarungen am Versuchsende lediglich Verschleißbeträge von 2,5 μm (WC-Co/ZN101B) bzw. von weniger als 1 μm (Al_2O_3 /ZN101B) auf. Trotz des sehr geringen Verschleißes lag die quasistationäre Reibungszahl der Paarung WC-Co/ZN101B mit Werten um $\mu = 0,8$ noch über der Reibungszahl der ZrO_2 -Selbstpaarung. Allerdings zeigte die WC-Co/ ZrO_2 -Paarung im Gegensatz zur ZrO_2 -Selbstpaarung keine ausgeprägte Reibungszahlüberhöhung zu Versuchsbeginn. Für die Al_2O_3 / ZrO_2 -Gleitpaarung korrespondierte das günstige Verschleißverhalten mit einem ebensolchen Reibungsverhalten und zu Versuchsende nach einem Gleitweg von 1000 m lag die Reibungszahl mit $\mu = 0,3$ nicht einmal halb so hoch wie für die ZrO_2 -Selbstpaarung.

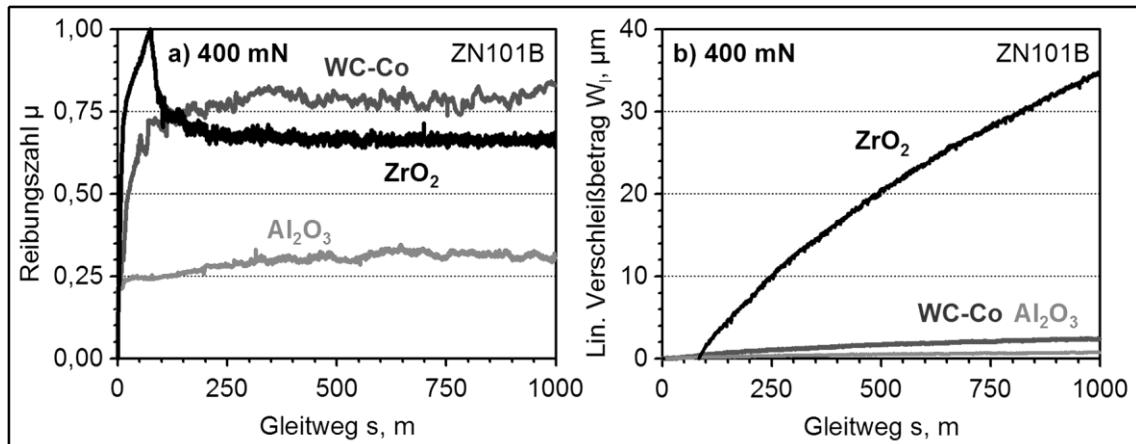


Abb. 3: (a) Reibungszahl und (b) linearer Verschleißbetrag der Paarungen der ZrO_2 -Keramik ZN101B mit ZrO_2 -, Al_2O_3 - und WC-Co-Kugeln in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg unter einsinniger, ungeschmierter Gleitbeanspruchung ($F_N = 400$ mN, $v = 400$ m/s, 50% rF).

Sowohl die Oberfläche der Scheibe (Abb. 4a) als auch der Kugel (Abb. 4b) aus der ZrO_2 -Selbstpaarung waren nach Versuchsende mit einer Schicht aus kompaktierten Verschleißpartikeln bedeckt, die sich teilweise ablöste. Die Oberflächen von Kugel und Scheibe der Al_2O_3 / ZrO_2 -Paarung dagegen wiesen nach Versuchsende eine glatte, polierte Oberfläche auf (Abb. 4b, e), die ebenso wie die niedrige Reibungszahl auf die Bildung einer tribologisch günstigen Hydroxidschicht hindeuten, wie dies für Al_2O_3 -Gleitpaarungen in feuchter Umgebung für eine Beanspruchung in der Verschleißtieflage beschrieben wurde [BER_91]. Auch bei der WC-Co-Kugel war nach Versuchsende auf der polierten Kontaktfläche die Mikrostruktur deutlich sichtbar und es wurde ein bevorzugter Abtrag der Kobalt-Bindephase beobachtet. Auf der ZrO_2 -Scheibe war eine ausgeprägte Mikrofurchung in Gleitrichtung sowie eine Vielzahl rollenförmiger Verschleißpartikel zu erkennen. Dies deutet auf einen triboochemisch dominierten Verschleiß der Hartmetall-Kugel hin. Durch die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit der ZrO_2 -Scheibe wurden hohe Temperaturen im Tribokontakt und damit die Tribooxidation der Hartmetalloberfläche begünstigt.

Bei weiterführenden Untersuchungen mit den Fremdpaarungen unter geringeren Belastungen von 200 und 100 mN zeigten sich vergleichbare Ergebnisse, d.h. die $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Paarung zeichnete sich im Vergleich zur ZrO_2 -Selbstpaarung durch eine sehr geringe Reibungszahl bei gleichzeitig hohem Verschleißwiderstand aus. Wurde die Belastung allerdings auf 800 mN erhöht, kam es auch für die $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Fremdpaarung zum Übergang in die bruchkontrollierte Verschleißhochlage und einen Anstieg des linearen Verschleißbetrages auf 25 bis 30 μm nach einem Gleitweg von 1000 m. Gleitzeitig lag die quasistationäre Reibungszahl der $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Paarung mit $\mu = 0,75$ noch über der Reibungszahl der ZrO_2 -Selbstpaarung ($\mu = 0,65$). Die $\text{WC-Co}/\text{ZrO}_2$ -Fremdpaarung wies auch bei einer Normalbelastung von 800 mN einen geringen Verschleiß von 3 μm nach 1000 m Gleitweg auf. Allerdings lag die quasistationäre Reibungszahl auf dem hohen Niveau der ZrO_2 -Selbstpaarung.

Bei Untersuchungen mit der $\text{WC-Co}/\text{Si}_3\text{N}_4$ -Fremdpaarung unter einer Normalbelastung von 400 mN konnte im Vergleich zur Si_3N_4 -Selbstpaarung eine Reduzierung des Verschleißes um etwa 40% auf 11 μm bei einer geringfügig niedrigeren quasistationären Reibungszahl im Bereich um $\mu = 0,6$ beobachtet werden.

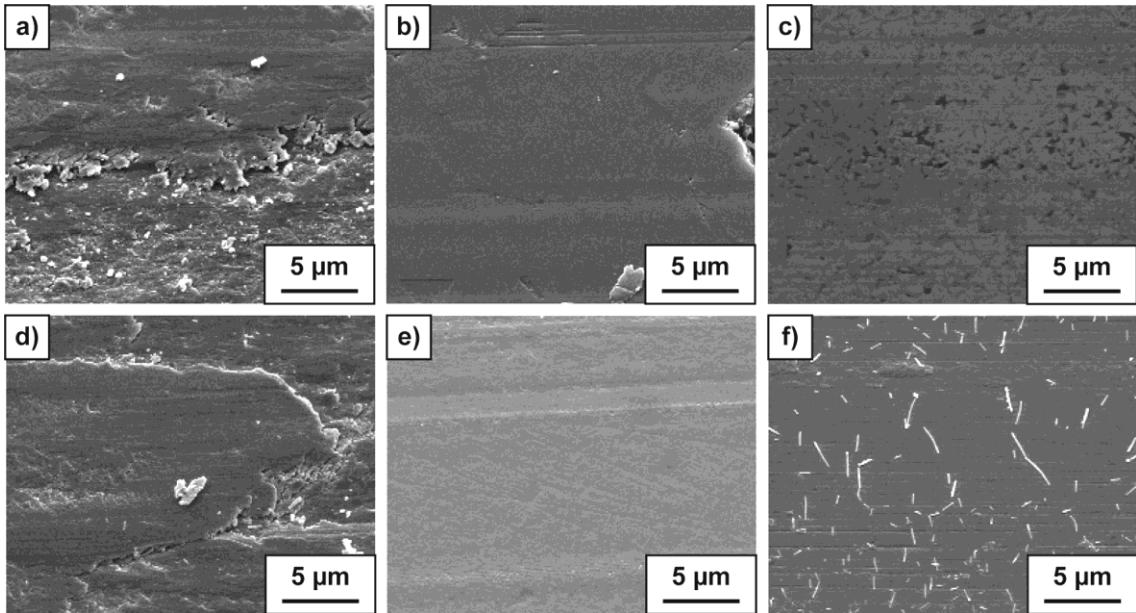


Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen beanspruchter Oberflächen der (a - c) ZrO_2 -Scheiben (ZN101B) sowie der mit diesen gepaarten (d) ZrO_2 -, (e) Al_2O_3 - und (f) WC-Co-Kugeln nach einem Gleitweg von 1000 m im einsinnigen Gleitkontakt ($F_N = 400$ mN, $v = 400$ m/s, 50% rF).

In **Abb. 5** sind die Reibungszahl und der lineare Verschleißbetrag für die Fremdpaarung der in den Teilprojekten C5 bzw. B1 entwickelten ZrO_2 -Qualitäten mit Al_2O_3 zusammengestellt. Bei den für die Herstellung der ZrO_2 -Probekörper eingesetzten Formmassen variierte neben der Zusammensetzung des Bindersystems sowohl das eingesetzte ZrO_2 -Pulver als auch der Pulverfüllgrad zwischen 43 und 55 Vol.-%. Ferner wurden die Probekörper je nach Bindersystem unterschiedlich entbindert und gesintert. Hierdurch konnte sichergestellt werden, dass für alle Qualitäten die Dichte oberhalb von 98% der theoretischen Dichte und die mittlere Korngröße im Bereich von 0,3 bis 0,4 μm lag. Trotz der großen Variationsbreite im Herstellungsprozess zeigten sich bei den tribologischen Untersuchungen keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Gleitpaarungen. Nach einem Gleitweg von 1000 m wiesen alle untersuchten Paarungen einen linearen Verschleißbetrag von weniger als 1 μm auf und die mittlere quasistationäre Reibungszahl lag im Bereich zwischen 0,25 und 0,35. Die Verschleißerscheinungsformen auf den beanspruchten Oberflächen der Scheiben und Kugeln glichen denen für die Paarung $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZN101B}$ in Abb. 4b und c dargestellten. Diese Ergebnisse zeigen eindrucksvoll, dass sich die $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Fremdpaarung sehr gut eignet, um mit Hilfe des 2K-Mikropulverspritzgießens tribologisch beanspruchten Bauteilpaarungen zu fertigen. Die Gleitpaarung zeigt sich sehr unempfindlich gegenüber Veränderungen im Herstellungsprozess und erlaubt somit eine große Freiheit bei der Wahl der Prozessparameter. Diese Aussage gilt allerdings nur solange, wie die $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Fremdpaarung unter Beanspruchungsbedingungen betrieben wird, die in der Verschleißtieflage die Entwicklung eines stabilen, sich tribologisch günstig auswirkenden Hydroxidfilms in der Kontaktzone ermöglichen. Kommt es zum Übergang in die bruchkontrollierte Verschleißhochlage ergeben sich keine signifikanten Vorteile gegenüber der ZrO_2 -Selbstpaarung.

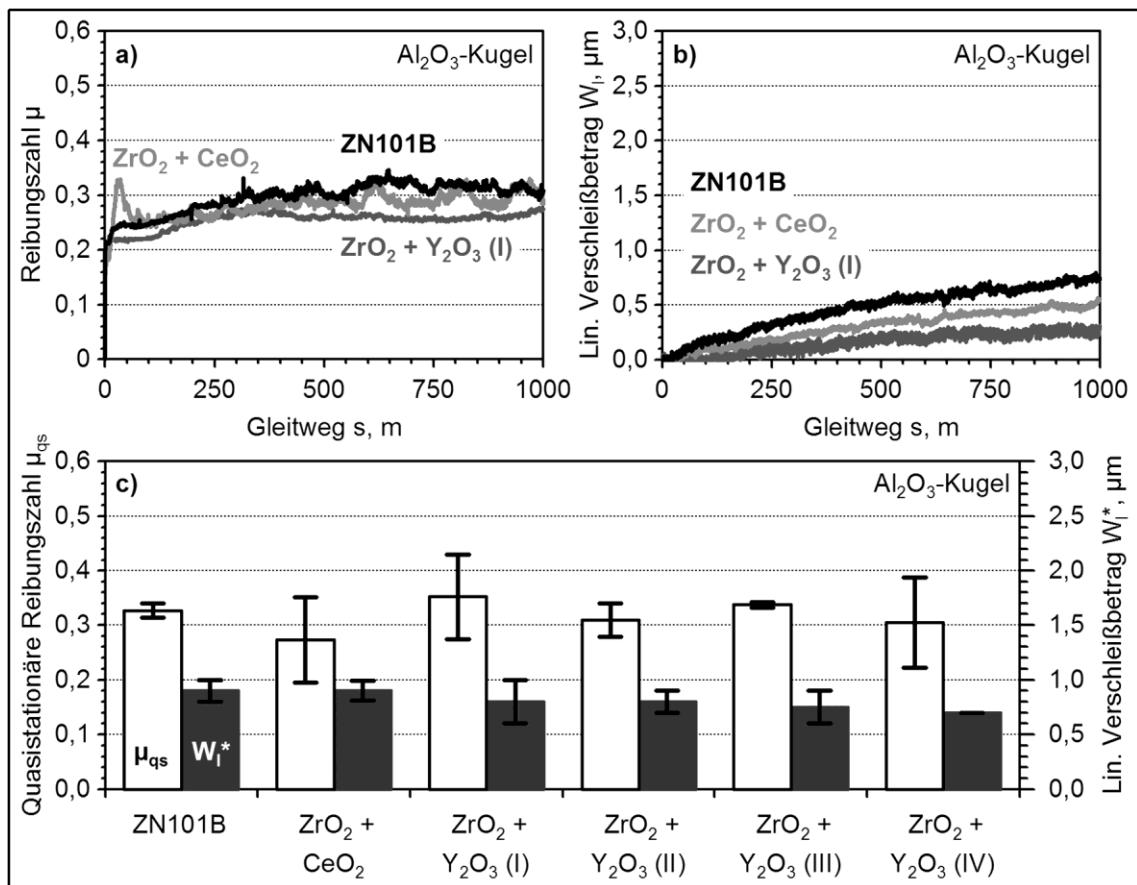


Abb. 5: (a) Reibungszahl und (b) linearer Verschleißbetrag der Fremdpaarungen der ZrO_2 -Keramiken ZN101B, $\text{ZrO}_2 + \text{CeO}_2$ und $\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$ (I) mit Al_2O_3 in Abhängigkeit vom Gleitweg sowie (c) quasistationäre Reibungszahl μ_{qs} und linearer Verschleißbetrag W_l^* nach 1000 m für alle untersuchten $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Fremdpaarungen unter ungeschmierter Gleitbeanspruchung ($F_N = 400 \text{ mN}$, $v = 400 \text{ m/s}$, 50% rF).

Einfluss des fertigungsbedingten Oberflächenzustandes unter Gleitbeanspruchung

Ein Ansatzpunkt zur Verbesserung des tribologischen Verhaltens der keramischen Selbstpaarungen im ungeschmierten Gleitkontakt ist die Oberflächentopographie, die sich mit Hilfe einer gezielten Parameterauswahl bei der Herstellung oder Nachbehandlung der Probekörper einstellen lässt.

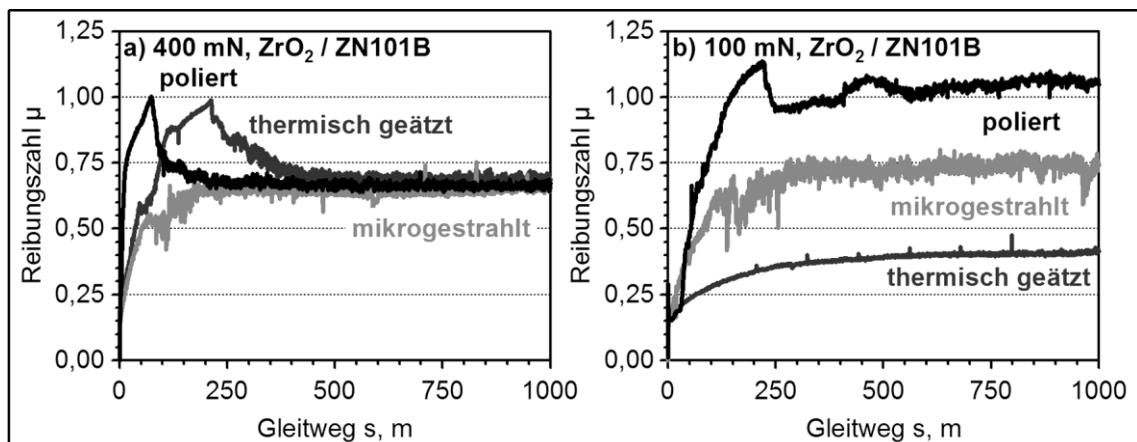


Abb. 6: Reibungszahl der selbstgepaarten ZrO_2 -Keramik ZN101B mit unterschiedlichen Ausgangsoberflächenzuständen in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg unter einsinniger, ungeschmierter Gleitbeanspruchung bei Normalbelastungen von (a) 400 mN und (b) 100 mN ($v = 400 \text{ m/s}$, 50% rF).

Abb. 6 zeigt für die ZrO_2 -Selbstpaarungen (ZN101B) mit unterschiedlichem Oberflächenzustand der Scheiben (poliert, thermisch geätzt, mikrogestrahl) die Reibungszahl in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg bei Normalbelastungen von (a) 400 mN und (b) 100 mN. Unter einer Normalbelastung von 400 mN

stellte sich unabhängig vom anfänglichen Oberflächenzustand für alle drei Gleitpaarungen eine quasistationäre Reibungszahl im Bereich zwischen $\mu = 0,65$ und $0,7$ ein. Infolge des bruchkontrollierten Verschleißverhaltens lagen die nach einem Gleitweg von 1000 m bestimmten Verschleißbeträge zwischen $22\text{ }\mu\text{m}$ (thermisch geätzt) und $35\text{ }\mu\text{m}$ (poliert). Die beanspruchten Oberflächen sowohl der Scheiben als auch der Kugeln waren nach Versuchende von Schichten aus kompaktierten Verschleißpartikeln bedeckt, wie sie in Abb. 4a, und c exemplarisch für die Paarung mit polierter Scheibenoberfläche dargestellt sind.

Signifikante Unterschiede bzgl. des Reibungsverhaltens ergaben sich erst bei einer auf 100 mN verringerten Belastung. Während die quasistationäre Reibungszahl für die Paarung mit polierter Scheibenoberfläche auf einen Wert von $\mu = 1,05$ anstieg, nahm sie für die Paarung mit der thermisch geätzten Scheibenoberfläche auf einen Wert von $\mu = 0,4$ ab. Für die Paarung der mikrogestrahlten ZrO_2 -Scheibe stieg die Reibungszahl bei den Versuchen mit niedrigerer Normalbelastung geringfügig an und erreichte Werte um $\mu = 0,75$. Im Gegensatz zu den Versuchen bei 400 mN wurden bei 100 mN alle untersuchten Gleitpaarungen in der Verschleißtieflage beansprucht und die nach einem Gleitweg von 1000 m ermittelten linearen Verschleißbeträge lagen zwischen $1,7\text{ }\mu\text{m}$ (poliert) und $2,3\text{ }\mu\text{m}$ (mikrogestrahl bzw. thermisch geätzt). Während der Versuchsläufe bei 100 mN kam es bei der polierten Scheibenoberfläche zu einer weiteren Einglättung. Rollenförmige Verschleißpartikel auf der Oberfläche deuten auf das Ablösen dünner, tribochemisch gebildeter Oberflächenfilme hin (Abb. 7a), wie sie für oxidkeramische Gleitpaarungen unter feuchten Umgebungsbedingungen in der Verschleißtieflage typisch sind. Im Gegensatz zur polierten Oberfläche war die thermisch geätzte Scheibenoberfläche nach den Versuchen durch eine reliefartige Topographie mit ausgeprägten Plateaus charakterisiert (Abb. 7b), die im Vergleich zur polierten Probe zu einer verringerten realen Kontaktfläche führte. Neben der Topographie müssen als Einflussfaktoren auf das tribologische Verhalten auch die durch unterschiedliche Bearbeitungsprozesse bedingten Eigenspannungen sowie die Phasenzusammensetzung in den Oberflächen der ZrO_2 -Scheiben berücksichtigt werden [Nov_07].

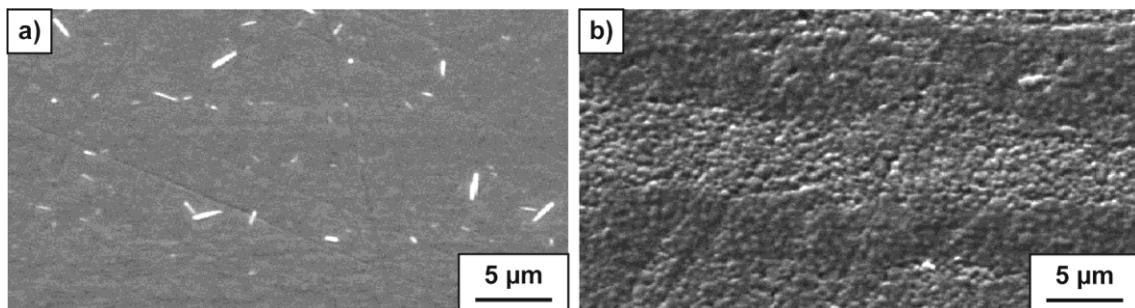


Abb. 7: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen tribologisch beanspruchter Oberflächen von ZrO_2 -Scheiben mit (a) polierter bzw. (b) thermisch geätzter Ausgangsoberfläche nach einem Gleitweg von 1000 m im einsinnigen Gleitkontakt gegen ZrO_2 -Kugeln unter einer Normalbelastung von 100 mN ($v = 400\text{ m/s}$, $s = 1000\text{ m}$, 50% rF).

Neben den oben beschriebenen Oberflächenvarianten wurden weitere Untersuchungen mit polierten ZrO_2 -Scheiben durchgeführt, deren Wirkflächen mittels Laserstrahlung texturiert wurden. Hierzu wurden mit Hilfe eines Excimer-Lasers Strukturen im sub- μm -Bereich sowie mit einem Yb:YAG-Laser Strukturen im Abmessungsbereich von 20 bis $30\text{ }\mu\text{m}$ erzeugt. Bei der tribologischen Charakterisierung konnten gegenüber der ZrO_2 -Paarung mit polierter Scheibenoberfläche keine Vorteile beobachtet werden, so dass dieser Ansatz der Probennachbehandlung nicht weiter verfolgt wurde.

Einfluss des fertigungsbedingten Oberflächenzustandes unter Wälzbeanspruchung

Die sich im ungeschmierten Gleitkontakt bei geringen Normalbelastungen günstig auswirkenden Topographien der thermisch geätzten bzw. mikrogestrahlten Probekörper wurden zusätzlich auch unter wälzender Beanspruchung charakterisiert. Da sich in Voruntersuchungen zeigte, dass sich das ungünstige Verhalten der ungeschmierten Wälzpaarungen mit quasistationären Reibungszahlen um $\mu = 0,72$ durch rauere Ausgangsoberflächen der Prüfkörper nochmals verschlechterte, wurden die Wälzversuche unter Schmierung mit destilliertem Wasser durchgeführt. In Abb. 8 ist die Reibungszahl für ZrO_2 - und Si_3N_4 -Selbstpaarungen mit unterschiedlicher Oberflächentopographie in Abhängigkeit von der Anzahl an Überrollungen im wassergeschmierten Wälzkontakt dargestellt. Für beide Keramiken lag die Reibungszahl für die Paarungen mit den rauen Ausgangsoberflächen (thermisch geätzt bzw. mikrogestrahl) höher als für die Paarungen mit den polierten Ausgangsoberflächen. Während für sie Si_3N_4 -Paarungen im eingelaufenen Zustand Reibungszahlen im Bereich um $0,1$ gemessen wurden, lag die Reibungszahl für die ZrO_2 -Wälzpaarungen nach 8×10^5 Überrollungen mit Werten zwischen $0,3$ (poliert) und $0,37$ (thermisch geätzt bzw. mikrogestrahl) signifikant höher. Zurück geführt wurde dies auf das ausgeprägte Einlaufverhalten von Si_3N_4 in wässrigen Medien, wobei es durch tribochemische Reaktionen zur Glättung der Wirkflächen und zur Ausbildung reibungsmindernder Siliziumhydroxidfilme kommen kann [JOR_04]. ZrO_2 neigt in wässriger Umgebung zwar ebenfalls zur

Bildung von Hydroxidfilmen, diese wirken sich jedoch aufgrund ihrer höheren Scherfestigkeit wenigerreibungsmindernd aus als die Hydroxidfilme auf dem Si_3N_4 .

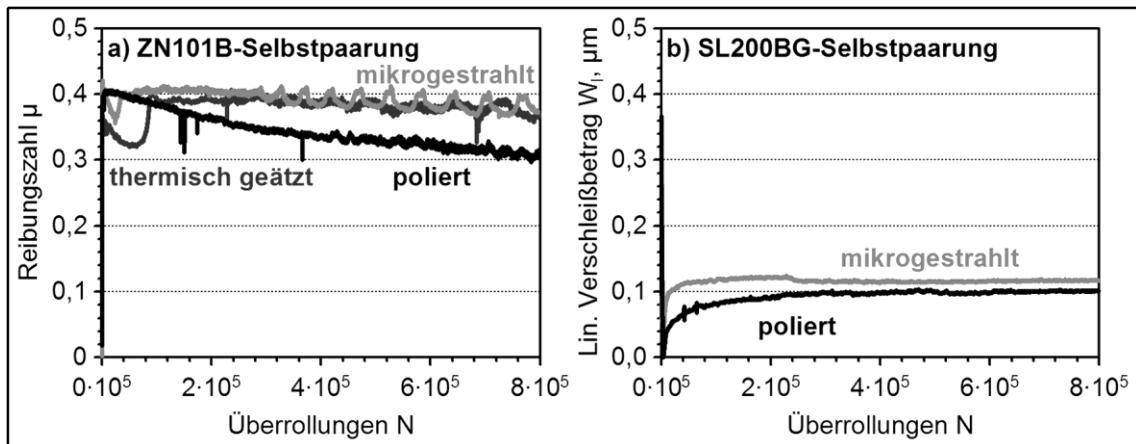


Abb. 8: Reibungszahl der selbstgepaarten (a) ZrO_2 -Keramik ZN101B sowie (b) Si_3N_4 -Keramik SL200BG mit unterschiedlichen Ausgangsoberflächenzuständen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen im wassergeschmierten Wälzkontakt ($F_N = 250 \text{ mN}$, $v_1 = 800 \text{ m/s}$, $S = 10\%$, $N = 8 \cdot 10^5$, destilliertes H_2O).

Mit den zur Verfügung stehenden optischen und taktilen Tastschnittrgeräten war es nach den Versuchsläufen nicht möglich, einen quantifizierbaren Verschleiß an den Wälzprüfkörpern zu bestimmen. Es konnte lediglich eine Oberflächeneinglättung festgestellt werden, wie es die in Abb. 9 exemplarisch dargestellten rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der beanspruchten Oberflächen für die drei mit unterschiedlichen Ausgangsoberflächen eingesetzten ZrO_2 -Scheiben zeigen. Erwartungsgemäß wies die polierte Scheibe mit der höchsten Ausgangsoberflächengüte, die zur niedrigsten Reibungszahl geführt hatte, nach Versuchsende die geringste Rauigkeit auf (Abb. 9a), während die thermisch geätzten bzw. mikrogestrahlten Scheiben mit der höheren Reibungszahl korrespondierend auch nach Versuchsende noch vergleichsweise raue Oberflächen aufwiesen (Abb. 9b, c). Auf der Oberfläche der mikrogestrahlten Scheibe waren dabei noch deutlich die durch das Strahlgut hervorgerufenen Ausbrüche und Risse erkennbar.

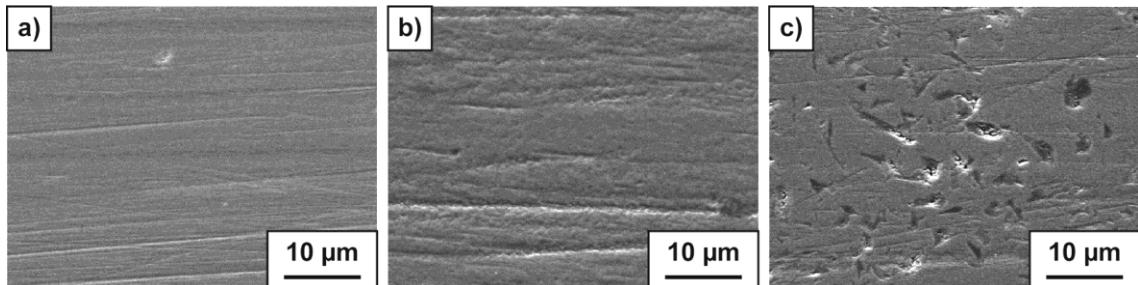


Abb. 9: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen tribologisch beanspruchter Oberflächen von selbstgepaarten ZrO_2 -Scheiben mit (a) polierter, (b) thermisch geätzter und (c) mikrogestrahlter Ausgangsoberfläche nach $8 \cdot 10^5$ Überrollungen im Wälzkontakt ($F_N = 250 \text{ mN}$, $v_1 = 800 \text{ m/s}$, $S = 10\%$, destilliertes H_2O).

Einfluss einer Festschmierstoffzugabe unter Gleitbeanspruchung

Die Möglichkeit, das tribologische Verhalten der Gleitpaarungen durch Festschmierstoffe zu beeinflussen, wurde mit zwei unterschiedlichen Herangehensweisen untersucht. Zum einen wurden im Teilprojekt A3 hergestellte Si_3N_4 -Probekörper mit einem Zusatz von 5 bzw. 10 Gew.-% an BN als insitu-Schmierstoff untersucht und zum anderen wurden ZrO_2 -Scheiben mit unterschiedlichem Oberflächenzustand vor den Versuchen mit einer Graphit-Vorbeschichtung versehen. Hierzu wurden ZrO_2 -Scheiben mit thermisch geätzter bzw. mikrogestrahlter Oberfläche auf einem mit Graphitpulver (mittlerer Partikeldurchmesser $d_m = 6 \mu\text{m}$) bedeckten Poliertuch unter leichtem Druck so lange hin und her bewegt, bis die Oberflächenkavitäten der Oberflächen vollständig mit Graphit gefüllt waren. Auf den polierten Oberflächen konnte auf diese Weise keine Graphitschicht aufgebracht werden, da ohne tiefere Kavitäten die Haftung nicht ausreichend hoch war. Bei tribologischen Vorversuchen zeigte sich darüber hinaus, dass der auf den polierten Scheiben aufgebrachte Graphit im Tribokontakt nicht wirksam werden konnte, da die Vorbeschichtung vor dem Gegenkörper her geschoben wurde und der Festschmierstoff nicht in die Kontaktzone gelangte.

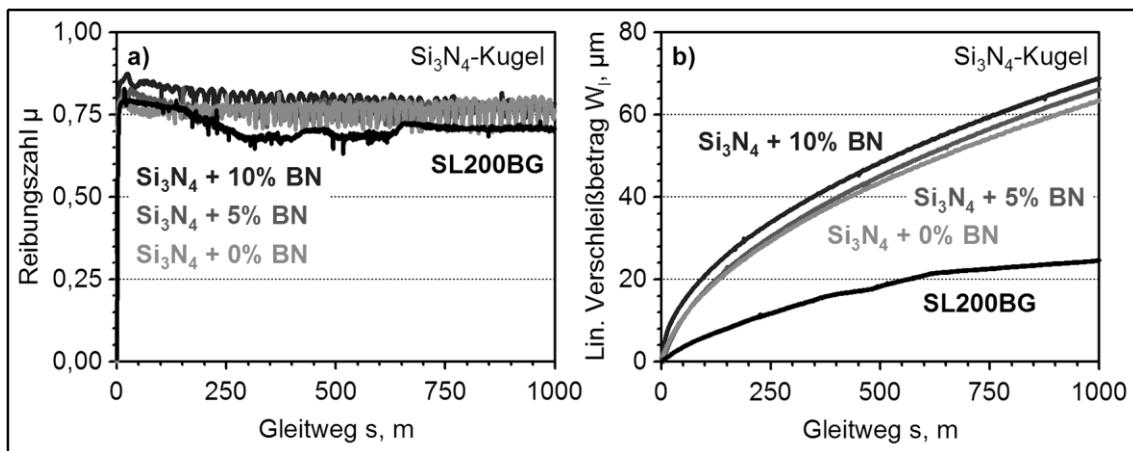


Abb. 10: (a) Reibungszahl und (b) linearer Verschleißbetrag der Si_3N_4 -Keramik SL200BG sowie von drei Si_3N_4 -Keramiken aus dem Teilprojekt A3 mit und ohne BN-Zusatz in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg unter einsinniger, ungeschmierter Gleitbeanspruchung gegen eine Si_3N_4 -Kugel ($F_N = 400 \text{ mN}$, $v = 400 \text{ m/s}$, 50% rF).

Abb. 10 fasst die Ergebnisse der Untersuchungen an den Si_3N_4 -Keramiken mit BN als in-situ-Schmierstoff zusammen. Die quasistationäre Reibungszahl der Paarungen mit den im Teilprojekt A3 hergestellten Si_3N_4 -Keramiken ohne bzw. mit 5 und 10 Gew.-% BN schwankte zwischen $\mu = 0,7$ und 0,8, während für die Paarung der Si_3N_4 -Standardqualität SL200BG im quasistationären Bereich eine vergleichsweise konstant verlaufende Reibungszahl von $\mu = 0,7$ ermittelt wurde. Stärker ausgeprägt waren die Unterschiede im Verschleißverhalten. Hier lag der nach einem Gleitweg von 1000 m ermittelte Verschleißbetrag für die Paarung der Keramik SL200BG mit 25 μm um etwa 40 μm niedriger als der für die übrigen drei Paarungen. Als mögliche Ursache für das Ausbleiben der in der Literatur für Si_3N_4 -BN-Komposite beschriebenen Reibungs- und Verschleißreduktion unter ungeschmierter Gleitbeanspruchung im Vergleich zu reinem Si_3N_4 kommen u.a. die noch nicht zufriedenstellenden mechanischen Eigenschaften der neu entwickelten Materialien in Betracht [CAR_02]. Hierzu werden aktuell noch weiterführende Untersuchungen durchgeführt.

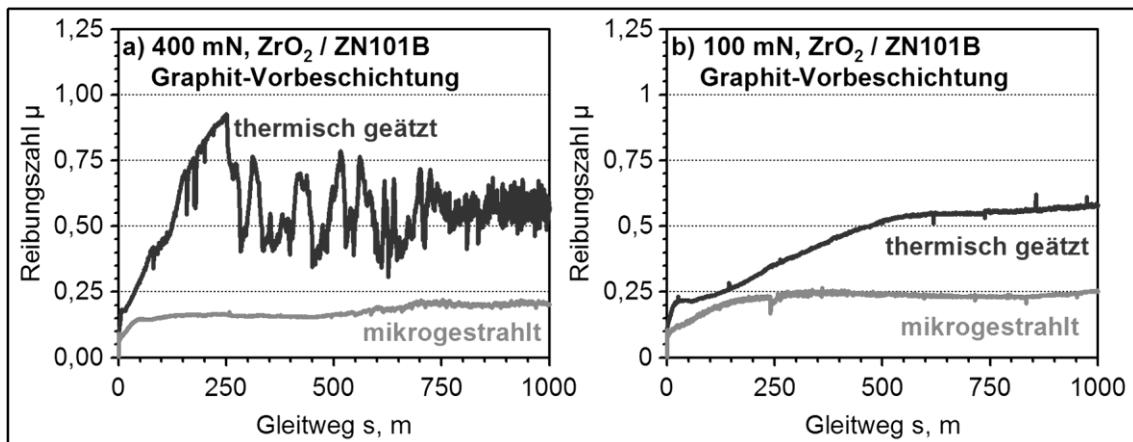


Abb. 11: Reibungszahl der selbstgepaarten ZrO_2 -Keramik ZN101B mit unterschiedlichen Ausgangsoberflächenzuständen und einer Graphit-Vorbeschichtung in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg unter einsinniger, ungeschmierter Gleitbeanspruchung bei Normalbelastungen von (a) 400 mN und (b) 100 mN ($v = 400 \text{ m/s}$, 50% rF).

Der Einfluss einer Graphit-Beschichtung auf das Reibungsverhalten der ZrO_2 -Selbstpaarung (ZN101B) wird aus Abb. 11 ersichtlich. Die Graphit-Beschichtung führt für die Paarung mit der thermisch geätzten Scheibe zu einer geringen Reibungszahl um $\mu = 0,2$ zu Versuchsbeginn, die allerdings bereits nach wenigen Metern Gleitweg ansteigt. Bei den Versuchen mit 400 mN Normalbelastung stieg die Reibungszahl bis auf Werte um 0,9 nach etwa 250 m an. Im quasistationären Zustand schwankte die Reibungszahl der Gleitpaarung dann zwischen $\mu = 0,5$ und 0,65. Unter einer Normalbelastung von 100 mN stieg die Reibungszahl kontinuierlich an und erreichte nach etwa 500 m einen quasistationären Wert um $\mu = 0,56$. Die Reibungszahl lag damit um etwa 40% über der für die ungeschmierte Gleitpaarung ermittelten Reibungszahl von $\mu = 0,4$ (Abb. 6b). Für die Paarung der mikrogestrahlten ZrO_2 -Scheibe wurde bei beiden Normalbelastungen jeweils eine Reibungszahl von weniger als 0,25 ermittelt.

Die in Abb. 12 dargestellten rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen verdeutlichen, dass für die Ausbildung einer gut haftenden, zusammenhängenden Graphitschicht eine ausreichende Anzahl von Kavitäten notwendig ist. Während die Oberflächen der mikrogestrahlten Probekörper nach Versuchen sowohl mit 400 mN als auch mit 100 mN vollständig mit einer Graphitschicht bedeckt sind (Abb. 12a, b), können auf der thermisch geätzten Oberfläche nach Versuchsende nur noch kleinere mit Graphit bedeckte Bereich beobachtet werden (Abb. 12c). Die für eine Normalbelastung von 400 mN im Vergleich zu den Versuchen mit 100 mN etwas niedrigere Reibungszahl der Paarung mit der mikrogestrahlten Scheibenoberfläche korrelierte mit einer deutlich glatteren Oberflächentopographie der Graphitschicht.

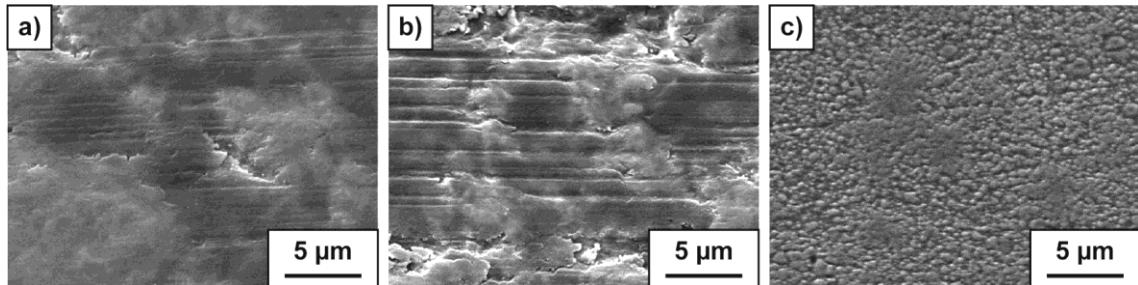


Abb. 12: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen tribologisch beanspruchter Oberflächen von ZrO_2 -Scheiben mit (a, b) mikrogestrahlter bzw. (c) thermisch geätzter Ausgangsoberfläche und einer Graphit-Vorbeschichtung nach einem Gleitweg von 1000 m im einsinnigen Gleitkontakt gegen ZrO_2 -Kugeln unter einer Normalbelastung von (a) 400 mN bzw. (b, c) 100 mN ($v = 400$ m/s, 50% rF).

Geometrische und mikrostrukturelle Skaleneffekte unter Gleitbeanspruchung

Die Untersuchungen zu geometrischen und mikrostrukturellen Skaleneffekten mit den ZrO_2 - und Si_3N_4 -Selbstpaarungen wurden unter zwei unterschiedlichen Belastungsarten durchgeführt. Zum einen wurden die Versuche mit unterschiedlichen Kugeldurchmessern bei gleicher Hertzscher Pressung (d.h. mit unterschiedlichen Normalbelastungen) zu Versuchsbeginn (ZrO_2 : $p_H = 790$ MPa, Si_3N_4 : $p_H = 1010$ MPa) durchgeführt und zum anderen bei gleicher Normalbelastung von 2,5 N.

Abb. 13 zeigt das Reibungs- und Verschleißverhalten der ZrO_2 - bzw. Si_3N_4 -Selbstpaarungen für Versuchsläufe mit gleicher anfänglicher Hertzschen Pressung für alle Kugeldurchmesser. Unter dieser Belastungsart ergaben sich besonders bei den ZrO_2 -Paarungen deutliche Unterschiede in den Reibungszahlwerten, abhängig vom Kugeldurchmesser (Abb. 13a). Nach einem Gleitweg von wenigen Metern, erreichten die Paarungen der 4 oder 5 mm großen Kugeln hohe Reibungszahlwerte zwischen 0,8 und 0,9, die mit zunehmendem Gleitweg abfielen und nach einem Gleitweg von etwa 800 m quasistationäre Werte um 0,72 erreichten. Im Gegensatz hierzu zeigten die Paarungen mit den größeren Kugeldurchmessern von Beginn an deutlich niedrigere und schon nach einem Gleitweg von ca. 50 m konstante Werte von 0,7. Die an den Si_3N_4 -Paarungen gemessenen Reibungszahlwerte (Abb. 13b) lagen besonders im quasi-stationären Bereich mit 0,55 bis 0,65 niedriger als bei ZrO_2 . Auch für Si_3N_4 zeigte sich die Tendenz, dass mit zunehmendem Kugeldurchmesser die quasistationäre Reibungszahl geringer war. Bei Si_3N_4 fielen die zahlreichen Peaks im zeitlichen Verlauf der Reibungszahl, mit besonders starken temporären Erhöhungen bei der Paarung mit der Kugeldurchmesser von 10,3 mm, auf, was auf das heterogene Gefüge zurückgeführt wurde. Im Gegensatz zu der Reibungszahl wurden die größten linearen Verschleißbeträge sowohl bei den ZrO_2 - als auch den Si_3N_4 -Paarungen jeweils mit dem größten Kugeldurchmesser von 10,3 mm gemessen (Abb. 13c, d). Mit abnehmendem Kugeldurchmesser reduzierten sich die Verschleißbeträge. Im Vergleich der beiden untersuchten Materialien waren die linearen Verschleißbeträge bei ZrO_2 bei gleichem Kugeldurchmesser um etwa einen Faktor von 2,5 bis 3,5 höher als bei Si_3N_4 .

Abb. 14 zeigt die Ergebnisse zum Reibungs- und Verschleißverhalten der ZrO_2 - bzw. Si_3N_4 -Selbstpaarungen unter gleicher Normalkraft von 2,5 N für alle gewählten Kugeldurchmesser. Im Fall der ZrO_2 -Paarungen wurden keine signifikanten Unterschiede weder in den Werten noch im Verlauf der Reibungszahl abhängig vom Kugeldurchmesser gemessen (Abb. 14a). Im Gegensatz zu der Belastungsart mit gleicher Hertzscher Pressung (Abb. 13c), trat jetzt der höchste lineare Verschleißbetrag bei der kleinsten Kugel mit dem Durchmesser von 4 mm und der niedrigste Betrag an der Paarung mit dem Kugeldurchmesser von 10,3 mm auf (Abb. 14c). Die gleiche Reihenfolge im Verschleißbetrag ergab sich auch bei den Si_3N_4 -Paarungen (Abb. 14d). Allerdings waren die Verschleißbeträge bei Si_3N_4 wiederum deutlich geringer als bei ZrO_2 . Das Reibungsverhalten (Abb. 14b) der Si_3N_4 -Paarungen mit den Kugeldurchmessern von 5 mm, 7,1 mm und 10,3 mm war sehr ähnlich, wobei die Werte mit zunehmendem Gleitweg kontinuierlich bis auf ca. 0,55 bei dem Gleitweg von 1000 m abfielen. Deutlich anders verlief jedoch die Reibungszahl bei der Paarung mit dem Kugeldurchmesser von 4 mm. Hier stieg der Reibungswert relativ kontinuierlich mit dem Gleitweg bis auf ca. 0,77 bei 1000 m an (Abb. 14b). Der Kurvenverlauf war durch starke temporäre Schwankungen in den Reibungszahlwerten gekennzeichnet.

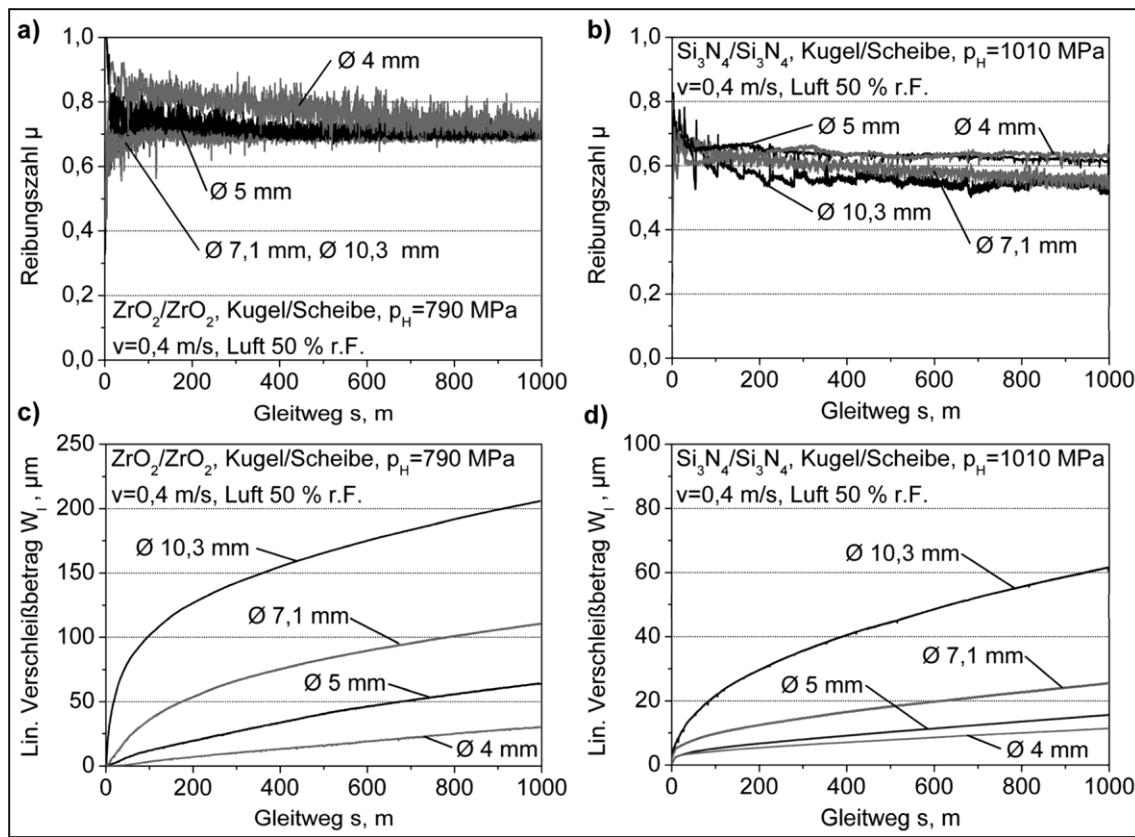


Abb. 13: (a, b) Reibungszahl und (c, d) linearer Verschleißbetrag polierter (a, b) ZrO_2 - (ZN101B) und (c, d) Si_3N_4 - (SL200BG) Selbstpaarungen mit Kugeln von 4 mm bis 10,3 mm Durchmesser in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg bei jeweils nominell gleicher Hertzscher Pressung (ZrO_2 : $p_H = 790 \text{ MPa}$; bzw. Si_3N_4 : $p_H = 1010 \text{ MPa}$) ($v = 0,4 \text{ m/s}$, 50 % r.F.).

Aufgrund der für die Versuche gewählten Kugel/Scheibe-Geometrie kam es verschleißbedingt zu einer Abplattung der Kugel und damit zu einer besonders auf den ersten Metern stark abnehmenden Flächenpressung im Kugel/Scheibe-Kontakt. Aus dem Kurvenverlauf des linearen Verschleißbetrages als Funktion des Gleitweges (Abb. 13 und 14) wurde deshalb die lineare Verschleißintensität dW_l/ds und die momentane scheinbare Flächenpressung (Quotient aus der Normalkraft F_N und der sich weg- bzw. verschleißabhängig ändernden Kontaktfläche $A(s)$) errechnet. Ergebnisse der nach den Versuchsläufen durchgeföhrten Verschleißmessungen zeigten, dass der gemessene lineare Verschleißbetrag im Wesentlichen durch den Kugelverschleiß bestimmt wurde und verglichen dazu der Scheibenverschleiß vernachlässigt werden konnte. In Abb. 15 sind exemplarisch die Verläufe der Verschleißintensität der ZrO_2 - und der Si_3N_4 -Selbstpaarungen für die kleinste und größte Kugel bei unterschiedlichen Hertzschen Pressungen abhängig von der scheinbaren Flächenpressung dargestellt. Sowohl bei der ZrO_2 -Keramik mit dem relativ homogenen als auch bei der Si_3N_4 -Keramik mit dem heterogenen Gefügeaufbau kam es mit der verschleißbedingten Abnahme der Flächenpressung zu einem Übergang von einer Hoch- in eine Tieflage der Verschleißintensität. Vergleicht man die Keramiken ZrO_2 und Si_3N_4 in der Paarung mit der Kugel von 10,3 mm Durchmesser, unter nahezu gleicher Hertzscher Pressung von 780 bzw. 790 MPa, so zeigt Si_3N_4 in der Hochlage niedrigere Verschleißintensitäten auf. Der Übergang in die Tieflage erfolgte bei Si_3N_4 bereits bei höherer Flächenpressung und führte zu wesentlich niedrigeren Werten der Verschleißintensität, was mit der höheren mechanischen Festigkeit der Si_3N_4 -Keramik korreliert. Abb. 15a zeigt, dass bei der ZrO_2 -Keramik, bei gleicher Hertzscher Pressung von 780 MPa, an der großen Kugel in der Hochlage um ca. zwei Größenordnungen größere Werte als an der kleinen Kugel gemessen wurden. Erst eine Erhöhung der anfänglichen Hertzschen Pressung an der kleinen Kugel auf nahezu den zweifachen Wert, verglichen mit der großen Kugel ($F_N = 2,5 \text{ N}$: $p_H = 1160 \text{ MPa}$ für $\varnothing 4,0 \text{ mm}$; $p_H = 620 \text{ MPa}$ für $\varnothing 10,3 \text{ mm}$), führte zu vergleichbaren Verschleißintensitäten in der Hochlage. Bei gleichem Kugeldurchmesser wirkte sich bei der ZrO_2 -Keramik eine Änderung der Hertzschen Pressung stark auf die Verschleißintensität in der Hochlage aus (Abb. 15a). Bekanntermaßen kann eine Kornvergrößerung bei Y_2O_3 teilstabilisierter ZrO_2 -Keramik, wie sie bei der großen Kugel mit $d_{50} = 0,52 \mu\text{m}$ verglichen mit $d_{50} = 0,32 \mu\text{m}$ bei der kleinen Kugel vorlag, eine höhere Verschleißintensität und eine Phasenumwandlung von tetragonal in monoklin verursachen [BAS_04]. Hierdurch wird bruchkontrollierter Verschleiß durch Rissbildung und Rissausbreitung begünstigt. Das Verhalten der Si_3N_4 -Paarungen bei gleicher Hertzscher Pressung von 1000 MPa (Bild 8b) war, ebenso wie bei den ZrO_2 -Paarungen, durch höhere Verschleiß-

ßintensitäten bei der großen Kugel gekennzeichnet. Allerdings wurde der Größeneffekt beim Si_3N_4 offensichtlich ebenfalls durch Gefügeeffekte stark überlagert. Der Abfall in der Verschleißintensität von der Hoch- in die Tieflage erfolgte mit abnehmender Flächenpressung bei der großen Kugel mit 10,3 mm Durchmesser deutlich flacher als bei der Kugel mit 4 mm. Eine um 50% höhere Hertzche Pressung (1490 MPa) bei der kleinen Kugel, resultierte in vergleichbare Werte der Verschleißintensität in der Hochlage aber auch in einer Verschiebung des Übergangs in die Tieflage zu deutlich kleineren Flächenpressungen $p(s)$ verglichen mit der großen Kugel. Im Fall der Si_3N_4 -Kugel mit dem Durchmesser 10,3 mm wirkte sich die Absenkung der Hertzschen Pressung p_H von 1000 MPa auf 790 MPa auf die Verschleißintensität in der Hochlage nicht aus, veränderte jedoch das Übergangsverhalten von der Hoch- in die Tieflage sehr deutlich. Sowohl bei den Kugeln mit einem Durchmesser von 4 mm als auch von 10,3 mm fiel die Verschleißintensität mit abnehmender anfänglicher Hertzscher Pressung p_H wesentlich steiler aus der Hochlage ab und erreichte dabei schon bei höheren Flächenpressungen $p(s)$ niedrigere Werte (Abb. 15b).

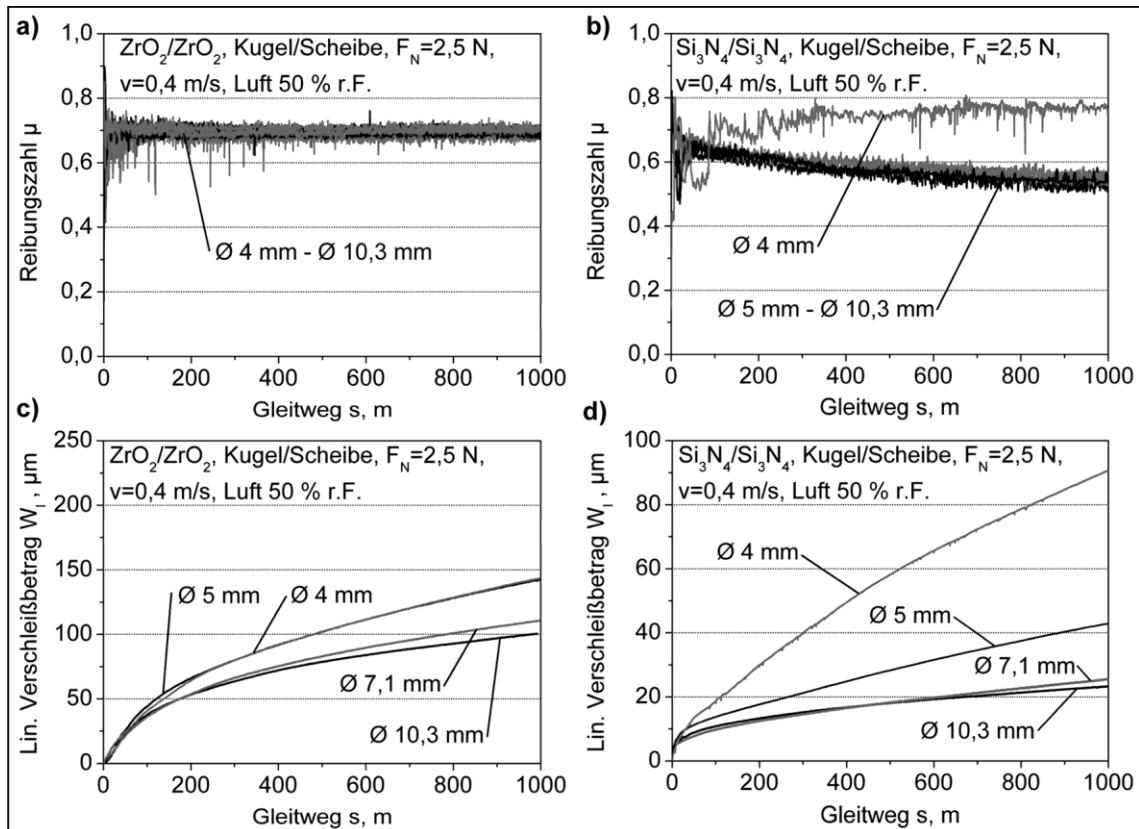


Abb. 14: (a, b) Reibungszahl und (c, d) linearer Verschleißbetrag polierter (a, b) ZrO_2 - (ZN101B) und (c, d) Si_3N_4 - (SL200BG) Selbstpaarungen mit Kugeln von 4 mm bis 10,3 mm Durchmesser in Abhängigkeit vom zurückgelegten Gleitweg unter einer Normalbelastung von 2,5 N ($v = 400 \text{ m/s}$, 50% rF).

Die Ergebnisse zeigen, dass in Systemen mit keramischen Komponenten durch eine zu- oder abnehmende Bauteilgröße, im vorliegenden Fall die Kugelgröße, sowohl das Reibungs- als auch das Verschleißverhalten beeinflusst werden können. Die mit Hilfe des Ansatzes nach Archard vorhergesagte Abhängigkeit des Verschleißes vom Kugeldurchmesser (W_l nimmt bei konstanter Flächenpressung mit zunehmendem Kugeldurchmesser zu bzw. bei konstanter Normalkraft ab) konnte nachvollzogen werden, auch wenn aufgrund des vereinfachenden theoretischen Modells nur eine qualitative Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen festgestellt wurde. Aus der Abweichung werden der überlagerte Gefügeeinfluss und die Änderung der von der Flächenpressung $p(s)$ abhängigen Verschleißmechanismen deutlich.

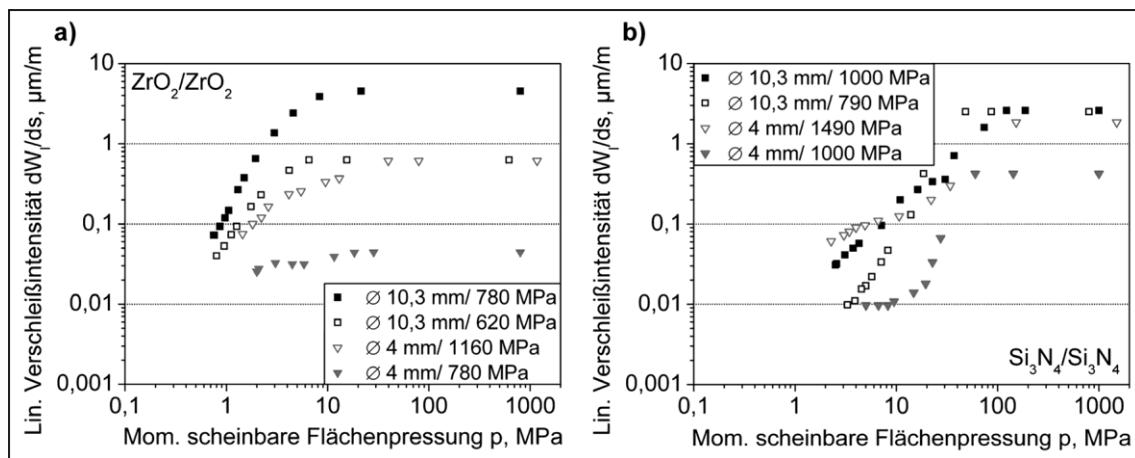


Abb. 15: Momentane lineare Verschleißintensität der (a.) ZrO_2 - und (b.) Si_3N_4 -Selbstpaarungen mit Kugeldurchmessern von 4 mm und 10,3 mm bei unterschiedlichen anfänglichen Hertzschen Flächenpressungen in Abhängigkeit von der momentanen, scheinbaren Flächenpressung ($v = 400 \text{ m/s}$, 50% rF).

5.2.1.3 Formeinsätze für das Mikro-Pulverspritzgießen

Experimentelle Methoden und Versuchsmaterial

Die Untersuchungen zum Formeinsatzverschleiß beim μ PIM wurden mit Hilfe des im Rahmen des SFB 499 entwickelten Modellprüfstandes (Abb. 16) durchgeführt. Hierzu wurde ein mit zwei Prüfkörper-Paaren bestückter Kolben mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/s in einem mit $14 \pm 1 \text{ cm}^3$ Formmasse gefüllten Zylinder auf und ab bewegt, so dass die Formmasse mit einem Druck von 0,6 GPa (Abwärtsbewegung) bzw. 1,1 GPa (Aufwärtsbewegung) und einer Geschwindigkeit von 245 mm/s durch die von den Prüfkörper-Paaren gebildete Nut (Standard-Nutgeometrie: $1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$) gepresst wurde. Die Temperatur des Werkzeuges und der Formmasse wurde während der Versuche konstant gehalten und lag je nach eingesetzter Formmasse bei 150°C (PO/Wachs- und PE/Wachs-Binder), 160°C (PMMA/PEG- bzw. PVB/PEG-Binder) bzw. 170°C (POM-Binder). Als Füllstoffe wurden 50 Vol.-% ZrO_2 (PO/Wachs, PMMA/PEG, PVB/PEG) bzw. 58 Vol.-% Al_2O_3 -(POM) verwendet, wobei die mittlere Partikelgröße bei 0,3 bis 0,4 μm (ZrO_2) bzw. 0,4 bis 0,6 μm (Al_2O_3) lag. Nach 1400 bzw. 2800 Kolbenhüben, die jeweils einen Einspritzvorgang simulierten, wurde mit einer elektronischen Waage (Messgenauigkeit $\pm 10^{-5} \text{ g}$) der massenmäßige Verschleißbetrag der Probekörper ermittelt und daraus der volumetrische Verschleißbetrag errechnet. Neben Untersuchungen mit der Standard-Nutgeometrie (H0, Abb. 16) von $1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$ wurden zusätzliche Untersuchungen mit unterschiedlichen Hindernissen in der Nutmitte (H1 bis H3, Abb. 16) sowie mit variierter Nutgeometrie (N1 bis N4, Abb. 16) durchgeführt. Die Hindernisse mit einer Länge von 4 mm und einer Breite von 0,5 mm unterschieden sich hinsichtlich ihrer Stirnflächen, die eckig, verrundet bzw. prismatisch ausgeführt waren. Die Nutbreite dieser Prüfkörper (H1, H2, H3) wurde auf 2 mm erhöht, so dass sich im Bereich der Hindernisse ein effektiver Nutquerschnitt von $1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$ wie bei der Standardnut ergab. Für die Untersuchungen zum Einfluss der Nutgeometrie wurden Nuten mit einer Stufe von 0,5 mm in der Mitte der 8 mm langen Nuten eingesetzt. Der Nutversatz von 0,5 mm wurde dabei auf einer Länge von 0, 1, 2 bzw. 4 mm überwunden, wodurch sich Umlenkinkel von 90° , 27° , 14° bzw. 7° ergaben.

Die Modelluntersuchungen wurden standardmäßig mit dem niedriglegierten und vergüteten Werkzeugstahl Toolox 44 (30CrMo6, Anlasstemperatur 590°C , 454 HV30) durchgeführt. Daneben wurde bei den Untersuchungen zum Einfluss der Hindernis- und Nut-Geometrie das leicht zerspanbare und für die Formeinsatzherstellung beim μ PIM etablierte einphasige α -Messing CuZn37 (106 HV30) in die Untersuchungen einbezogen. Weiterhin wurden in Kooperation mit den Teilprojekten B4 und B6 Formeinsatzprüfkörper aus Ingenieurkeramiken auf der Basis von Al_2O_3 (SH2 ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{ Ti}(\text{C},\text{N})$): 2300 HV0,5; SN80 ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ ZrO}_2$): 1630 HV0,5; beide Fa. Ceramtec) hinsichtlich ihres Verschleißverhaltens unter Beanspruchung durch die hoch abrasive POM- Al_2O_3 -Formmasse untersucht. Die Strukturierung der Prüfkörper erfolgte für Toolox 44 und Messing durch Mikrofräsen (TP Z3), für die Keramik SN80 mittels Laserablation (TP B6) und für die Keramik SH2 mittels Mikro-EDM (TP B4) bzw. Laserablation (TP B6).

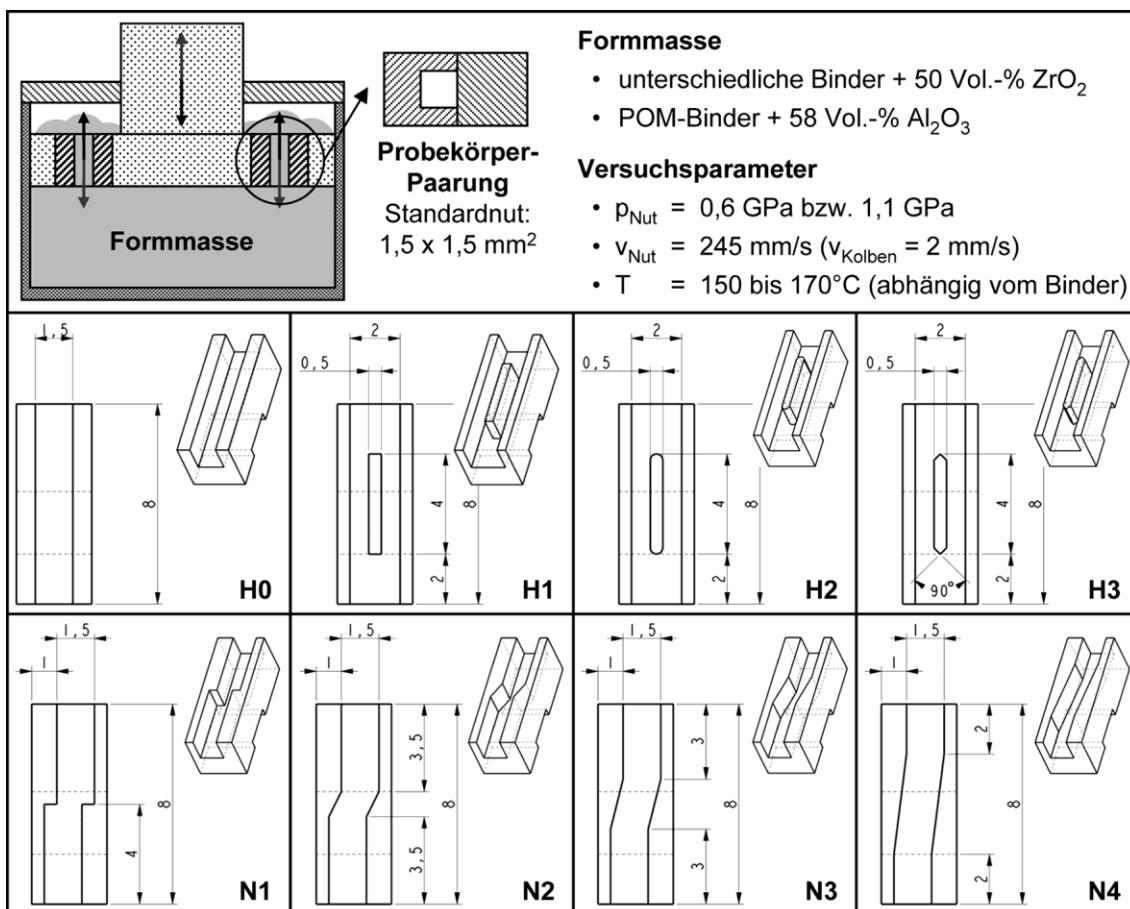


Abb. 16: Schematische Darstellung des Einspritz-Modellprüfstandes und der Versuchsparameter sowie der Nut-Prüfkörpergeometrien: "Standard"-Nut (H0) mit $1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$ Nutquerschnitt, "Hindernis"-Nuten mit eckiger (H1), verrundeter (H2) bzw. prismatischer (H3) Hindernis-Stirnfläche ($2,0 \times 1,5 \text{ mm}^2$ Nutquerschnitt) sowie "Stufen"-Nuten (N1, N2, N3, N4) mit einem Nutversatz von 0,5 mm auf 0, 1, 2 bzw. 4 mm Länge ($1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$ Nutquerschnitt).

Einfluss der Hindernis- und Nut-Geometrie auf das Verschleißverhalten beim μ PIM

Der nach 2800 simulierten Einspritzvorgängen mit der ZrO_2 -PO/Wachs-Formmasse (50 Vol.-% Pulverfüllgrad) ermittelte volumetrische Verschleißbetrag der Stahl- und Messing-Probenpaare mit unterschiedlichen Hindernis- bzw. Nut-Geometrien ist in Abb. 17 dargestellt.

Beide Formeinsatzmaterialien zeigten ein vergleichbares Verhalten in Abhängigkeit von der Prüfgeometrie, allerdings lag der Verschleiß des weicheren Messings um 25 bis 55% höher als der von Toolox 44. Sowohl durch die Hindernisse als auch durch den Nutversatz stieg der Verschleiß im Vergleich zur geraden Standardnut signifikant an. Der höchste Verschleiß wurde für die Probenpaare mit der verrundeten Hindernisgeometrie ermittelt. Er lag für Toolox 44 um 60% und für das Messing um 80% über dem Verschleiß der Standardnut. Den geringsten Verschleißanstieg unter den Hindernissen verursachte das mit der prismatischen Geometrie, das aus strömungsmechanischer Sicht das günstigste Hindernis darstellt, da es einer stromlinienförmigen Gestalt am nächsten kommt und so zu den geringsten schädlichen Verwirbelungen bei der Umströmung führen sollte.

Beim Vergleich der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Hindernis-Prüfkörper aus Messing vor und nach der tribologischen Beanspruchung in Abb. 18 wird deutlich, dass der höchste Verschleißabtrag jeweils am Übergang der Stirn- zur Seitenfläche des Hindernisses auftrat. Während das eckige Hindernis in einem relativ breiten Bereich in der Mitte der Stirnfläche nur geringe Anzeichen für einen Verschleißangriff aufwies (Abb. 18d), war das verrundete Hindernis fast auf der gesamten Stirnfläche deutlich von Verschleiß gekennzeichnet (Abb. 18e).

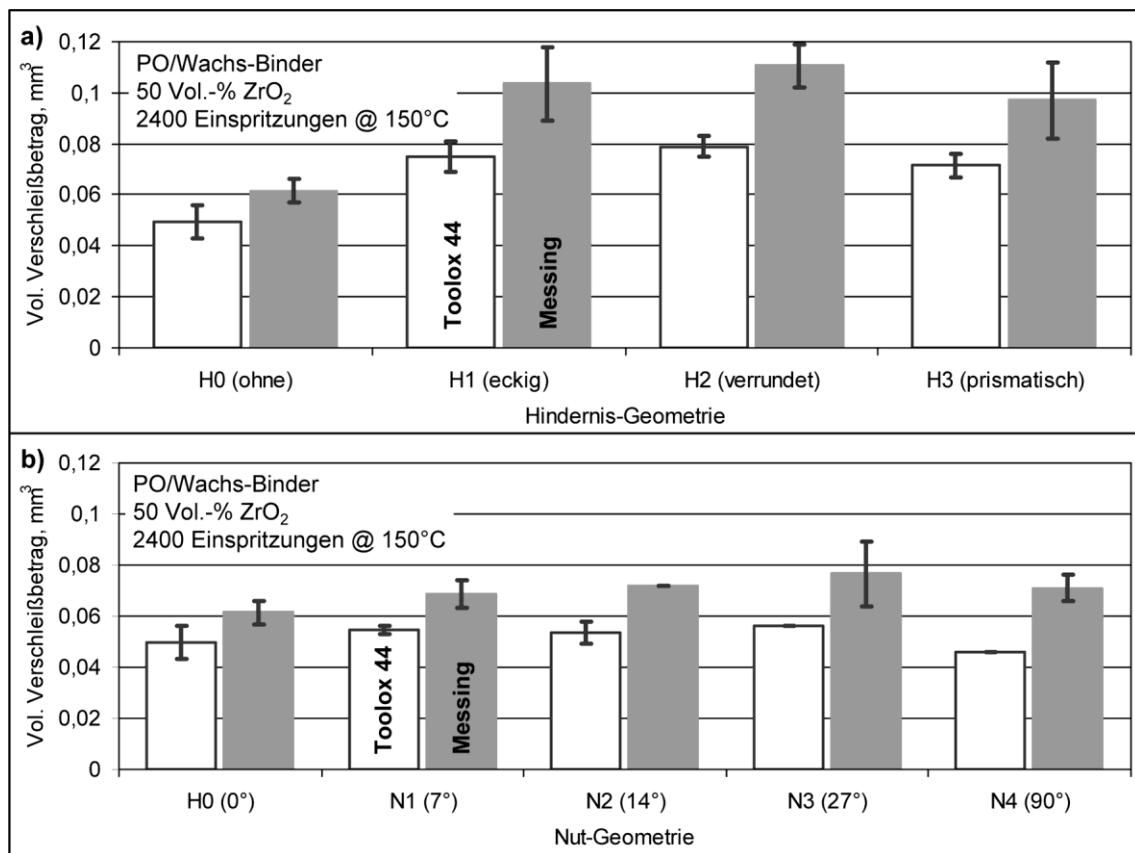


Abb. 17: Volumetrischer Verschleißbetrag des Stahls Toolox 44 und des Messing CuZn37 nach 2800 simulierten Einspritzvorgängen im Einspritz-Modellprüfstand mit ZrO_2 -PO/Wachs-Formmasse (50 Vol.-% Pulverfüllgrad): Prüfkörper mit (a) unterschiedlichen Nut-Hindernissen sowie (b) unterschiedlichen Nutgeometrien (Nutversatz).

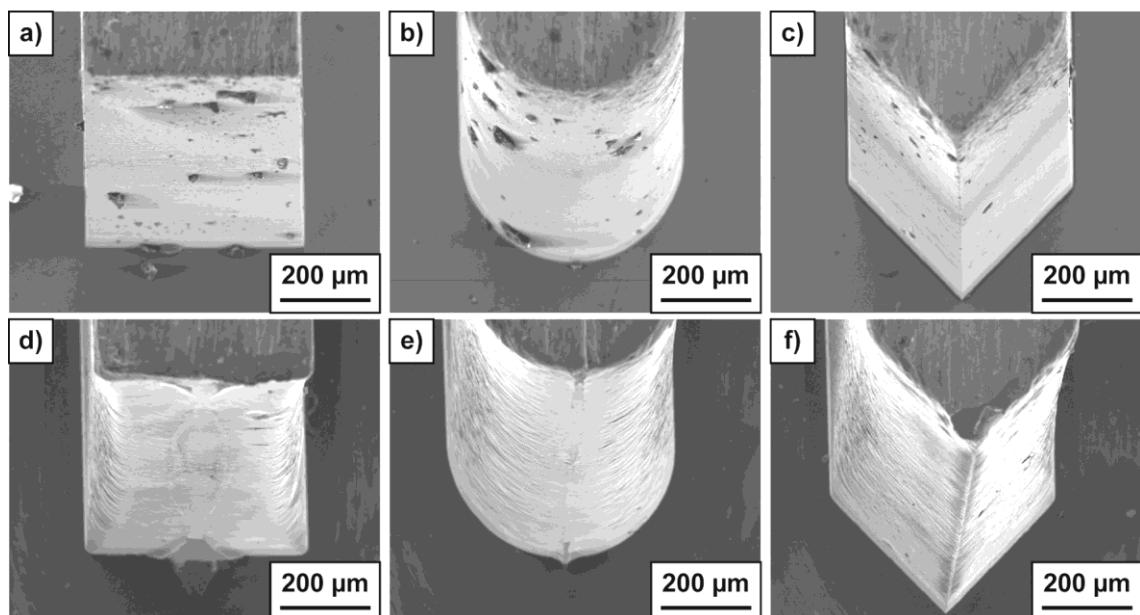


Abb. 18: REM-Aufnahmen von Prüfkörpern aus Messing CuZn37 mit (a, d) eckiger (H1), (b, e) verrundeter (H2) sowie (c, f) prismatischer (H3) Nuthindernis-Stirnfläche (a - c) vor der Beanspruchung und (d - f) nach 2800 simulierten Einspritzvorgängen im Einspritz-Modellprüfstand mit ZrO_2 -PO/Wachs-Formmasse (50 Vol.-% Pulverfüllgrad).

Die in Abb. 19 zusammengestellten rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen eines eckigen Hindernisses aus dem Stahl Toolox 44 veranschaulicht die Einglättung der durch die spanende Fertigung hervorgerufenen Topographie, wobei der Abtrag so gering ausfiel, dass die Fertigungsspuren auch nach 2800 simulier-

ten Einspritzungen noch deutlich zu erkennen waren. Im Gegensatz zum Stahl Toolox 44 erhöhte sich für Probekörper aus Messing die Oberflächenrauheit während der Beanspruchung durch die Formmasse im Vergleich zum Ausgangszustand nach der spanenden Fertigung.

Für die Probenpaare mit einem Nutversatz von 0,5 mm in der Mitte der Nuten nahm der Verschleiß ausgehend von der geraden Standardnut mit zunehmendem Umlenkinkel deutlich zu und lag für einen Umlenkinkel von 27° (N3) um etwa 13% (Toolox 44) bzw. 20% (Messing) über dem Wert für die Standardnut (Abb. 17b). Für einen Umlenkinkel von 90° nahm der Verschleiß wieder ab und lag für den Stahl Toolox 44 sogar um fast 10% unter dem der Standardnut. Auf den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen von beanspruchten Messingproben wird deutlich, dass der höchste Verschleißabtrag direkt an der Umlenkfläche auftrat und mit dem Umlenkinkel anstieg (Abb. 20). Auf der anderen Seite ist zu erkennen, dass bei Umlenkwinkeln bis zu 27° der Bereich erhöhten Verschleißabtrages um die Umlenkfläche herum mit zunehmendem Umlenkinkel anstieg.

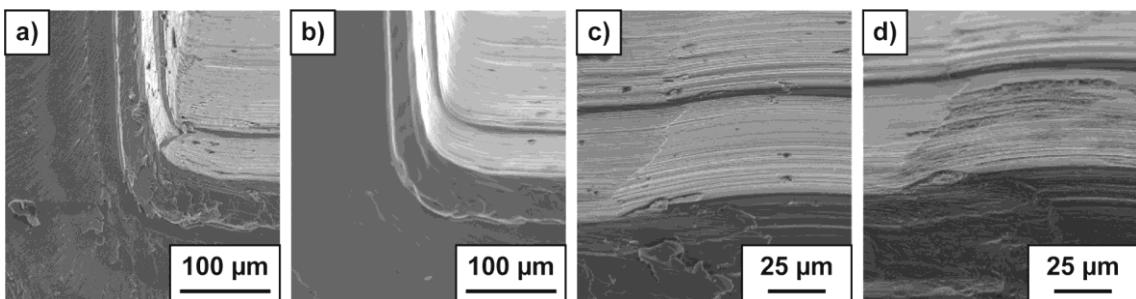


Abb. 19: REM-Aufnahmen eines Prüfkörpers aus dem Stahl Toolox 44 mit eckiger Nuthindernis-Stirnfläche (a; c) vor der Beanspruchung und (b; d) nach 2800 simulierten Einspritzvorgängen im Einspritz-Modellprüfstand mit ZrO_2 -PO/Wachs-Formmasse (50 Vol.-% Pulverfüllgrad).

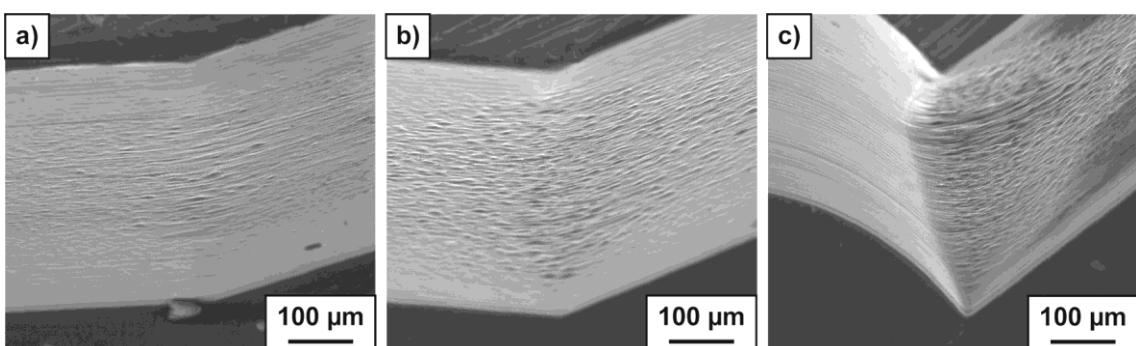


Abb. 20: REM-Aufnahmen von Prüfkörpern aus Messing CuZn37 mit unterschiedlichen Nutgeometrien nach 2800 simulierten Einspritzvorgängen im Einspritz-Modellprüfstand mit ZrO_2 -PO/Wachs-Formmasse (50 Vol.-% Pulverfüllgrad): Umlenkwinkel (a) 14° (N2), (b) 27° (N3) und (c) 90° (N4).

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen deutlich auf, dass zur Auswahl geeigneter Formeinsatzmaterialien und Geometrien die alleinige Betrachtung des im Modellversuch ermittelten Verschleißbetrages nicht ausreicht. Vielmehr müssen zum einen verschleißbedingte Änderungen der Oberflächentopographie (Glätzung bzw. Aufrauung) berücksichtigt werden, die maßgeblich die Entformung beeinflussen. Zum anderen kann das Auftreten von lokal stark erhöhtem Verschleiß die Funktionsfähigkeit der abgeformten Mikrokomponenten negativ beeinflussen.

Einfluss der Formmasse-Zusammensetzung auf das Verschleißverhalten beim μ PIM

Die Ergebnisse der in Kooperation mit dem Teilprojekt B1 durchgeführten Untersuchungen zum Verschleißverhalten des Stahls Toolox 44 unter Beanspruchung durch drei neu entwickelte Formmassen mit jeweils 50 Vol.-% ZrO_2 (Tosoh, TZ-3YS-E) und unterschiedlichen Bindersystemen sind in Abb. 21 zusammengestellt. Die neuen Formmassen wurden insbesondere im Hinblick auf das 2K- μ PIM in Kombination mit der im SFB499 entwickelten und etablierten Formmasse GoMikro (PE/Wachs-Binder) sowie im Hinblick auf eine Entbinderung mit umweltfreundlichen Lösemitteln entwickelt. Die drei Formmassen führten trotz der um 10°C höheren Prüftemperatur nach 2800 simulierten Einspritzungen im Vergleich zur Formmasse GoMikro (PE/Wachs) zu einem etwa doppelt so hohen Verschleißabtrag an den Stahl-Prüfkörpern. Gegenüber der kommerziellen POM-basierten μ PIM-Formmasse lagen die Verschleißbeträge allerdings um einen Faktor von vier niedriger. Die beiden Formmassen mit PMMA/PEG-basiertem Bindersystem führten zu einem geringfügig höheren Verschleißabtrag als die PVB/PEG-basierte Formmasse. Ein signifikanter Einfluss des von unterschiedlichen Herstellern bezogenen PMMAs konnte dabei allerdings nicht festgestellt werden. Der

durch die neuen Formmassen erhöhte Verschleißabtrag ließ sich sehr gut an Hand der REM-Aufnahmen beanspruchter Oberflächen der Toolox 44-Prüfkörper nachvollziehen (Abb. 22). Nach der Beanspruchung durch die PVB/PEG- bzw. PMMA/PEG-Formmasse war eine stärker ausgeprägte Mikrofurchung der Stahl-oberfläche zu erkennen als nach Beanspruchung durch die PE/Wachs-Formmasse GoMikro.

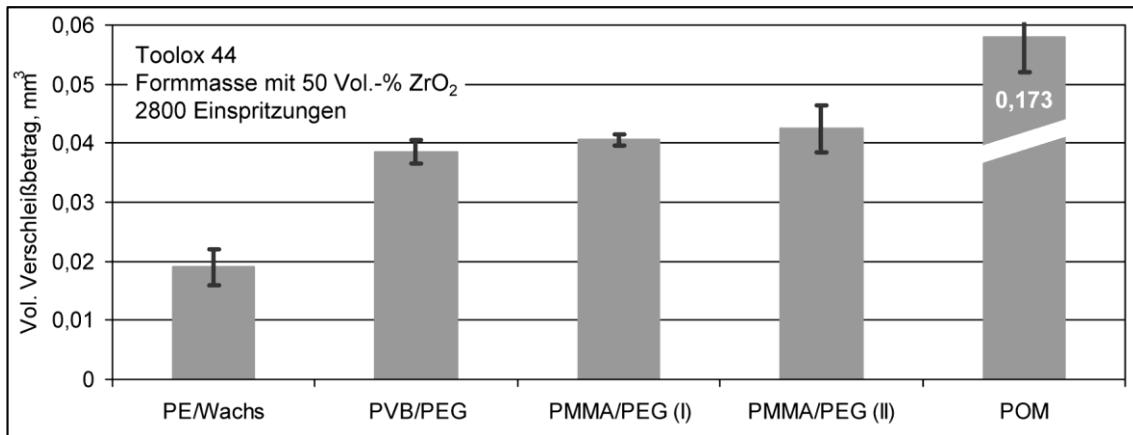


Abb. 21: Volumetrischer Verschleißbetrag des Stahls Toolox 44 nach 2800 simulierten Einspritzvorgängen im Einspritz-Modellprüfstand mit unterschiedlichen im Teilprojekt B1 neu entwickelten ZrO_2 -gefüllten Formmassen (PE/Wachs @ 150°C, PVB/PEG und PMMA/PEG @ 160°C, POM @ 170°C).

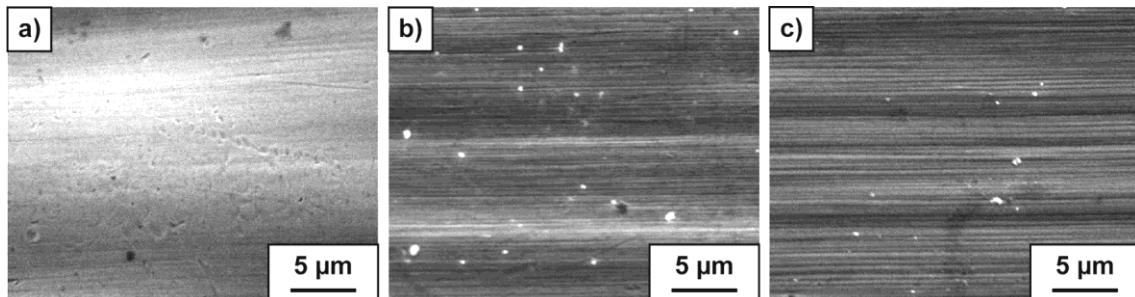


Abb. 22: REM-Aufnahmen von beanspruchten Oberflächen des Stahls Toolox 44 nach 2800 simulierten Einspritzvorgängen im Einspritz-Modellprüfstand mit (a) PE/Wachs- (GoMikro), (b) PVB/PEG- und (c) PMMA/PEG-Formmasse (50 Vol.-% ZrO_2 -Pulverfüllgrad).

Verschleißverhalten keramischer Formeinsatzprüfkörper beim μ PIM

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen beanspruchter Oberflächen der in Kooperation mit den Teilprojekten B4 und B6 untersuchten keramischen Formeinsatzprüfkörper sind in Abb. 23 dargestellt.

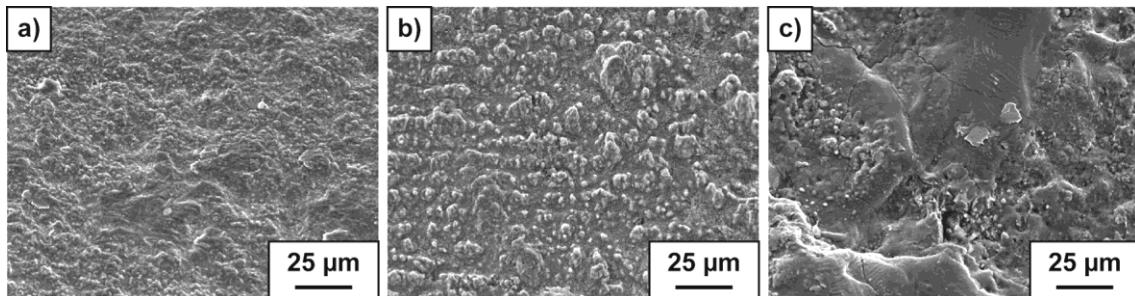


Abb. 23: REM-Aufnahmen von beanspruchten Oberflächen keramischer Prüfkörper nach 1400 simulierten Einspritzvorgängen im Einspritz-Modellprüfstand mit POM- Al_2O_3 -Formmasse (58 Vol.-% Füllgrad): mittels (a) Laserablation bzw. (b) Mikro-EDM strukturierte Al_2O_3 - ZrO_2 -Keramik SN80 sowie (c) mittels Mikro-EDM strukturierte Al_2O_3 - $Ti(C,N)$ -Keramik SH2.

Nach 1400 simulierten Einspritzungen mit der hoch abrasiven Al_2O_3 -POM-Formmasse konnte an keinem der Prüfkörper ein verschleißbedingter Gewichtsverlust festgestellt werden. Vielmehr lag das Gewicht der Proben nach den Modellversuchen höher als zuvor. Zurückzuführen war dies auf die fertigungsbedingt sehr rauen Oberflächen der durch Laserablation bzw. Mikro-EDM strukturierten Prüfkörper. In den Oberflächenkavitäten konnte sich Formmasse festsetzen, die auch durch intensives Reinigen in einem Ultraschallbad nicht mehr entfernt werden konnte. Bei den Nachuntersuchungen im REM konnten ebenfalls keine An-

zeichen für einen verschleißbedingten Abtrag an den durch die Formmasse beanspruchten Oberflächen festgestellt werden. Vielmehr waren noch sehr gut die bei der Fertigung entstandenen Schmelzstrukturen zu erkennen. Um das hohe Potenzial der Keramiken für den Einsatz als verschleißbeständige Formeinsätze zukünftig nutzen zu können, muss deren fertigungsbedingte Oberflächenqualität allerdings noch signifikant gesteigert werden. Hier bietet sich eine Nachbehandlung durch abrasives Mikrostrahlen (TP B5) an, die sich bereits zur Entfernung der beim Mikro-EDM entstandenen Schmelzsicht auf Hartmetallprüfkörpern sehr gut bewährt hat [5].

Vergleich mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Publikationen zu tribologischen Modelluntersuchungen im Hinblick auf ungeformte metallische und keramische Komponenten für die Mikro- und Feinwerktechnik, wie sie im Rahmen des Teilprojekts D3 durchgeführt wurden, wurden außerhalb des SBF 499 nicht gefunden. Die meisten Publikationen beschäftigen sich vielmehr mit der Charakterisierung Silizium-basierter mikromechanischer Systeme (MEMS). Hierbei standen Untersuchungen zur Wirksamkeit von dünnen Schutzschichten und Schmiermedien sowie zum Einfluss von Umgebungs- und Beanspruchungsbedingungen im Vordergrund [u.a. CHO_11, SUB_11, TIM_09, XIE_09]. Beispielsweise wurden im Rahmen des SFB 516 „Konstruktion und Fertigung aktiver Mikrosysteme“ an den Universitäten Braunschweig und Hannover umfangreiche Forschungsarbeiten zur Entwicklung und Charakterisierung von tribologisch optimierten Beschichtungen auf Basis von amorphem Kohlenstoff in Mikroaktoren durchgeführt [BAN_09, PAU_09]. Weiterhin wurde über die Entwicklung von Mikrotribometern berichtet, die zur Untersuchungen sehr spezieller Fragestellungen in Bezug auf MEMS eingesetzt wurden [KU_10, ANS_12]. In [SIN_10] wurde ein interessanter Ansatz zur Reibungsreduzierung bei MEMS vorgestellt, der durch die Nutzung von Glaskugeln mit einem Durchmesser von etwa 50 µm als Wälzkörper im Kontakt zwischen zwei Siliziumscheiben zu einer Absenkung der Reibungszahl von $\mu = 0,26$ auf etwa $\mu = 0,01$ führte. Eine direkte Vergleichbarkeit der hier zitierten Forschungsarbeiten mit den im Teilprojekt D3 durchgeföhrten Modelluntersuchungen ist in keinem Falle gegeben.

Außerhalb des SFB 499 konnten auch keine Publikationen ausfindig gemacht werden, die sich mit der Charakterisierung des Verschleißverhaltens von Formeinsätzen für das Mikro-Pulverspritzgießen in Modellversuchen oder auch direkt in einer Spritzgießmaschine beschäftigen. Dementsprechend wird in einem aktuellen Review-Paper von Attia und Alcock zum Stand des Mikropulverspritzgießens die Thematik des Formeinsatzverschleißes als sehr wichtige, aber noch nicht vollständig bearbeitete Fragestellung aufgeführt [ATT_11]. Einzelne Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Entwicklung und Charakterisierung von DLC-Beschichtungen insbesondere von Si-Werkzeugen im Hinblick auf die Erhöhung des Verschleißwiderstandes und der Verbesserung des Entformungsverhaltens von Mikroprägewerkzeugen [SAH_09, SAH_10]. In [BOB_11] wird über die lasergestützte Strukturierung von PVD-Dünnenschichten im Hinblick auf die Realisierung von verschleißbeständigen Mikroabformwerkzeugen berichtet, jedoch wurden entsprechende tribologische Untersuchungen noch nicht durchgeführt. Eine größere Anzahl an Forschungsarbeiten beschäftigte sich dagegen mit experimentellen Untersuchungen und computergestützten Simulationen zu den Einflüssen auf das Formfüllungs- und Entformungsverhalten beim Mikro(pulver)spritzgießen [u.a. YIN_11, LIO_10].

Literatur / Referenzen

- [ACH_10] S. Achanta, J. Celis: On the scale dependence of coefficient of friction in unlubricated sliding contacts. *Wear* 269 (2010) 435-442.
- [ANS_12] N. Ansari, W. Ashurst: Single-crystal-silicon-based microinstrument to study friction and wear at MEMS sidewall interfaces. *J. Micromech. Microeng.* 22 (2012) 025008.
- [ATT_11] U. Attia, J. Alcock: A review of micro-powder injection moulding as a microfabrication technique. *J. Micromech. and Microengineering*, 21 (2011) 043001.
- [BAN_09] R. Bandorf, D. Paulkowski, F. Pape, A. Phtaralaoha, S. Büttgenbach, H. Gatzen, G. Bräuer: Mikrotribologie. *Proc. 4. Kolloquium Mikroproduktion*, BIAS Verlag Bremen (2009) 197-204.
- [BAS_04] B. Basu, J. Vleugels, O. van der Biest: Microstructure-toughness-wear relationship of tetragonal zirconia ceramics. *J. Europ. Cer. Soc.* 24 (2004) 2031-2040.
- [BER_91] A. Berez-Unzueta, J. Beynon, M. Gee: Effects of surrounding atmosphere on the wear of sintered alumina. *Wear* 146 (1991) 179-196.
- [BOB_11] K. Bobzin, K. Bagcivan, M. Ewering, A. Gillner, S. Beckemper, C. Hartmann, S. Theiss: Nano Structured Physical Vapor Deposited Coatings by Means of Picosecond Laser Radiation. *J. Nanoscience and Nanotechnology*, 11 (2011) 8775-8781.
- [CAR_02] J. Carrapichano, J. Gomesb, R. Silva: Tribological behaviour of Si_3N_4 -BN ceramic materials for dry sliding applications. *Wear* 253 (2002) 1070-1076
- [CHO_11] N. Choudhary, N (Choudhary, Nitin); D. Kharat, DK (Kharat, D. K.); D. Kaur: Surface modification of NiTi/PZT heterostructure thin films using various protective layers for potential MEMS applications. *Surface Coatings techn.* 206 (2011) 1735-1743.
- [JOR_04] L. Jordi, C. IlieV, T. Fischer: Lubrication of silicon nitride and silicon carbide by water: Running in, wear and operation of sliding bearings. *Tribology Letters* 17 (2004), 367-376.

- [KU_10] I. Ku, T. Reddyhoff, J. Choo, A. Holmes, H. Spikes: A novel tribometer for the measurement of friction in MEMS. *Tribo. Intern.* 43 (2010) 1087-1090.
- [LIO_10] G. Liou, W. Young: The Filling Behavior of Reinforcing Glass Fiber in Micro Injection Molding. *Intern. Polymer Processing*, 25 (2010) 264-269.
- [NOV_07] S. Novak, M. Kalin, P. Lukas, G. Anne, J. Vleugels, O. Van Der Biest: The effect of residual stresses in functionally graded alumina-ZTA composites on their wear and friction behaviour. *J. Europ. Ceramic Soc.* 27 (2007) 151-156.
- [PAU_09] D. Paulkowski, R. Bandorf, K. Schiffmann, G. Bräuer: Friction of flat-flat micro contacts coated with amorphous carbon. *Proc. 50. GFT-Tribologie-Fachtagung*, Göttingen (2009) 51/1-51/6.
- [SAH_09] B. Saha, E. Liu, S. Tor, N. Khun, D. Hardt, J. Chun: Replication performance of Si-N-DLC-coated Si micro-molds in micro-hot-embossing. *J. Micromech. Microeng.* 20 (2010) 045007.
- [SAH_10] B. Saha, E. Liu, S. Tor, N. Khun, D. Hardt, J. Chun: Anti-sticking behavior of DLC-coated silicon micro-molds. *J. Micromech. Microeng.* 19 (2009) 105025.
- [SIN_10] S. Sinha, R. Pang, X. Tang: Application of micro-ball bearing on Si for high rolling life-cycle. *Tribo. Intern.* 43 (2010) 178-187.
- [SUB_11] G. Subhash, A. Corwin, M. de Boer: Evolution of Wear Characteristics and Frictional Behavior in MEMS Devices. *Tribo. Letters* 41 (2011) 177-189.
- [TIM_09] S. Timpe, D. Alsem, D. Hook, M. Dugger, K. Komvopoulos: Wear of Polysilicon Surface Micromachines Operated in High Vacuum: *J. Microelectromechanical Systems* 18 (2009) 229-238.
- [WIL_06] J. Williams, H. Le: Tribology of MEMS. *J. Physics D – Appl. Phys.* 39 (2006) R201-R214.
- [XIE_09] G. Xie, Q. Wang, L. Si, S. Liu, G. Li: Tribological Characterization of Several Silicon-Based Materials Under Ionic-Liquids Lubrication. *Tribo. Letters* 36 (2009) 247-257.
- [YIN_11] H. Yin, Q. Wang, X. Qu, C. Jia, J. Johnson: Computational simulation and experimental analysis of the mold-filling process in mu PIM. *J. Micromech. Microeng.* 21 (2011) 045023.
- [ZAU_06] R. Zauner: Micro powder injection moulding. *Microelectронical Engineering* 83 (2006) 1442-1444.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Begutachtete Veröffentlichungen (erschienen)

- [1] S. Kurzenhäuser, J. Schneider, K.-H. Zum Gahr: Microtribological characterization of engineering ceramic, cemented carbide and steel under rolling conditions. In *Friction, Wear and Wear Protection*, A. Fischer, K. Bobzin (eds.), Wiley-VCH, Weinheim 2009, pp. 376-382.
- [2] J. Schneider, K.-H. Zum Gahr, A. Kienzler, V. Schulze, D. Löhe: Influence of surface condition on wear and demoulding behaviour of mould inserts for micro powder injection moulding. In *Friction, Wear and Wear Protection*, A. Fischer, K. Bobzin (eds.), Wiley-VCH, Weinheim 2009, pp. 629-636.
- [3] J. Rögner, B. Okolo, J. Schneider, K.-H. Lang, A. Wanner, V. Schulze: Charakterisierung und Prüfung von Mikrobauteilen. *Proc. 4. Kolloquium Mikroproduktion* 2009, Bremen, 2009, S. 105-110.
- [4] J. Schneider, T. Polzer, K.-H. Zum Gahr: Influence of load and surface condition on the tribological performance of zirconia for applications in high-performance microsystems. *Proc. 4M 2010 Conference*, B. Fillon, C. Khan-Malek, S. Dimov (eds.), Research Publishing, Singapore, (2010), pp 239-242.
- [5] J. Schneider, A. Kienzler, V. Schulze: Influence of surface condition on wear behavior of IPIM mould inserts made of tool steel and cemented carbide. *Microsystem Techn.*, 2011, 17, 273-280.
- [6] J. Schneider, T. Polzer, K.-H. Zum Gahr: Einfluss des fertigungsbedingten Oberflächenzustandes auf den Formeinsatzverschleiß beim µPIM und das tribologische Verhalten ungeformter Mikrokomponenten. *Proc. 5. Kolloquium Mikroproduktion* 2011, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, KIT-SR 7591, 2011, S. 57-64.

b) Nicht begutachtete Veröffentlichungen

- [7] L. Mattsson, V. Schulze, J. Schneider: Quality assurance and metrology. In: *Ceramics Processing in Microtechnology*. H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, P. Johander (eds.), Whittles Publishing, Dunbeath, 2009, pp. 305-325.
- [8] J. Schneider, M. Amberger, S. Kurzenhäuser, K.-H. Zum Gahr: Modelluntersuchungen zum Einfluss des Oberflächenzustandes auf das Reibungs- und Verschleißverhalten von ZrO_2 -Gleitpaarungen für die Mikro- und Feinwerktechnik. *Proc. Tribologie Fachtagung 2009*, GfT, Gesellschaft für Tribologie e.V., Göttingen, 2009, S. 42/1-42/8.
- [9] T. Polzer, K.-H. Zum Gahr, J. Geometrische und mikrostrukturelle Skaleneffekte im ungeschmierten, einsinnigen Gleitkontakt von keramischen Werkstoffpaarungen. *Proc. Tribologie Fachtagung 2011*, GfT, Gesellschaft für Tribologie e.V., Göttingen, 2011, S. 8/1-8/11.

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit 01 / 2000 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufen-de Num- mer	Name, aka- demischer Grad, Dienststel- lung	engere Fachzu- gehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruni- versitären Ein- richtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstun- den	Katego- rie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerin- nen und Wissen- schaftler	1	Zum Gahr, Karl-Heinz, Prof. Dr.-Ing.	Werkstoffkunde, Tribologie	KIT	4	
	2	Schneider, Johannes, Dr.-Ing.	Oberflächentech- nik, Tribologie	KIT	6	
nichtwissenschaftli- che Mitarbeiterin- nen und Mitarbeiter	3	Hahn, Katja		KIT	4	
	4	Keller, Friedbert		KIT	4	
	5	Milich, Marcel		KIT	4	
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerin- nen und Wissen- schaftler	6	Polzer, Thomas, M.Sc.	Tribologie	KIT	41	WiMi
	7	Blaßmann, Songül		KIT	20,5	n. WiMi

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

zu 1: K.-H. Zum Gahr: Leiter des Instituts für Werkstoffkunde II (bis 03/2009) und des Teilprojektes

zu 2: J. Schneider (Akad. Oberrat): Leiter des Teilprojektes

zu 3: K. Hahn (Physiklaborantin): Rasterelektronenmikroskopie, Materialographie

zu 4: F. Keller (Techniker): Profilometrie, Härtemessung, Hartbearbeitung

zu 5: M. Milich (Laboringenieur): Tribometrie, Messtechnik

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

zu 6: M.Sc. Thomas Polzer (Wissenschaftlicher Mitarbeiter) war verantwortlich für die im Teilprojekt D3 durchgeführten tribologischen, mechanischen und topographischen Untersuchungen sowie für die ergänzenden elektronenmikroskopischen sowie oberflächenanalytischen Messungen, wobei er von den anderen beteiligten Mitarbeitern des Instituts unterstützt wurde. Er koordinierte darüber hinaus die Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten des SFBs.

zu 7: Cand. mach. N.N. (studentische Hilfskräfte): Die studentischen Hilfskräfte unterstützten Herrn M.Sc. Thomas Polzer bei der Probenvorbereitung bzw. Versuchsdurchführung und übernahmen metallo- und keramographische Probenpräparationen. Des weiteren wirkten sie beim Aufbau und der Weiterentwicklung von Prüfeinrichtungen sowie bei der Dokumentation der Messergebnisse mit.

zu 10: Dipl.-Ing. (FH) S. Blaßmann (Technische Mitarbeiterin) unterstützte Herrn M.Sc. Thomas Polzer bei der Durchführung der Modelluntersuchungen zum Verschleiß- und Entformungsverhalten von Formeinsätzen beim μ PIM sowie bei der topographischen Nachuntersuchung an beanspruchten Probekörpern aus den tribologischen Modelluntersuchungen im Gleit- und Wälzkontakt.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt Z2

5.1.1 Titel

Konstruktion und Demonstrator – Ausführen von Konstruktionsdienstleistungen, Koordination des Zentrums für integrierte Mikrofertigung (ZIM)

Design and Demonstrator – Execution of design services and coordination of the Center of Integrated Micro Manufacturing (ZIM)

5.1.2 Projektleitung

Albers, Albert, o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c., 20.04.1957, deutsch

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK - Institut für Produktentwicklung

Kaiserstr. 12

76128 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-2371

Telefax: 0721 / 608-6051

E-Mail: sekretariat@ipek.kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Zielsetzung

Das Ziel des Teilprojekts Z2 war es, die innerhalb des Sonderforschungsbereichs anfallenden Konstruktionsdienstleistungen für Demonstratorsysteme, für Probe- und Testkörper sowie für deren Formeinsätze auszuführen und den Zielsetzungen der wissenschaftlichen Teilprojekte entsprechend spezifische Entwürfe und Ausarbeitungen bereitzustellen. Diese Konstruktionsdienstleistungen sollten weiterhin dazu genutzt werden, um ein Referenzprozessmodell für die urformende Mikrosystemtechnik zu entwickeln. Dieses Referenzprozessmodell ist ein wesentlicher Teil des Nachhaltigkeitskonzepts des SFB 499. Dieses sieht vor, die im SFB erarbeitete Wissens- und Methodenbasis anwendergerecht aufzubereiten und somit die Erfahrungen der einzelnen Teilprojekte aus allen Förderphasen bereit zu stellen. Zusätzlich sollten die Erfahrungen des gesamten SFB in Bezug auf teilprojektübergreifende Kooperationen zur Durchführung integrierter Produktentstehungsprozesse in strukturierter Form gebündelt und bereitgestellt werden.

Ansatz: Das Zentrum für Integrierte Mikrofertigung (ZIM)

Um die Zielsetzung zu erfüllen und unabhängig vom SFB auch zukünftig aus dem KIT heraus integrierte Produktentstehungsprozesse (PEP) auf Basis der urformenden Mikrotechnik anbieten und durchführen zu können, wurde das Zentrum für integrierte Mikroproduktion (ZIM) aufgebaut. Dieses musste einerseits durch eine entsprechende Aufbauorganisation (Bild 1) im KIT verankert werden. Andererseits wurde als zentrales Werkzeug und Hilfsmittel zur Durchführung von Projekten das Referenzprozessmodell „Mikrourformen“ erstellt (Bild 2). Dieses beinhaltet einen Ablaufplan und ein Schema zur Zusammenarbeit. Das Teilprojekt Z2 koordinierte hierzu sämtliche Aktivitäten in Bezug auf den Auf- und Ausbau des Zentrums für Integrierte Mikrofertigung (ZIM) des SFB 499.

Aufbauorganisation

Für die Aufbauorganisation wurde der Ansatz des Core-Team-Managements gewählt, da es dadurch möglich ist, die zur Durchführung eines PEP benötigten Kompetenzen projektspezifisch einzubinden. Die im ZIM definierten Kompetenzen entsprechen den ehemaligen Teilprojekten des SFB 499.

Sobald sich Projekte im Bereich der urformenden Mikro-Produktion anbahnen, tritt das „Zentrale Kompetenzteam“ zusammen, um über die Projektanfrage zu beraten und gegebenenfalls ein Angebot an den Kunden abzugeben. Im Zentralen Kompetenzteam sind alle Kompetenzen des ehemaligen SFB vertreten, so dass die Beratung und Entscheidung zu Projektanfragen schnell und effizient durchgeführt und die weitere Projektbearbeitung angestoßen werden kann. Die Tatsache, dass sich je nach Fortschritt eines PEP dessen Aktivitätsschwerpunkte verlagern sowie die benötigten Kompetenzen ändern, lässt sich mithilfe des Core-Team-Managements abbilden. Je nach Fortschritt des PEP kann so die Kompetenz, die in der jeweiligen Phase im Zentrum steht, die Federführung übernehmen. Weiterhin werden Kompetenzen, die in der jeweili-

gen Phase nicht benötigt werden, wieder freigegeben. Dadurch wird eine möglichst ressourcenschonende und selbstorganisierende Organisationsform erreicht, die an die personelle Ausstattung des ZIM angepasst ist (Bild 1).

Zur aktiven Projektakquise nutzt das ZIM das Innovationscluster *μ-now!* [ANO2011a], das als One-Face-to-the-Customer alle Mikroaktivitäten des KIT gebündelt nach außen anbietet und vertritt.

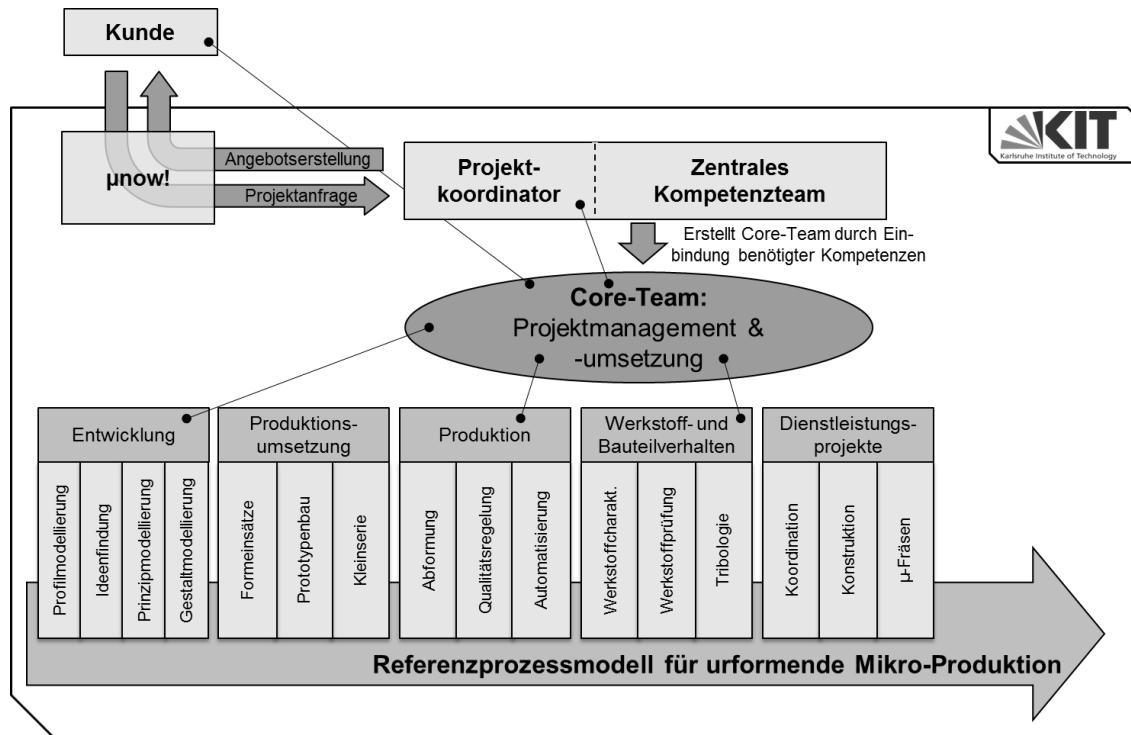


Bild 1: Struktur des Zentrums für integrierte Mikrofertigung

Wesentliche Grundlage für die Aktivitäten des ZIM ist ein explizit vorliegendes Referenzprozessmodell, das insbesondere die Interaktionen der am PEP Beteiligten darstellt sowie die aktivitätsangepasste Einbindung erarbeiteten Wissens zulässt. Wird implizit vorhandenes Wissen über Produktentstehungsprozesse expliziert, entstehen daraus Prozessmodelle. Der tatsächliche (Ist-) Projektverlauf unterscheidet sich im Allgemeinen vom geplanten (Soll-) Projektverlauf. Um diesen Zusammenhang auch prozessmodellseitig abbilden zu können, werden Implementierungsmodelle (präskriptiv, Soll) und Anwendungsprozessmodelle (deskriptiv, Ist) unterschieden. Ein Referenzprozessmodell entsteht aus der Verallgemeinerung projektspezifischer Anwendungsprozessmodelle und besitzt generische Eigenschaften. Dadurch wird es möglich, vom Referenzprozessmodell zur Planung ähnlicher Projekte Implementierungsmodelle abzuleiten, die an die Gegebenheiten des neuen Projekts (Zeit, Ressourcen) adaptiert sind.

Der hier im Fokus stehende PEP besaß zu Beginn der Arbeiten am Referenzprozessmodell die folgenden spezifischen Eigenschaften:

Zum einen ist der PEP komplex, da komplexe Einzeltechnologien miteinander kombiniert werden und aufeinander aufbauen. Außerdem ist er organisatorisch und räumlich verteilt, da am KIT und an der Universität Freiburg verschiedene Institute eingebunden sind und kooperieren. Ein dieser Kooperation zugrunde liegendes Referenzprozessmodell war bislang nicht explizit verfügbar.

Zum anderen ist der PEP kompliziert. Die vorliegenden Erkenntnisse zum Referenzprozessmodell wurden hauptsächlich durch die Analysen von drei verschiedenen PEP gewonnen, die während der Erstellung der Demonstratoren durchlaufen wurden [ALB2006, ALB2010, BAU2010]. Viele einzelne Aktivitäten des PEP sind gekennzeichnet durch einen hohen Anteil an Wissensarbeit (z.B. die Aktivität „Funktions- und Gestaltmodellierung“). Diese Aktivitäten durchlaufen viele Rekursionsschleifen, bis ein akzeptables Ergebnis vorliegt. Hier liegt ein großes Potential zur Zeit- und Kostensparnis, das genutzt werden kann durch Optimierung des Referenzprozesses.

Schließlich ist das PEP-spezifisches „Knowhow“ personengebunden. Das Prozesswissen liegt nur implizit vor und eine reibungslose Umsetzung und Durchführung basiert vor allem auf gewonnenen Erfahrungen, guter interpersoneller Zusammenarbeit und Kooperation. Allerdings ist die Personalfloktuation unter den beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeitern relativ hoch und beträgt im Schnitt 3-5 Jahre. Dadurch wird zwar der Wissenstransfer aus der Forschung in die Industrie begünstigt, die Fortführung der bislang im SFB angesiedelten Tätigkeiten aber erschwert.

Unter den gegebenen Umständen waren eine sinnvolle Prozessplanung und ein Prozesscontrolling sowie eine angepasste Bearbeiterunterstützung bei der Umsetzung eines Implementierungsprozessmodells über das Ende des SFB hinaus nicht machbar.

Prozessmodellierung

Eine wesentliche Anforderung an das zu erstellende Referenzprozessmodell bestand darin, sowohl das Management bei Planung und Controlling als auch die Bearbeiter bei der Umsetzung zukünftiger Projekte geeignet und gleichermaßen zu unterstützen. Ein Ansatz ist durch das „Integrierte Produktentstehungs-Modell“ (iPeM) gegeben, das seit Jahren am IPEK – Institut für Produktentwicklung wechselseitig erforscht und entwickelt wird. Einige Kernideen des iPeM (z.B. aktivitätsorientierte Bereitstellung verschiedener Methoden und Werkzeuge) wurden in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen, indem jeder Aktivität entsprechende den Bearbeiter unterstützende Informationen zugeordnet wurden.

Für die konkrete Ableitung und Darstellung eines Referenzprozessmodells stehen verschiedene Software-tools zur Verfügung, die zur Geschäftsprozessmodellierung eingesetzt werden. Diese Tools können je nach Funktionsspektrum in Visualisierungs-, Modellierungs-, und Simulationswerkzeuge sowie Workflow-Management-Systeme unterteilt werden.

Ableitung des Referenzprozessmodells

Um sowohl das Management als auch die Bearbeiter des Gesamtprozesses möglichst optimal zu unterstützen, müssen die Struktur, die Repräsentation als auch der Informationsinhalt des Referenzprozessmodells geeignet gewählt werden. Während Managementunterstützung typischerweise bedeutet, im Referenzprozessmodell einen möglichst großen Anteil an Formalisierung und Strukturierung zu realisieren, benötigen die Bearbeiter zur Umsetzung des Prozesses unter der geforderten Wissensarbeit ein gewisses Maß an Dynamik (z.B. durch Zulassen nicht geplanter aber im Laufe des Prozesses benötigter Rekursionen) und die aktivitätsangepasste Bereitstellung unterstützender Informationen im Referenzprozessmodell. Dazu muss ein passendes Abstraktionsniveau gefunden werden. Einerseits soll das Referenzprozessmodell so allgemeingültig sein, dass es nicht nur für einen spezifischen, sondern für jegliche PEP in der urformenden Mikro-Produktion genutzt werden kann. Andererseits muss es genau genug sein, um die Bearbeiter während der Durchführung der jeweiligen Aktivitäten mit den benötigten Informationen versorgen zu können.

Zur Erstellung des Referenzprozessmodells wurden exemplarisch die Teilprozesse zur Entwicklung des Demonstrators „Mikro-Gasturbine“ [ALB2010], der Formeinsätze, der Prüfstandsmodifikation sowie der Probe- und Testkörper in enger Kooperation mit den Prozessbearbeitern in mehreren Schritten herausgearbeitet und in Beziehung zueinander gesetzt. Um ein vollständiges Modell mit einem geeigneten Abstraktionsniveau zu generieren, wurde sowohl explizites als auch implizites Wissen [POL1962] der Mitarbeiter durch direkte und indirekte Wissensakquisisen [HOP2009] erworben. Jeder dieser Schritte beinhaltete eine Informationssammlung, eine Informationsvisualisierung, die einen Beitrag zur Förderung der Kommunikation geleistet hat, und eine Informationsvalidierung, um Missverständnisse zwischen dem Prozessbearbeiter als Wissenträger (Sender) und dem Modellierer (Empfänger) zu überwinden [SEI2003]. Im Schritt der Informationsvisualisierung wurden die Informationen durch die Software „Microsoft Visio“ und dem „Aixperanto“ Plug-In grafisch dargestellt [ANO2011b, ANO2011c]. Des Weiteren wurden in jedem Schritt geeignete vorhandene Methoden angepasst oder neue Methoden entwickelt, um diese daraufhin anzuwenden und individuelle, organisationale und technische Barrieren zu überbrücken [HOP2009].

Die aktuelle Version des Referenzprozessmodells [ALB2011a, ALB2011b] ist in Bild 2 dargestellt. Die Komplexität des Modells lässt sich aufgrund der relativ großen Anzahl von Bearbeitern (repräsentiert durch einzelne „Swimlanes“) und deren starke Interaktionen sowie der Anzahl an Einzelaktivitäten ablesen. Weiterhin ist dargestellt, wie die im SFB entwickelten Methoden und Werkzeuge aktivitätsangepasst zur Verfügung gestellt werden und damit den Bearbeiter unterstützen. Das Referenzprozessmodell kann im Folgenden dazu genutzt werden, projektspezifische Implementierungsmodelle abzuleiten, um eine möglichst schlanke Projektdurchführung zu realisieren, vgl. Bild 3.

Für die Anwendung, Validierung und Weiterentwicklung wurde das Referenzprozessmodell schließlich den Mitgliedern des SFB zur Verfügung gestellt. Dadurch konnte Verbesserungspotential aufgenommen und für die Optimierung des Referenzprozessmodells genutzt werden.

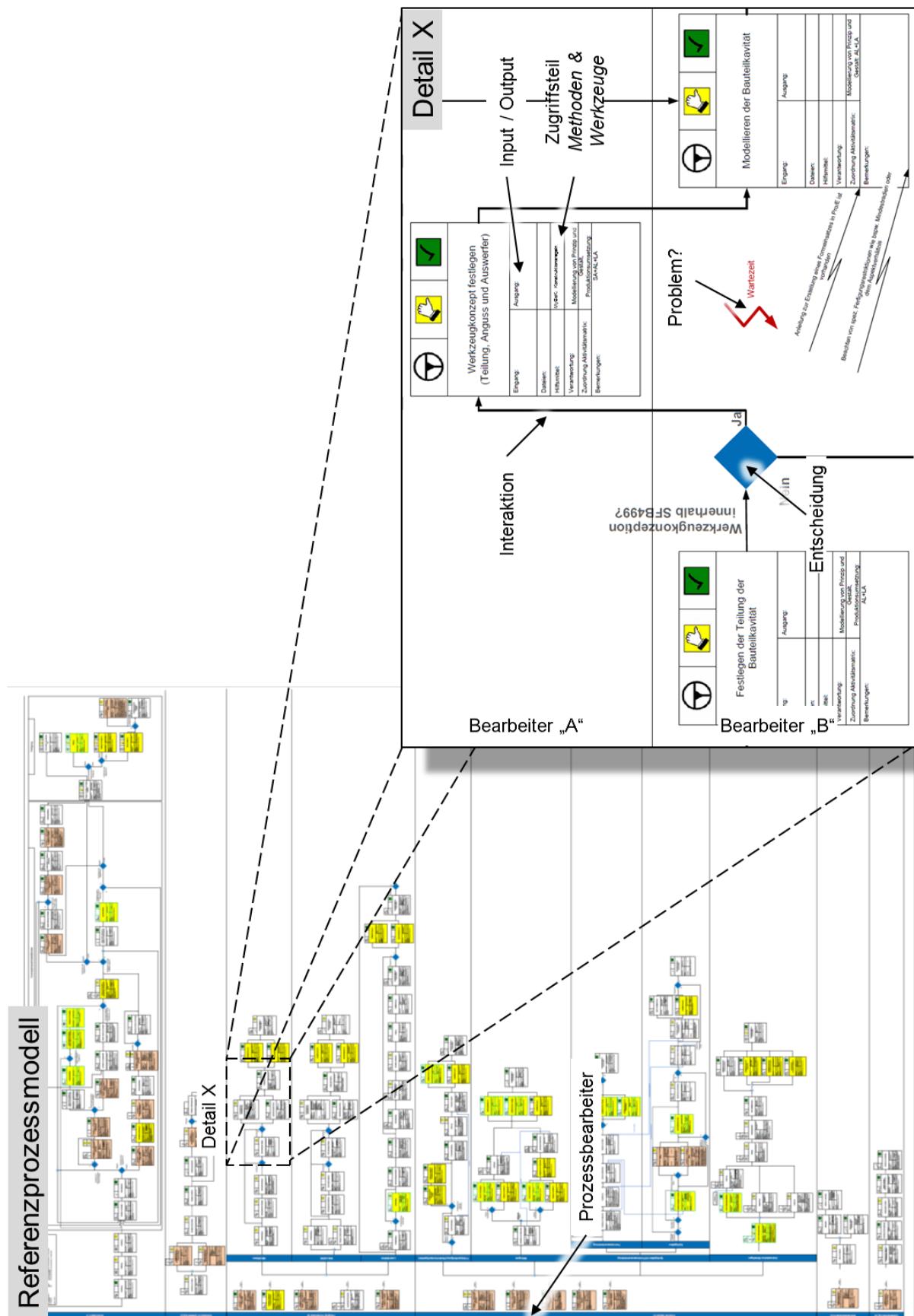


Bild 2: Referenzprozessmodell "Mikrourformen"

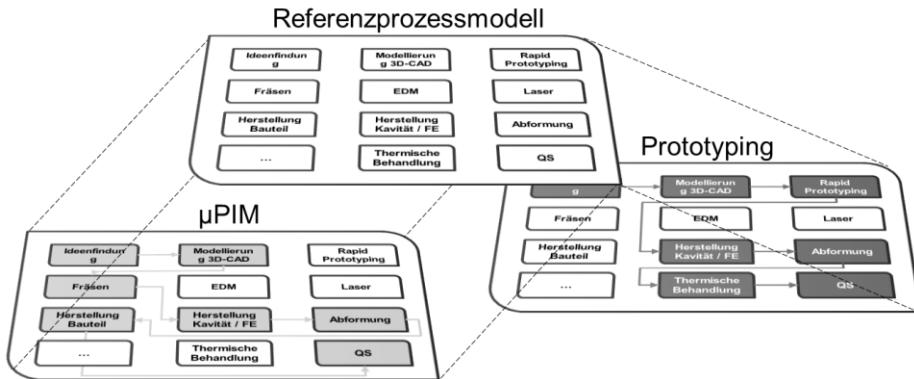


Bild 3: Ableitung projektspezifischer Implementierungsmodelle (μPIM, etc.) vom Referenzprozessmodell

ZIM-Homepage als zentrales Informationssystem

Für eine optimale informatorische Integration im Sinne der Integrierten Produktentwicklung wurde eine entsprechende Homepage eingerichtet (Bild 4). Diese Homepage besteht aus einem öffentlichen und für jeden zugreifbaren Bereich sowie einem internen Bereich, der nur innerhalb des KIT-Intranets und nur mit entsprechenden Zugangsdaten verfügbar ist.

Der öffentliche Bereich bietet allgemeine Informationen zum ZIM, einen Überblick über das Technologieportfolio sowie Hinweise zu Kontaktaufnahme und Projektanfrage. Dieser Bereich richtet sich insbesondere an potentielle Projektpartner aus Industrie und Forschung.

Bild 4: Homepage des Zentrums für integrierte Mikrofertigung

Der interne Bereich stellt neben den Kontaktdaten der einzelnen Core-Team-Mitglieder außerdem den Zugriff auf die im Rahmen des SFB 499 entwickelten Informationssysteme sicher. So können über die zentrale ZIM-Homepage das Micro Book of Knowledge (MyBoK), der Strukturkatalog, der Micro-Feature-Katalog sowie das Referenzprozessmodell „Mikro-Urformen“ erreicht und für Projekte im Bereich des Mikro-

Urformens genutzt werden. Zur zentralen Modell- und Zeichnungsdatenhaltung wurde ein PDM-System eingerichtet. Dadurch wird der Zugriff auf benötigte Informationen zur Angebotserstellung und Projektbearbeitung – insbesondere auch für neue Mitarbeiter – soweit wie möglich vereinfacht. Der interne Bereich richtet sich folglich an die Mitarbeiter des KIT, die im Rahmen des ZIM Projekte betreuen und bearbeiten [BÖR2011].

Literaturangaben

- [ANO2011a] Anon: *μ-now!*, <http://mikro-now.nanomikro.kit.edu/>, besucht am 01.12.2011
- [ANO2011b] Anon: *Microsoft Visio 2010*, <http://office.microsoft.com/en-us/visio/>, besucht am 01.12.2011
- [ANO2011c] Anon: *Aixperanto – Partizipative Prozessanalyse*, http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/aixperanto_lang.htm, besucht am 01.12.2011
- [HOP2009] Hopf, S.: *Fragebogen zur Identifikation von Wissensbarrieren in Organisationen*, Dissertation, Humboldt-Universität, Berlin, 2009
- [POL1962] Polanyi, M.: *Personal Knowledge. Towards a Post-Critical Philosophy*, The University of Chicago Press, Chicago, 1962
- [SEI2003] Seidel, M.: *Die Bereitschaft zur Wissensteilung*, Deutscher Universitätsverlag GmbH, Wiesbaden, 2003

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a)

- [ALB2006] Albers, A., Oerding, J., Deigendesch, T.: *Product Development Regarding Micro Specific Tasks – Challenges in Designing for Production and Assembly*, 16th CIRP International Design Seminar, Kananaskis, Alberta, Canada, 16.-19. Juli, 2006
- [ALB2010] Albers, A., Börsting P., Turki, T.: Application of Design Patterns for the Development of Primary Shaped Microsystems: a Case Study, Multi-Material Micro Manufacture 4M 2010, Oyonnax, France, 17.-19. November, 2010
- [ALB2011a] Albers, A.; Börsting, P.; Turki, T.: *Elicitation of a reference process model for tool-based micro technologies for planning and controlling purposes and user support*, Microsystem Technologies, Volume 17, Number 2, 319-324, DOI: 10.1007/s00542-011-1254-6, 2011
- [ALB2011b] Albers, A., Börsting, P., Wildermuth, C., Hausselt, J., Kraft, O.: *Vom Sonderforschungsbereich 499 zum Zentrum für Integrierte Mikrofertigung (ZIM)*, Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, 11.-12. Oktober, 2011
- [BAU2010] Bauer, W., Müller, M., Knitter, R., Börsting, P., Albers, A., Deuchert, M., Schulze, V.: *Design and prototyping of a ceramic micro turbine: a case study*, Microsystem Technologies, Volume 16, Number 4, 607-615, DOI: 10.1007/s00542-009-0974-3, 2010

b)

- [BÖR2011] Börsting, P.: *Zentrum für integrierte Mikroproduktion am KIT*, www.zim.kit.edu, besucht am 01.12.2011

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit 01.01.2003 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der zu Ende gehenden Förderperiode beendet.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1	Albers, A.	Entwicklungs-methodik	IPEK	2	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	2	Weber, U.		IPEK	2	
beantragte Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler						
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	3	Hoppen, P.		IPEK	19,75	E12
	4	Turki, T.		IPEK	19,75	E12

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

1. Albers, A., Prof. Dr.-Ing.
Leiter des Instituts für Produktentwicklung. Leiter des Teilprojekts.

2. Weber, U. (Techniker)
CAD und EDV Administration

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

3. Hoppen, Philipp, Dipl.-Ing. (2010: 6,5MM, 2011: 8MM)
Turki, Turki, Dipl.-Ing. (2011: 4MM)

Der Konstrukteur führt am IPEK – Institut für Produktentwicklung die innerhalb des Sonderforschungsbereichs und im Zentrum für Integrierte Mikrofertigung anfallenden Konstruktionsdienstleistungen an Demonstratoren, Probe- und Testkörpern und deren entsprechenden Formeinsätzen aus. Dies beinhaltet unter anderem beispielsweise die Erstellung fertigungsgerecht und messtechnikgerecht bemaßter und tolerierter Zeichnungen. Die Module der Erweiterung des Mikrozahnradprüfstandes sind nach erfolgter Entwurfsfreigabe zu entwerfen und auszuarbeiten. Weiterhin organisiert der Bearbeiter das Datenmanagement für alle Dokumentationen und Zeichnungen und administriert das SFB-weite Datenablagessystem „InforaumSFB499“. Schließlich koordiniert der Konstrukteur den Aufbau des Zentrums für integrierte Mikrofertigung und sichert in Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten. Zudem ist er für die Programmierung der benötigten Schnittstellen und dem Aufbau der ZIM-Homepage verantwortlich.

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt Z3 Formeinsätze

5.1.1 Titel:

Formeinsätze und Probekörper – Zentrale Bereitstellung von Formeinsätzen und Probekörpern
Moulds and specimens – Centralised allocation of moulds and specimens

5.1.2 Projektleitung

Schulze, Volker, Prof. Dr.-Ing. habil.
 geb. 20.04.1965, deutsch
 Institut für Produktionstechnik (wbk)
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Kaiserstr. 12
 76128 Karlsruhe
 Telefon: 0721/ 608-42440
 Telefax: 0721/ 608-45004
 E-Mail: volker.schulze@kit.edu

5.2 Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Zusammenfassung

Die Zielsetzung des Teilprojektes Z3 war die zentrale Fertigung und Bereitstellung von Formeinsätzen, Modellen und Proben, die von allen fünf urformenden Teilprojekten A3, C1, C2, C3, C5 und darüber hinaus in weiteren charakterisierenden Teilprojekten benötigt wurden. Das Teilprojekt Z3 ging aus dem Teilprojekt B2 „Mikrozerspanung“ hervor, das die Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet zum Ende der 2. Förderphase beendet hatte. Durch die Förderung der wissenschaftlichen Arbeiten in TP B2 während der ersten beiden Förderperioden des Sonderforschungsbereichs 499 konnten solide Prozesse für die Mikrozerspanung von gehärteten Stählen erarbeitet werden. Ein wichtiger Meilenstein war die Erstellung eines Strukturenkataloges, welcher die Erfahrungswerte hinsichtlich zu verwendender Parameter und fertigbarer Strukturen übersichtlich bereitstellt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen fertigte Z3 die für die Arbeiten der 3. und 4. Förderphase notwendigen Formeinsätze und Probekörper nach Maßgabe von A1 bzw. Z2, veranlasste die Vermessung der fertigen Formeinsätze bei C4 und lieferte die Bauteile an die bestellenden Teilprojekte. Formeinsätze, die aufgrund von Beschränkungen der Frästechnologie nicht direkt in Z3 gefertigt werden konnten, wurden je nach Fertigungsaufgabe an B4 „Mikrofunkenerosion“ oder B6 „Mikrolaserabtrag“ weitergeleitet mit möglicher Feinstbearbeitung durch B5. Weitergehender Bedarf an Formeinsätzen, Modellen und Probekörpern wurde durch das LIGA-Verfahren am Campus Nord bzw. durch Industrievergabe gedeckt. Die Vergabe der Formeinsätze an Industrieunternehmen erfolgte dann, wenn ein benötigtes Verfahren in dieser Form nicht durch Fertigungsprozesse innerhalb des Sonderforschungsbereiches zur Verfügung stand. Dazu zählte beispielsweise das Drahterodieren, bei dem Durchgangslöcher für Auswerferstifte mit einem bestimmten Profil versehen werden mussten. Das Teilprojekt Z3 koordinierte für alle Formeinsätze die Priorisierung, die termingerechte Fertigung und überwachte die Weiterleitung der Formeinsätze an die jeweiligen Teilprojekte.

5.2.2 Bericht

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

-entfällt-

Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

Während der letzten Förderphase wurden verschiedene Formeinsätze für Bauteile des Demonstrators Mikroturbine hergestellt. Es wurden beispielsweise je 10 Formeinsätze für die Düsenseite und Auswerferseite des Laufrads und des Leitrads hergestellt sowie 5 Formeinsätze für den Lagerschild. Zusätzlich wurden

ca. 150 tribologische Probekörper aus unterschiedlichen Materialien (Messing, Toolox 44, etc.) für Untersuchungen in D3, sowie 20 Formelektroden zum Senkerodieren in B4 hergestellt.

Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick über die gefertigten Bauteile. Abbildung 1 zeigt links das CAD Modell der Düsenseite des Laufrads, rechts ist der zugehörige Formeinsatz zu sehen. Aufbauend auf den bisher im SFB gesammelten Erkenntnissen wurde aus dem CAD-Modell mit Hilfe von Esprit CAM eine entsprechende Bearbeitungsstrategie entwickelt. Aufgrund der schweren Zugänglichkeit für die Angussbohrungen in der Mitte des Formeinsatzes wurden diese in den mikrogefrästen Formeinsatz mittels Mikrofunkenerosion nachträglich eingearbeitet.

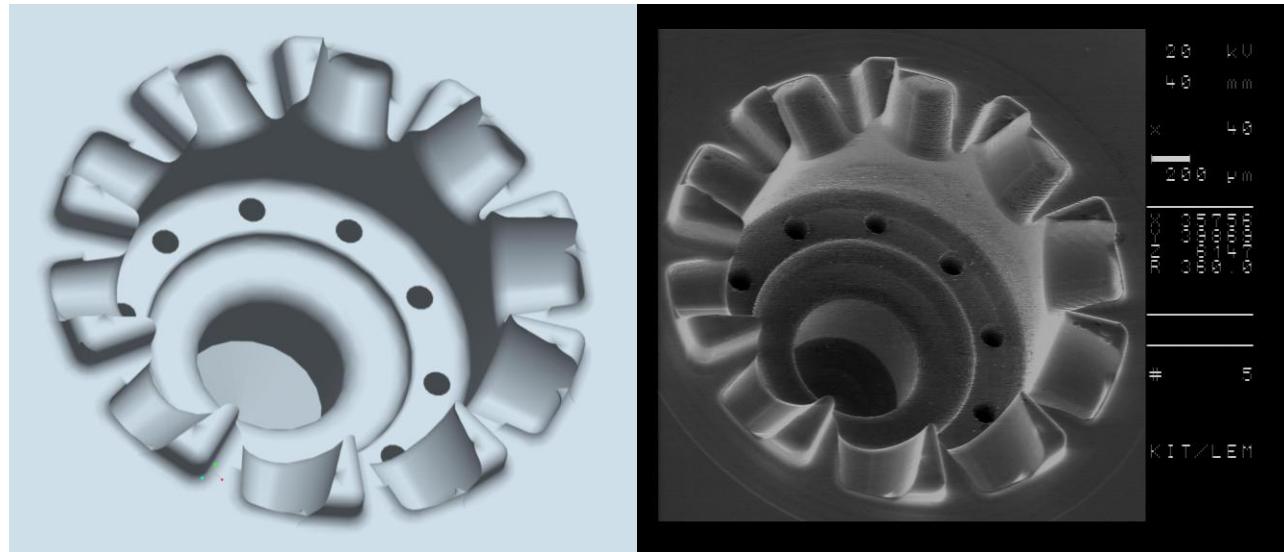


Abbildung 1: CAD-Modell des Laufrads (links) und gefertigter Formeinsatz (rechts)

Für jedes Bauteil sind zwei Formeinsatzhälften gefertigt worden. Abbildung 2 zeigt die Formeinsätze des Laufrads für Düsenseite (links) und Auswerferseite (rechts).

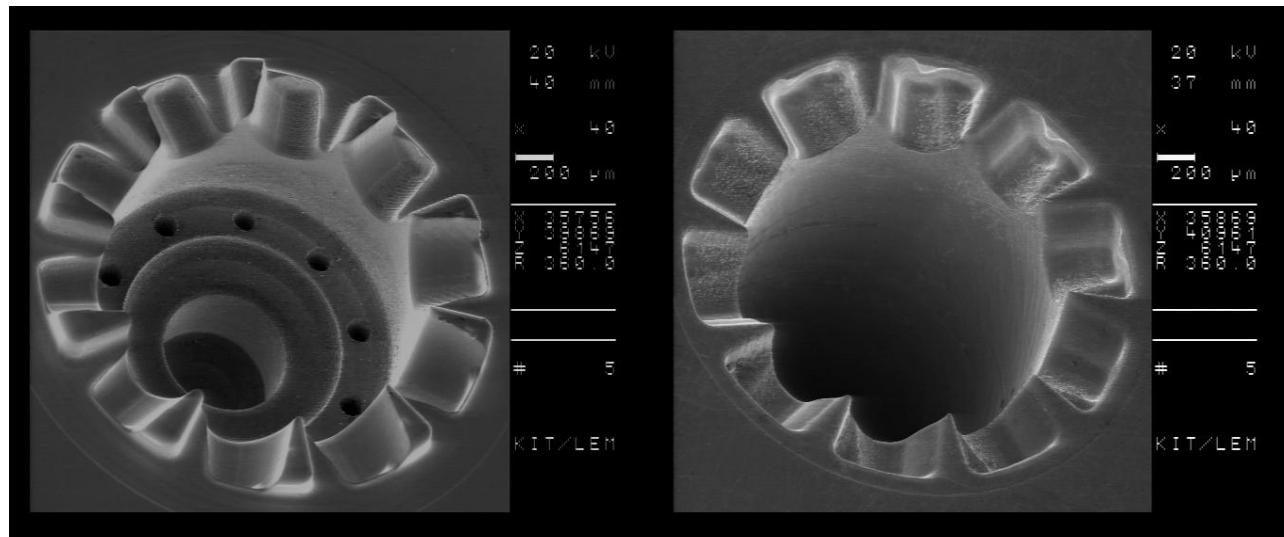


Abbildung 2: Düsenseite (links) und Auswerferseite (rechts) des Laufrads

Die Formeinsätze wurden in den abformenden Teilprojekten zur Bauteilherstellung mittels der im SFB entwickelten Werkstoffe genutzt. Abbildung 3 zeigt die Düsenseite des Formeinsatzes (links) und das abgeformte Bauteil (rechts) aus ZrO_2 .

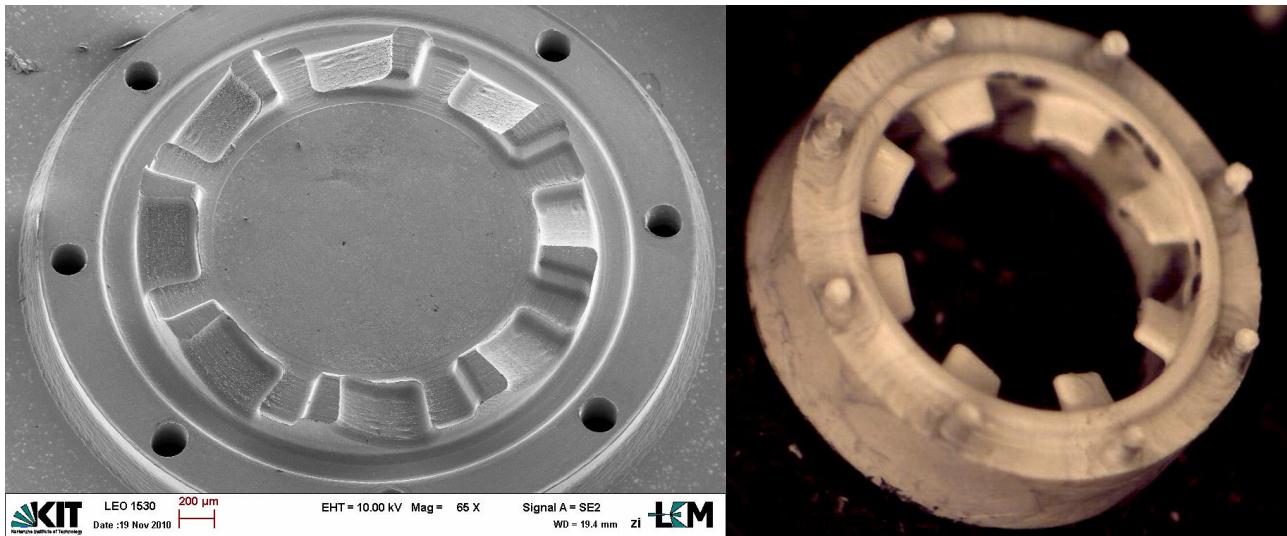


Abbildung 3: Düsenseite des Formeinsatzes von Leitrad (links) und abgeformtes Leitrad aus ZrO₂ (rechts)

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

-entfällt-

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Z3 fertigte und koordinierte zentral die Formeinsatzfertigung für den gesamten SFB. Durch die Teilnahme an den Arbeitskreisen „Formeinsätze“ und der Arbeitsgruppe „Vereinzelte Mikrobauteile“ konnte Z3 das Know-how aus den vorherigen Förderperioden im Bereich der Mikrozerspanung auch in der letzten Förderphase in den SFB einbringen. Im Rahmen der Formeinsatzkoordination hielt Z3 engen Kontakt zu allen konstruktiven (A1, Z2), formeinsatzfertigenden (B4, B5, B6), urformenden (A3, C1, C2, C3, C5) und charakterisierenden Teilprojekten (C4, D1, D2, D3). Nur in dieser engen Abstimmung konnte eine effiziente Produktionskette aufgebaut werden.

TP	Erhielt von Z3	Lieferte an Z3
A1	Kennzahlen über fertigungstechnische Machbarkeit von Mikrostrukturen (Aspektverhältnisse, Strukturgrößen, Werkstoffhärte, ...) In Zusammenarbeit mit B4, B5 und B6 Katalog über Frä-, Erodier- und Laserstrukturenstrukturen	Zur Entwurfsfreigabe ausgearbeitete Formeinsatzkonzepte für die Demonstratorbauteile
A3	Formeinsätze und Modelle für Probekörper und Demonstratorkomponenten	Anforderungen für die Fertigung der Formeinsätze und Modelle
B4	Vorschlag zu Teststrukturen (Strukturenkatalog) Gefräste Formelektroden Vorgefräste Formeinsätze, die mit Mikrostrukturen versehen werden müssen und nicht zerspanend hergestellt werden können (z.B. Mikrobohrungen)	Durch Funkenerosion hergestellte Formeinsätze lt. Angaben von Z3
B5	Durch Mikrozerspanen hergestellte Teststrukturen und Formeinsätze zur Feinstbearbeitung	Mikrozerspangerechte Werkstoffzustände Topographie- und Gefügecharakterisierung

TP	Erhielt von Z3	Lieferte an Z3
	Gemeinsame Erarbeitung von Prozeß-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen und des Teststrukturenkatalogs für die Formeinsatzfertigung	
B6	Vorschlag über Teststrukturen (Strukturenkatalog) Vorgefräste Formeinsätze, die mit Mikrostrukturen versehen werden müssen und nicht zerspanend hergestellt werden können (z.B. Mikrobohrungen)	Durch Laserablation hergestellte Formeinsätze lt. Angaben von Z3
C1	Formeinsätze für Demonstratorbauteile und Probekörper	Anforderungen an mikrogefräste Formeinsätze
C2	Gefräste Modelle und Formeinsätze	Anforderungen an mikrogefräste Modelle bzw. Formeinsätze zur Erzeugung verlorener Modelle
C3	Lieferung von Mikro-Kavitäten für die Abformung von Bauteilen im Rahmen der Vereinzelungs- und Entformungsversuche	Anforderungen an Mikro-Kavitäten im Rahmen der Vereinzelungs- und Entformungsversuche
C4	Soll-Geometriemasse des Formeinsatzes Formeinsätze zur Vermessung Qualitäts-/ Prozessparameter zur Erstellung der Microfeatures und zur Durchführung von μ -SPC Formeinsätze	Ergebnisse aus geometrischer FE Vermessung und Auswertungen über Problembereich in den Abformungen Informationsbereitstellung zu Microfeatures Empfehlung für Steuerung und Regelung des Fertigungsprozesses
C5	Anforderungen an Mikro-Kavitäten im Rahmen der Vereinzelungs- und Entformungsversuche	Lieferung von Mikro-Kavitäten für die Abformung von Bauteilen im Rahmen der Vereinzelungs- und Entformungsversuche
D2	-	Formeinsatzabhängige Probekörper- und Demonstratorkomponenteneigenschaften
D3	Mikrozerspanend hergestellte Probekörper für die tribologischen Modelluntersuchungen zum Mikropulverspritzgießen	Hinweise zur Optimierung der Mikrozerspanung im Hinblick auf die Minimierung des Formeinsatzverschleißes und günstiges Entformungsverhalten
Z2	-	3D CAD Modelldaten und abgeleitete fertigungsgerechte Zeichnungen von Demonstrator- und Probekörperformeinsätzen Fertigungsgerechte Zeichnungen für den Werkzeug- und Formenbau

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

-entfällt-

5.2.3 Projektrelevante eigene Publikationen

- [1] Schulze, V.; Deuchert, M.; Ruhs, C.; Weber, P.; Weingärtner, R.: Fertigungstechnologien zur Erzeugung hochgenauer Mikrostrukturen und Oberflächen. Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, 11. - 12. Oktober 2011, Karlsruhe, Germany, KIT Scientific Reports, ISBN 978-3-86644-747-9, S. 65 - 74, 2011
- [2] Schulze, V.; Weber, P.; Deuchert, M.; Haupt, S.; Ruhs, C.; Kienzler, A.: Limits and challenges of manufacturing micro moulds, International Journal of Nanomanufacturing, Jahrgang 2010, Vol. 6, No.1/2/3/4, Inderscience Publishers, DOI 10.1504/IJNM.2010.034782, S. pp. 176 - 189, 2010
- [3] Munzinger, C.; Dieckmann, A.-M.; Deuchert, M.; Klimscha, K.; Leberle, U.: Research on the machining of green feedstock material for sinter joining, Euspen International Conference, 31.05.-04.06.2010, Delft, Niederlande, Sieca Repro, Band 2, conference proceedings, Delft, ISBN 978-0-9553082-8-4, S. 99-102, 2010
- [4] Bauer, W.; Müller, M.; Börsting, P.; Albers, A.; Deuchert, M.; Schulze, V.: Design and prototyping of a ceramic micro turbine: a case study, Microsystem Technologies, Jahrgang 2010, Vol. 16, No. 4 / April 2010, Springer, Berlin / Heidelberg, ISBN/ISSN 0946-7076, S. 607-615, 2010
- [5] Schulze, V.; Deuchert, M.; Kienzler, A.; Ruhs, C.; Weber, P.: Prozessübergreifende Betrachtung abtragender Verfahren zur Mikroformemeinsatzherstellung. 4. Kolloquium Mikroproduktion, 28.-29.10.2009, Bremen, Deutschland, BIAS-Verlag, F. Vollertsen, S. Büttgenbach, O. Kraft, W. Michaeli, Band , 4. Kolloquium Mikroproduktion, Bremen, ISBN 978-3-933762-32-0, S. 125-131, 2009
- [6] Kienzler, A.; Deuchert, M.; Schulze, V.: Burr Minimization and Removal by Micro Milling Strategies or Micro Peening Processes, International Conference on Burrs, 02.04.2009 - 03.04.2009, Kaiserslautern, Deutschland, 2009
- [7] Schulze, V.; Weber, P.; Deuchert, M.; Haupt, S.; Ruhs, C.; Kienzler, A.: Limits and challenges of manufacturing micro molds. 6th International Symposium on Nanomanufacturing (ISNM-6), 12-14 November 2008, Athen, Greece, 2008

5.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wurde seit 01.01.2006 im Sonderforschungsbereich gefördert.

5.3.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1	Schulze, V., Prof. Dr.-Ing. habil.	Institutsleitung, Maschinenbau, Fertigungstechnik und Werkstoffkunde	wbk	2
	2	Raab, M.		wbk	5 (B)
beantragte Ergänzungsausstattung					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	3	N.N.		wbk	19,25
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	4	Raab, U.		wbk	20
	5	Becker, M.		wbk	39,5

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

- zu 1: Prof. Dr.-Ing. habil V. Schulze war und ist Mitglied der Institutsleitung des Instituts für Produktions-technik. Ihm oblag die Leitung und beratende Überwachung des Teilprojektes. Er vertrat das Teilprojekt auf den Mitgliederversammlungen des Sonderforschungsbereiches und pflegte Kontakte zu den anderen Teilprojektleitern zur Förderung der Zusammenarbeit innerhalb des Sonderforschungsbereiches.

zu 2: Manfred Raab unterstützte das Teilprojekt Z3 aufgrund seiner langjährigen Erfahrung auf diesem Gebiet vor allem durch die Betreuung der Messtechnik.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

zu 3: Die studentische Hilfskraft unterstützte die technischen Mitarbeiter bei der Vorbereitung und Durchführung der Fräsarbeiten. Insbesondere unterstützte er Herrn Matthias Becker bei der äußerst zeit- aufwändigen Einrichtung der Werkstücke auf der Maschine sowie der Werkzeuge in der Spindel.

zu 4: Aufgrund der großen Menge an Formeinsätzen über die beantragte Förderperiode war es essentiell, NC-Programme durch erfahrene Programmierer erstellen und optimieren zu lassen. Frau Ute Raab (TVL-E11) war mit ihrer langjährigen Erfahrung im Bereich der Programmierung und NC-Programmerstellung v. a. für mikrostrukturierte Formeinsätze qualifiziert, die umfangreichen Arbeiten zu übernehmen.

zu 5: Für die Fertigung der Formeinsätze war neben der NC-Programmierung weiterhin umfangreiches Know-How im Bereich der Werkzeuge, der Maschine und des Prozesses notwendig, um einerseits entsprechende Rohlinge für die abformenden Verfahren herzustellen und andererseits die höchsten Präzisionsanforderungen an die Formeinsätze mit den Parametern Prozess, Maschine und Werkzeuge optimal abzustimmen. Aufgrund seiner langjährigen Erfahrung in der Fertigung von mikrostrukturierten Formeinsätzen übernahm Matthias Becker diese Aufgabe (Technischer Mitarbeiter TVL-E9). Neben der eigenständigen Fertigung der Formeinsätze übernahm er weiterhin die Koordination des Formeinsatzflusses im SFB und koordinierte die zeitliche Abfolge in enger Abstimmung mit den Teilprojekten des SFB. Nur mit dem gleichzeitigen Einsatz von Frau Raab und Herrn Becker konnte gewährleistet werden, dass die Programmerstellung des nächsten und die Fertigung des aktuellen Formeinsatzes parallel durchgeführt werden konnten bei gleichzeitiger Bearbeitung der organisatorischen Aufgaben in diesem Projekt.

6 Bericht über das Integrierte Graduiertenkolleg

6.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt Z4

6.1.1 Titel

Integriertes Graduiertenkolleg – „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung ungeformter Mikrobauteile“

Integrated Research Training Group „Design, Production, and Quality Assurance of Molded Micro-components“

6.1.2 Projektleitung

Kraft, Oliver, Prof. Dr. rer. Nat., geb. 04.11.1964, Deutsch
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Institut für Angewandte Materialien – Werkstoff- und Biomechanik
 Kaiserstr. 12
 76128 Karlsruhe
 Telefon: 0721 / 608-
 Telefax: 0721 / 608-
 E-Mail: oliver.kraft@kit.edu

6.2 Mitglieder des Graduiertenkollegs

In **Tabelle 1** sind die Kollegiaten sowie die assoziierten Kollegiaten des Graduiertenkollegs aufgeführt. Die Teilnehmer wurden ausschließlich über die Teilprojekte oder andere fachnahe Drittmittelprojekte finanziert. Die Vergütung der Doktoranden erfolgte über E13-Stellen zu 100% der Arbeitszeit.

Tabelle 1: Kollegiaten

Nachname	Vorname	Status
Funk	Matthias	Mitglied
Kippenbrock	Kyle	Mitglied
Klimscha	Katharina	Mitglied
Maisenbacher	Jens	Mitglied
Ruhs	Christoph	Mitglied
Straub	Thomas	Mitglied
Weber	Patricia	Mitglied
Burger	Sofie	assoziiertes Mitglied
Durime	Buqezi-Ahmeti	assoziiertes Mitglied
Fatih	Cetinel	assoziiertes Mitglied
Leberle	Urs	assoziiertes Mitglied
Müller	Tobias	assoziiertes Mitglied
Ruh	Andreas	assoziiertes Mitglied
Ruprecht	Ester	assoziiertes Mitglied
Tobias	Kennerknecht	assoziiertes Mitglied
Weber	Oxana	assoziiertes Mitglied

6.3 Qualifizierungskonzept

Das Programm des Graduiertenkollegs wurde im Wesentlichen von den Antragstellern des KIT und der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg als Dozenten bestritten, wobei die Promotion in der Fakultät Maschinenbau am KIT oder im Fachgebiet Mikrosystemtechnik an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg erfolgt. Das Studienprogramm des integrierten Graduiertenkollegs umfasste einerseits ein für alle Kollegiaten gleiches

Pflichtcurriculum, das für das Graduiertenkolleg zentrale technisch-wissenschaftliche und methodische Kenntnisse vermittelt und die Entwicklung von Schlüsselqualifikationen einbezieht. Andererseits sieht das Vorlesungsprogramm ein qualifizierendes Individualcurriculum vor, dessen Abfolge und Ausrichtung von den Betreuern auf die Ausbildung der Kollegiaten zugeschnitten wurde.

Im Pflichtcurriculum wurden drei Weiterbildungen durchgeführt. Bei deren Organisation unterstützte die Personalentwicklung des KIT die Kurse „Projektmanagement“ (2.-3.02.2010) und „Cool, Calm and Collected at International Conferences“ (28. – 29.10.2010). Mit dem English-Department wurde ein individuell auf die Bedürfnisse der Teilnehmer ausgelegter Kurs für „Technisches Englisch“ (WS 2010/2011) durchgeführt. Alle Teilnehmer mussten dafür an einem Einstufungstest teilnehmen und basierend auf dessen Ergebnis wurde der Lerninhalt ausgerichtet. Auch war die Ringvorlesung, die von den Teilprojektleitern gehalten wurde, für die Kollegiaten Pflicht. Darin wurden aktuelle und fachspezifische Forschungsinhalte des SFB vermittelt. Beim Individualcurriculum haben die Kollegiaten an Vorlesungen sowie auch an Weiterbildungen zu Schlüsselqualifikationen teilgenommen. Die besuchten Vorlesungen waren: Mechanik von Mikrosystemen, Planungstheorie, Elektronenmikroskopie, Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen sowie Teammanagement, wissenschaftliches Schreiben in Deutsch und Englisch, Rhetorik der wissenschaftlichen Präsentation und „Stimme, Sprechen, Auftreten“.

Insbesondere wurden die Kollegiaten auch in die Organisation von Veranstaltungen eingebunden oder haben diese eigenständig organisiert. Dazu zählen die Seminarreihe des SFB, Sommerschule im Jahr 2009 und das Kolloquium Mikroproduktion im Jahr 2011 als öffentliche Veranstaltungen und die Klausurtagung des SFB 499 als interne.

Weiterbildungen		
Projektmanagement	2.-3.02.2010	Pflichtcurriculum
Cool, Calm and Collected at International Conferences	28. – 29.10.2010	Pflichtcurriculum
Technisches Englisch	WS 2010/2011, 2 SWS	Pflichtcurriculum
Vorlesungen		
Ringvorlesung „Mikrosystemtechnik - Anwendungen, Fertigungsverfahren, Herausforderungen“	SS 2009	Pflichtcurriculum
Veranstaltungen - Organisation		
Sommerschule	30.06.2009	Pflichtcurriculum
Klausurtagung SFB 499	08.06.-09.06.2010	Pflichtcurriculum
Kolloquium Mikroproduktion	11.-12. Oktober 2011	Pflichtcurriculum
Veranstaltungen - Teilnahme		
Kolloquium Mikroproduktion	28.-29.10.2009	
Sonstiges		
Auslandsaufenthalt		freiwillig
Werksbesichtigung Dillinger Hütte	29.8.2011	freiwillig

Eine weitere wichtige Komponente des Integrierten Graduiertenkollegs bestand in der Förderung eines internationalen wissenschaftlichen Austauschs, vor alle auch über die Teilnahme an internationalen Tagungen hinausgehend. Dazu wurden mehrere Maßnahmen durchgeführt und zum Teil auch durch Mittel des SFB finanziell unterstützt. Es wurden verschiedene Gastwissenschaftler eingeladen und haben im Rahmen der SFB-Seminare oder von Sonderseminaren vorgetragen. Insbesondere Prof. John Balk hatte mehrere Gastaufenthalte am KIT verbracht und eng mit der Nachwuchsgruppe des SFB zusammengearbeitet. Aus diesem Austausch ist mittlerweile ein koordiniertes Programm zum Austausch von Bachelor-Studenten des Maschinenbaus zwischen dem KIT und der University of Kentucky entstanden. Des Weiteren bestand eine Zusammenarbeit mit Prof. George Pharr (University of Tennessee), der als Humboldt-Preisträger am KIT war. Durch Mittel des Integrierten Graduiertenkollegs war es möglich, einen seiner Doktoranden für einige Wochen nach Karlsruhe einzuladen, um gemeinsame Untersuchungen durchzuführen. Es wurde darüber hinaus ein durch das Rise-Programm finanziert Student für drei Monate am wbk in die Arbeiten des SFB integriert.

Umgekehrt wurde zur weiteren berufsbezogenen Qualifizierung der Kollegiaten eine finanzielle Unterstützung für einen Auslandsaufenthalt angeboten. Zwei Kollegiaten haben dieses Angebot angenommen und haben jeweils einen dreimonatigen Aufenthalt an der University of California Berkeley bzw. dem Georgia Institute of Technology durchgeführt. Sie konnten dadurch ihre fachliche Expertise erweitern und wertvolle interkulturelle Erfahrungen sammeln.

6.4 Organisations- und Betreuungskonzept

Die administrativen Tätigkeiten wurden von Frau Dr. Haug wahrgenommen, die am Institut des Sprechers tätig war. Sie war zu jeder Zeit als Ansprechpartnerin für die Kollegiaten verfügbar sowie für die Koordination der Veranstaltungen des Pflichtcurriculum und für die administrativen Details des Studien- und Gastwissenschaftlerprogramms zuständig. Sie unterstützte die Kollegiaten bei der Organisation ihrer Veranstaltungen.

Die Doktoranden, die zu Beginn der letzten Förderphase im SFB tätig waren, wurden je nach Fortschritt ihrer Arbeit in das Graduiertenkolleg aufgenommen. Dabei wurde zwischen Vollmitgliedern und assoziierten Mitgliedern unterschieden. Die Vollmitglieder hatten zeitlich noch die Möglichkeit das Studienprogramm vollständig zu durchlaufen während die assoziierten Mitglieder nur an einzelnen Veranstaltungen teilgenommen haben. Zur Planung und Dokumentation wurden in den ersten beiden Jahren der Förderperiode von den Kollegiaten und Ihren Betreuern Leistungsvereinbarungen erstellt, wobei jeweils nach Ablauf des Jahres ein Abgleich mit den Aktivitäten des zurückliegenden Jahres stattfand. Die Leistungsnachweise wurden von Frau Haug gesammelt und der Leistungsstand nach Ablauf des zweiten Jahres überprüft, um ggf. noch Maßnahmen für das dritte Jahr vereinbaren zu können.

Grundsätzlich erfolgte die Betreuung der Kollegiaten entsprechend ihrer Aufgaben in den Teilprojekten, d.h. die entsprechenden Teilprojektleiter fungierten als Betreuer der Kollegiaten und soweit möglich auch als Hauptreferenten für die Promotionsarbeit. Es wurden bewusst keine Betreuungspaare gebildet, da die Doktoranden bereits durch die Arbeitskreise im SFB mit verschiedenen anderen Teilprojekten und deren Leitern vernetzt waren. Darüber hinaus waren die Doktoranden sehr engagiert und selbstständig bei der Konferenzteilnahme im In- und Ausland. Da die Institute international sehr gut vernetzt sind, war hier eine weitere Betreuung durch das Graduiertenkolleg nicht nötig.

6.5 Umfeld des Graduiertenkollegs

Die Doktoranden werden auch in das über die Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder geförderte Karlsruhe House of Young Scientists (KHYS) aufgenommen, in dem alle Doktoranden des KIT unabhängig davon, ob sie individuelle oder strukturierte Promotionsverfahren durchlaufen, aufgenommen werden. Das KHYS fördert die Doktoranden bei Auslandsaufenthalten und beim Erwerb von Schlüsselqualifikationen. Dementsprechend war es möglich durch das KHYS Unterstützung für die Betreuung der Doktoranden des SFB und bei der Durchführung einzelner Veranstaltungen zu erhalten.

6.6 Bilanz

Im Qualifizierungskonzept war ein 5-semestriges Vorlesungsprogramm mit insgesamt 13 SWS vorgesehen. Der individuell zu gestaltende Anteil überwiegt dabei mit 8 SWS. Im 3. Studienjahr sind keine Vorlesungen vorgesehen, damit die Kollegiaten sich auf den Abschluss der bearbeiteten Teilprojekte und die Zusammenfassung ihrer wissenschaftlichen Arbeit konzentrieren können. Das Integrierte Graduiertenkolleg wurde in der letzten Förderphase beantragt und hatte somit eine Förderdauer von nur drei Jahren. Das hat sich im Nachhinein betrachtet als nicht sinnvoll herausgestellt. Für die Doktoranden, die zu Beginn der Förderphase bereits im SFB aktiv waren, war es nicht sinnvoll als Vollmitglieder aufgenommen zu werden, um das gesamte Curriculum zu durchlaufen, da sie in der Regel schon einzelne nicht-strukturierte fachliche und überfachliche Weiterbildungen durchlaufen hatten. Es muss festgestellt werden, dass sich die späte Einführung des Graduiertenkollegs in der letzten Förderphase deshalb als schwierig herausgestellt hat, da für viele Mitglieder des SFB die nachträgliche Einführung des Pflichtcurriculums zunächst als eine zusätzliche Belastung angesehen wurde, anstatt als Möglichkeit zur persönlichen Weiterentwicklung wahrgenommen zu werden. Die Doktoranden, die in der letzten Förderphase mit ihrer Arbeit begonnen haben, konnten zwar das Curriculum durchlaufen, haben aber ihre Promotion nicht während der Laufzeit des SFB abgeschlossen, da je nach Aufgabenspektrum die Dauer einer Promotion im stark ingenieurwissenschaftlich geprägten Umfeld des SFB vier Jahre und mehr beträgt. Dementsprechend hat kein Kollegiat seine Promotion während der Förderdauer abgeschlossen.

6.7 Rückblick auf die Förderung

Das Graduiertenkolleg wird seit 01.01.2009 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wird mit Ablauf der Förderung des SFB ebenfalls beendet.

6.7.1 Personal im Teilprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1	Kraft, O., Prof. Dr. rer. nat	Werkstoffwissenschaften	IAM	1	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	2	Doer, A.		IAM	4	
Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	3	Haug, A., Dr.	Maschinenbau	IAM	19,5	
	4		Maschinenbau	IAM	19,5	SH
Gastwissenschaftler						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	6	Balk, T., Prof.	Werkstoffwissenschaften	University of Kentucky	22.06.2009-10.07.2009, 28.06.2010-09.07.2010 28.06.2011-08.07.2011	
	7	Konzilia, G., Dipl.-Ing.		Fa. z-micro-systems	30.06.2009-01.07.2009	
	8	Kobes, M., Dipl.-Ing.	Werkstoffwissenschaften	Universität Erlangen-Nürnberg	30.06.2009-01.07.2009	
	9	Vetter, K., Dipl.-Ing.	Werkstoffwissenschaften	Universität Erlangen-Nürnberg	30.06.2009-01.07.2009	
	10	McEvily, A. Prof.	Werkstoffwissenschaften	University of Connecticut	15.04.2009-13.05.2009	
	11	Johanns, K., M.Sc.	Werkstoffwissenschaften	University of Tennessee	01.04.2010-05.05.2010	
	12	Joo, Y.-C., Prof.	Werkstoffwissenschaften	Seoul National University	08.09.2010-09.09.2010	
	13	Wibowo, E.	Maschinenbau	University of Berkeley	01.06.2011-30.07.2011	

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Grundausstattung):

- Zu (1) Prof. Dr. Oliver Kraft ist als Leiter des integrierten Graduiertenkollegs verantwortlich für dieses Teilprojekt.
- Zu (2) Frau Doer ist Verwaltungsangestellte am IAM-ZBS und unterstützt den Leiter und die wissenschaftlichen Koordinatorin des integrierten Graduiertenkollegs bei den unten beschriebenen Aufgaben.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Ergänzungsausstattung):

- Zu (3) Organisation des Studienprogramms und Koordination des Graduiertenkollegs. Dieser unterstützt den Leiter des Graduiertenkollegs in der wissenschaftlichen Koordination. In seinen Aufgabenbereich fallen u. a.:
- Konzeption und Abstimmung der Inhalte der neuen Ringvorlesung „Mikrosystemtechnik“
 - Begleitung, Dokumentation der Ausschreibungs- und Auswahlverfahren
 - Ausgestaltung der Individualcurricula in Absprache mit den Kollegiaten und Betreuern
 - Schließen der Zielvereinbarungen
 - Nationale und internationale Korrespondenz
 - Organisation der Aufenthalte der Gastwissenschaftler
 - Organisation von Veranstaltungen, sofern dies die Kollegiaten nicht in eigener Regie bewältigen können
 - Öffentlichkeitsarbeit.
- Zu (4) Der wissenschaftliche Angestellte des integrierten Graduiertenkollegs wird bei Standardaufgaben durch eine studentische Hilfskraft unterstützt, die insbesondere auch die Graduierten bei der Selbstorganisation der Veranstaltungen des Kollegs unterstützen soll.

7 Berichte über abgeschlossene Transferbereiche

7.1 Allgemeine Angaben zum Transferprojekt T01

7.1.1 Titel: Strukturkatalog für miniaturisierte Trennprozesse

7.1.2 Projektleitung

Erstes Halbjahr:

Fleischer, Jürgen, Prof. Dr.-Ing.
geb. 07. 01. 1961, deutsch
Institut für Produktionstechnik (wbk)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12
76128 Karlsruhe
Telefon: 0721 / 608-44009
Telefax: 0721 / 608-45005
E-Mail: juergen.fleischer@kit.edu

Ab zweitem Halbjahr:

Schulze, Volker, Prof. Dr.-Ing. habil.
geb. 20.04.1965, deutsch
Institut für Produktionstechnik (wbk)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12
76128 Karlsruhe
Telefon: 0721/ 608-42440
Telefax: 0721/ 608-45004
E-Mail: volker.schulze@kit.edu

7.1.3 Kooperationspartner

Junghans microtec GmbH

Pannhorst, Johann, Dr.-Ing.,
geb. 10.06.1949
Unterbergenweg 10,
78655 Dunningen
Telefon: 07402 / 181-348
Telefax: 07402 / 181-400
E-Mail: johann.pannhorst@junghans-microtec.de
Mitarbeiter: 2.500

Freudenberg Dichtungs- und Schwingtechnik GmbH & Co. KG, Innovation Center

Müller, Uwe
geb. 25.11.1961
Höhnerweg 2-4,
69469 Weinheim
Telefon: 06201 / 80 6844
Telefax: 06201 / 88 6844
E-Mail: uwe.mueller@freudenberg-ds.de
Mitarbeiter: 8300 (Geschäftsfeld Dichtungs- und Schwingungstechnik, Gruppe 33 500)
Umsatz: 1 Mrd. € (Gruppe 5.1 Mrd. €)

Robert Bosch GmbH

HoP1/TEF13
Voigt, Thomas
geb. 05.01.1971

Bexbacher Straße 72
 66424 Homburg
 Telefon: 06841 / 18-1528
 Telefax.: 0711 / 811-506-1528
 E-Mail: thomas.voigt@de.bosch.com
 Mitarbeiter: 161.108 (Bereich Kraftfahrzeugtechnik)
 Umsatz: 27,2 Mrd. EUR (Bereich KFZ-technik)

Die Firma JUNGHANS microtec ist weltweit in den Bereichen Feinwerktechnik, Elektronik, Kunststoff- und Pyrotechnik als Anbieter von Dienstleistungen und Produkten tätig. Die Produktpalette reicht von medizinischen Anwendungen bis zur Konstruktion und Produktion von unterschiedlichen Zündwerken. In den meisten dieser Bereiche werden Mikrostrukturen benötigt, um vielseitige Funktionen sicher zu stellen wie bspw. feinste Kanalstrukturen zur Ausbildung des Kapillareffektes.

Freudenberg ist ein Familienunternehmen, das seinen Kunden technisch anspruchsvolle und beratungsinensive Produkte und Dienstleistungen anbietet. Mit 441 Gesellschaften in 55 Ländern und über seine Partnerschaften ist das Unternehmen auf allen wichtigen Märkten der Welt präsent.

Hauptabnehmer der Produkte von Freudenberg ist mit einem Anteil von 40 Prozent die Kraftfahrzeugindustrie (Erstausrüster). In diese Branche liefert Freudenberg insbesondere Dichtungen (Weltmarktführer), schwingungstechnische Komponenten, Filter, Trägermaterialien für Auto-Teppichböden, Motorraum- und Dachverkleidungen sowie Schmierstoffe und Trennmittel. Im Bereich der Dichtungen werden kleinste Strukturdetails an Formwerkzeugen benötigt, die für einen galvanischen Abformprozess verwendet werden.

Der Geschäftsbereich Dieselsysteme der Robert Bosch GmbH entwickelt, appliziert und fertigt in einem internationalen Verbund Dieselsysteme, die dazu beitragen, Fahrzeuge sauberer und sparsamer zu machen. Als weltweit führender Hersteller von Einspritzsystemen für Dieselmotoren bietet Bosch für jeden Kunden und jede Anwendung das passende System. Um den Kraftstoff möglichst fein zerstäubt in die Brennkammer einzuspritzen, werden sehr feine Bohrungen an den Einspritzdüsen benötigt.

7.2 Entwicklung des Transferprojekts

7.2.1 Bericht

Ausgangssituation und grundlegende Zielsetzung

Die gestiegenen Anforderungen an Oberflächengüte sowie Maßhaltigkeit von Bauteilen machen den Einsatz hochgenauer Präzisionswerkzeuge und hohes Prozesswissen notwendig. Mit hochpräzisen Maschinen, Werkzeugen und Prozessen entstehen kleinste, komplexe Strukturen und innovative Bauteile in der Optik, der Medizintechnik oder ganz allgemein in der Feinwerk- und Präzisionstechnik. Der Bereich der miniaturisierten Fertigung wurde im Bereich der Forschung durch z.B. den SFB 499 auf ein hohes Niveau gebracht. Dieser Technologievorsprung ist jedoch bisher nur an Forschungsinstituten und wenigen hoch spezialisierten Firmen komprimiert. Besonders das Fertigen von hochpräzisen mikrostrukturierten Freiformflächen, die Mikrobearbeitung von Sondermaterialien und das Vordringen in kleinste Strukturgrößen sind Herausforderungen, denen sich die Industrie stellen muss, um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können. Wichtig ist dabei für ein Industrieunternehmen, dass die verwendete Technologie wirtschaftlich ist und mit der grundsätzlich vorhandenen Kompetenz und Anforderung des Unternehmens harmoniert. Hier bietet sich die Mikrozerspanung an, da sie auf vorhandenem Prozesswissen aus dem weit verbreiteten Feld der Makrozerspanung aufbauen kann und so das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand für das Unternehmen als hoch anzusehen ist.

Im vorliegenden Transferprojekt wurden drei Firmen eingebunden, die ihre Problemstellungen an die Hochschule weitergeben. Diese fand Lösungen und stellte diese Lösungen – für alle Projektpartner zugänglich – online zur Verfügung. Ziel des Transferprojektes war es, einen internet-basierten Katalog für die drei teilnehmenden Firmen aufzubauen, wobei jeder Firma eine spezielle Bearbeitungsproblematik gelöst wird, aber auch die bisherigen Ergebnisse aus dem SFB 499 der Mikrobearbeitungsverfahren Fräsen, Laserablation und Funkenerosion zur Verfügung stellt. Dieser Katalog basiert auf dem in den letzten beiden Förderperioden in den Teilprojekten B2, B4, B5, B6 und Z3 aufgebauten Strukturkatalog, der um die spezifischen Problemstellungen der beteiligten Firmen erweitert wurde. Damit wurde ein Beitrag zur Verbreitung des Know-hows im Bereich der Mikro-Fertigungstechnik geleistet bei gleichzeitiger Überprüfung der Tauglichkeit für industrielle Großserienprozesse.

AP 1 Abstimmung mit den Partnern, Erarbeitung der Arbeitspläne und Zieldefinition

In AP1 wurden die Randbedingungen und Verwendungszwecke der jeweiligen Industriepartner aufgenommen. Daraus wurde ein Pflichtenheft für die Überarbeitung des Strukturkatalogs sowie ein Arbeitsplan erstellt, der den Anforderungen der Partner entspricht.

Es erfolgte in AP1 eine Abstimmung der Anforderungen an den im SFB 499 grundlegend entwickelten Strukturkatalog, woraus ein Pflichtenheft definiert wurde. Diese sind im Folgenden in Kurzfassung dargelegt:

- Erweiterung der Datenbasis unter anderem durch zu hinterlegende Kennwerte
- Grundlegende Suchroutinen zur strukturierten Handhabung der großen Datenmengen bzw. Bearbeitungsfälle und Unterstützung der Unternehmen bei der Lösungsfindung
- Weltweite Verfügbarkeit für die Unternehmen
- Sicherstellung der Wahrung von Betriebswissen

Das Unternehmen Freudenberg erwartet, dass seine Kunden zunehmend Dichtungskonzepte realisieren, für die Dichtungen mit 0,75 bis 1 mm Innendurchmesser benötigt werden. Es ist unerlässlich Mikrofertigungsverfahren in die Produktion zu integrieren, um innovative Produkte am Markt platzieren zu können.

Im Zentrum der Bemühungen steht für Freudenberg DS die Erlangung der Fertigungstechnologie zur Umsetzung eines miniaturisierten Abformwerkzeuges, das die Vulkanisation eines Mikroradialwellendichtrings ermöglichen soll. Hier fließt vor allem das erarbeitete Wissen der TP B2, Z3 und B4 ein. Bei der Fertigung sollen, neben der Fertigungsdokumentation, Randdaten wie der zeitliche Aufwand einzelner Prozessschritte (Rüstzeiten, CAM-Programmierung), benötigte Messtechnik und mögliche Prozessbeeinflussung durch die Gegebenheiten der Maschinenhalle (Staub, Schwingungen, Temperatur) notiert werden. Der Transfer von Wissen sollte innerhalb der Fertigung erfolgen, so dass der Firmenpartner den Nutzen der Verfahren an firmeneigenen Konstruktionen messen kann.

Die im Antrag beschriebene Bearbeitung von Graphit mit dazugehöriger Werkzeugauswahl und Parametervariation wurde angegangen. Jedoch zeigte sich in der in AP1 erfolgten Fertigungsbetrachtung, dass mit den durch den SFB 499 stark verschobenen Prozessgrenzen eine direkte Fertigung des Formwerkzeuges möglich ist. Dies ist mit einem Einsparpotenzial verbunden, welches das Unternehmen Freudenberg heben möchte. Als Demonstrator wurde definiert, dass ein Abformwerkzeug für den weltweit kleinsten Radialwellendichtring entwickelt und umgesetzt werden soll. Als Werkstoff für das Formwerkzeug wurde X90CrMoV18 mit 50 HRC festgelegt. Zusätzlich wurde für die Fertigung eines Werkzeugs zur abformenden Herstellung eines Dichtrings mit tribologisch aktiver Mikrostruktur der Werkstoff Messing (MS58) festgelegt. Der im Antrag beschriebenen Qualitätskontrolle, sowie der Abformung und Validierung der Funktionsfähigkeit, kommt Freudenberg DS nach. Die eingesetzten Ergebnisse entstammen grundlegend den Teilprojekten B2, Z3 und B4.

Für das Unternehmen BOSCH wurden Bauteile des Dieseleinspritzsystems aus dem hochlegierten Stahl X40 CrMoV5-1 (1.2344) definiert. Ziel war es, Bohrungen mit 0,2 bis 0,6 mm Durchmesser und einem Aspektverhältnis von bis zu zwölf zu generieren. Bisher werden diese Löcher mittels Erosion erzeugt. Bosch Diesel Systems strebt eine Substitution durch kostengünstigeres spanendes Mikrobohren an. Hierzu sind Untersuchungen notwendig, die das Wissen um Prozessparameter (Werkzeug, Drehzahl, Vorschub, usw.) und Ergebnisparameter (Rauheit, Positionierungsgenauigkeit, Prozessfähigkeitsindex, usw.) erarbeiten. Die erzielten Ergebnisse wurden mit aktuellen Ergebnissen des Erodierens verglichen und eine Umsetzbarkeit abgeschätzt. Um den Prozess in der Serie anwendbar zu machen, sollte der Maschinenfähigkeitsindex nicht schlechter als 1,33 sein. Nach Abstimmung werden zunächst prozessrelevante Einflussparameter identifiziert und gewichtet. Aus den priorisierten Parametern wurde ein Versuchsplan abgeleitet. Die eingesetzten Ergebnisse entstammen grundlegend den Teilprojekten B2 und Z3.

Die Zielsetzung des Unternehmens Junghans bestand darin, das technologische Wissen zu erlangen, um die Größe der Mechanik bzw. einer selbstaktivierenden Batterie eines Zündkopfes zu halbieren. Hierfür wurden die Fertigungsgrenzen benötigt. Für Junghans erfolgte die Festlegung auf die bereits im Projekt definierten Materialien. Zudem wurde ein Testbauteil definiert, durch welches ein Vergleich zwischen den Verfahren des SFB 499 ermöglicht wird. Die eingesetzten Ergebnisse entstammen grundlegend den Teilprojekten B2, B4, B5, B6 und Z3.

Die strukturierten Arbeitspläne der Partner finden sich jeweils zu Beginn der Arbeitspakete 3.1 bis 3.3.

AP 2 und 4 Programmiertechnische Anpassung und Prüfung des Strukturkatalogs sowie einpflegen der beobachteten Daten und abgeleiteten Regeln

Das Ziel von AP2 bestand darin, den Strukturkatalog so anzupassen, dass er den maximalen Nutzen für die Industriepartner bringt. Das Institut für Produktionstechnik stellte die aktualisierte Version des Strukturkatalogs den Industrieunternehmen vor. Dabei wurden neue Verknüpfungen zwischen den einzelnen Tabellen geschaffen, sowie neue Regelbezüge, die durch die Einarbeitung von neuen Kennwerten, wie bspw. der Prozessfähigkeit cpk, entstehen. Als übergeordnetes Ziel der im Folgenden dargelegten Arbeiten, stand das Erzielen einer wirtschaftlichen Serienfertigung im Fokus.

Das Ziel von AP4 bestand im Einpflegen der anhand der vereinbarten Bauteile erarbeiteten Daten und Regeln in den Strukturkatalog sowie der Einführung bei den Partnern. Da die Bearbeitung von AP 2 und 4 parallel erfolgte und stark verknüpft ist, erfolgt deren Darstellung kumuliert.

Die Anforderungspunkte aus dem erarbeiteten Pflichtenheft wurden, wie im Folgenden dargestellt, programmiertechnisch in den Strukturkatalog eingebunden und umgesetzt:

Erweiterung der Datenbasis:

Im Strukturkatalog wurde die Möglichkeit geschaffen zusätzlich zu den Werkzeugen Geometriedaten und Grafiken zu hinterlegen, um das Prozessverständnis zu erweitern. Eine Freitexteingabe unterstützt beim Hinzufügen weiterer Informationen. Für die Materialbasis wurde es ermöglicht, die chemischen und mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe darzulegen. Diese werden bei der Eingabe eines neuen Werkstoffs abgefragt und können erweitert werden. Weiterhin wurde die Eingabe derart flexibel gestaltet, dass die festgelegten Kennwerte jederzeit erweitert werden können. (Beispiele siehe Abbildung 1)



Abbildung 1: Strukturkatalog Eingabemasken für Werkzeuge, Material und Fertigungsbeispiele

Erweiterte Suchroutinen:

Für die Umsetzung der Suchroutinen waren aufwendige Verknüpfungen der Tabellenwerte innerhalb der Datenbank von Nöten. Diese ermöglichen es, eine Suche nach Werkzeugen und Materialien anhand von Eigenschaften durchzuführen. Zudem kann eine Suche nach Materialien, Werkzeugen und Bedingungen bezüglich der Fertigung von Geometrien und eine Suche nach Ergebnissen tatsächlich gefertigter Werkstücke anhand von Vorgabewerten durchgeführt werden. Auf Basis solcher Fertigbarkeitsanalysen können die Unternehmen anhand von spezifischen Merkmalen definierter Basisgeometrien deren Umsetzbarkeit prüfen sowie geeignete Verfahren und bereits erfolgte Fertigungsbeispiele ermitteln. Hierbei erfolgt die Suche anhand von definierten Größen wie beispielsweise der Breite einer negativen Struktur, einem zu fertigenden Aspektverhältnis oder einem Wandwinkel. (Abbildung 2)

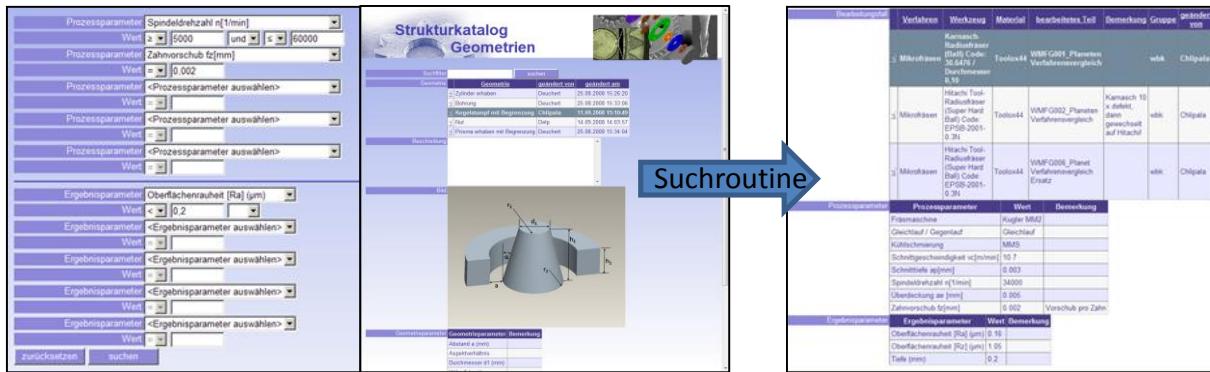


Abbildung 2: Strukturkatalog mit erweiterten Suchroutinen (links Suchmasken, rechts ergebende Bearbeitungsfälle)

Weltweite Verfügbarkeit:

Der Strukturkatalog wurde über den Webauftritt des SFB 499 per Internet zugänglich gemacht und ist somit weltweit verfügbar. (www.sfb499.de, Reiter „Informationssysteme“, Stand 11/2011)

Wahrung von Betriebswissen:

Als wichtigstes Kriterium wurde von den Unternehmen die Wahrung von Betriebswissen angesehen. Die Forderung bestand hier darin, dass Wissen, das speziell in den Firmen die Kernkompetenzen darstellt, nicht öffentlich zugänglich sein darf. Hierfür wurde eine Gruppenzuordnung geschaffen. Für jeden Bearbeitungsfall kann der Bearbeiter beim Eintragen festlegen, welcher Gruppe das Lesen des Datensatzes vorbehalten ist oder ob der Datensatz von allen Teilnehmern eingesehen werden darf (Gruppe „public“). Datensätze anderer Gruppen als der freigegebenen werden bei der Bearbeitung von Benutzereingaben für einen Benutzer ohne Rechte an dieser Gruppe nicht berücksichtigt und sind für diesen nicht existent.

Mit den Partnern erfolgte das Einbinden der Ergebnisse in den Strukturkatalog. Ebenso wurden Änderungswünsche abgefragt und parallel zur Fertigungsumsetzung eingebunden. Das Einbinden der Regeln war programmietechnisch nötig um die Suchroutinen wie oben beschrieben sinnvoll umzusetzen. Im speziellen spiegeln sie sich in den Technologiegrenzen wider, die sich aus AP 3.3 ergaben und für die Verfahren aus B2, Z3, B4 und B6 ermittelt wurden. Als Basisgrößen wurden die Regeln für die kleinste fertigbare Strukturgröße, maximale Härte, elektrische Leitfähigkeit und maximal erzielbares Aspektverhältnis hinterlegt. Somit wurde eine vollständig verifizierte, web-basierte Datenbank den Unternehmen zur Verfügung gestellt.

AP3 Experimentelle Durchführung

AP 3.1 Mikrobearbeitung Graphit und Stahl (Freudenberg DS)

Der Arbeitsschwerpunkt für die Kooperation zwischen Freudenberg DS und dem Institut für Produktions-technik war die Entwicklung einer Abformstrategie für skalierte Dichtungsbauteile. Zunächst wurde eine Lösung mit graphitischen Werkzeugen analysiert und Versuche zur Fertigung in Graphit durchgeführt. Es zeigte sich nach der Parametervariation, dass die ursprüngliche Planung mit graphitischen Formelektroden die Formwerkzeuge durch Senkerosion zu erarbeiten aufgrund der nötigen Geometriefreihheiten mit Hinterschnitten für das Unternehmen nicht zielführend ist. Zudem sind feinste Strukturen mit dem passenden Know-how besser direktstrukturierend in Stahl darstellbar. Weiter war es mit den im SFB 499 erarbeiteten Fortschritten möglich, die Skalierung der Formen direktstrukturierend umzusetzen und so nach Abschätzung des Unternehmens Freudenberg erheblich produktiver den Formenbau zu bewerkstelligen. Umgesetzt wurde daher die Fertigung der skalierten Formeinsätze direktstrukturierend in X90CrMoV18. Der Arbeitsablauf war gemäß dem folgenden Organigramm gegliedert, weshalb die für Graphit bereits durchgeführte Werkzeugbetrachtung und Parametervariation nicht weitergeführt wurde, sondern zusätzlich eine Variation in X90 CrMoV18 erfolgte. (Abbildung 3)

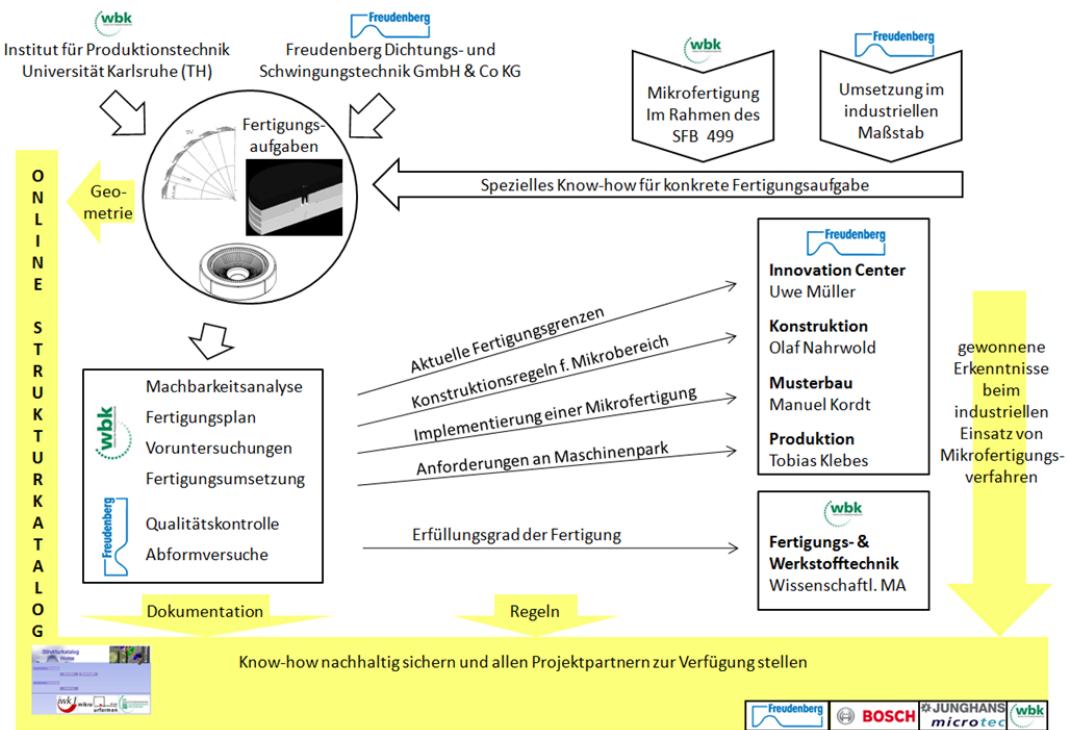


Abbildung 3: Arbeitsplanung Teilstruktur Freudenberg FST

Auf der Entscheiderebene wurden die Fertigungsaufgaben und deren Randbedingungen festgelegt. Durch die Dokumentation im Strukturkatalog wurden die Änderungen nachvollziehbar dokumentiert. Die Projektarbeit verlief in zwei Phasen anhand der definierten Demonstratoren „skalierter Radialwellendichtring“ und „Tribosstruktur“.

In Vorversuchen wurde das Potenzial der Formeinsatzherstellung durch Mikrofunkenerosion ermittelt. Hierzu sollten Elektroden aus hochdichtem Graphit verwendet werden. Zur Untersuchung des Potenzials wurde eine Graphitelektrode für die Unterplatte des Bauteils hergestellt. Es wurden unterschiedliche Werkzeuge zur Graphitbearbeitung eingesetzt und jeweils mit Parametervariation optimierte Bearbeitungsparameter ermittelt. Die varierten Parameter und das sich ergebende Elektrodenbauteil sind in Abbildung 4 dargestellt.

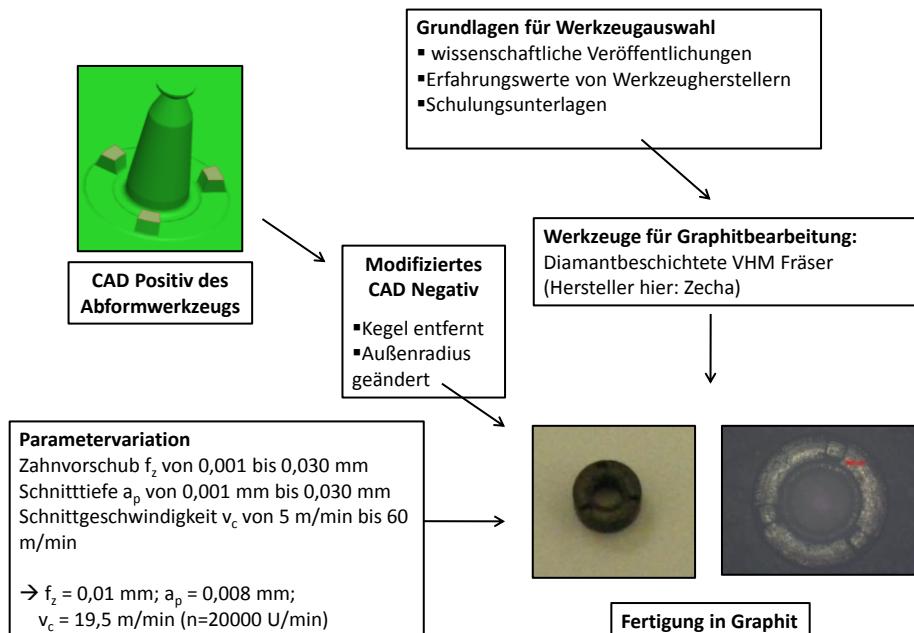


Abbildung 4: Parametervariation in Graphit mit Demonstratorteil des Formelements eines Radialwellendichtringwerkzeuges

Die Bearbeitung des Demonstrators eines Abformwerkzeuges eines miniaturisierten Radialwellendichtringes startete mit der Konstruktion im Prototypenstatus des Projektpartners Freudenberg DS. Die Konstruktion wurde hinsichtlich ihrer Fertigungsgerechtigkeit sowie der fertigungstechnischen Herausforderungen durch das Institut für Produktionstechnik bewertet. In Zusammenarbeit mit Freudenberg DS erfolgte eine mikrospezifische, fertigungsgerechte Anpassung der Konstruktion. Im Anschluss wurde am Institut für Produktionstechnik ein Fertigungsplan ausgearbeitet. CAM Programme wurden erstellt und kritische Konturen in gut zerspanbaren Materialien vorgefertigt. Im durch Freudenberg DS gelieferten Werkstückmaterial wurde eine Parametervariation durchgeführt um die bestmöglichen Bearbeitungsparameter zu detektieren. Hierfür wurden die Schnittgeschwindigkeiten im Bereich von 7 bis 60 m/min, der Zahnvorschub f_z von 2 bis 20 μm und die seitliche Überdeckung mit 30 und 50% variiert. Die durchgeführte Variation der Zustellung a_e von 2, 4 und 8 μm zeigte kaum Einfluss auf die Rauheit und wurde somit vernachlässigt. Die optimalen Parameter nach Abbildung 5 fanden Verwendung.

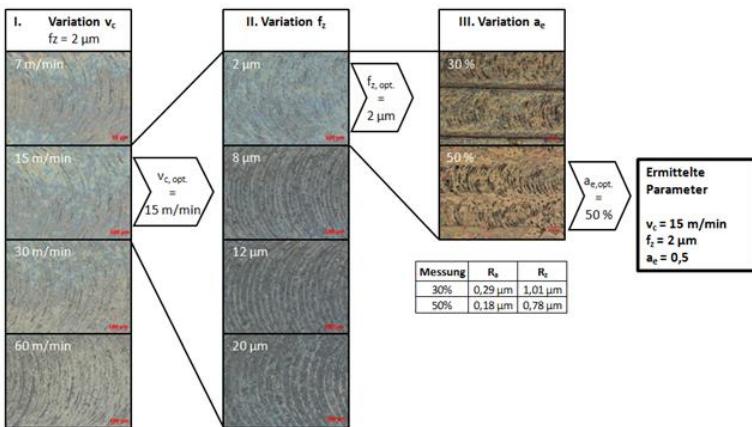


Abbildung 5: Parametervariation (links) und komplexes Abformwerkzeug des miniaturisierten Radialwellendichtringes (rechts)

Nachdem erste Abformversuche positiv ausfielen, wurde die Endfertigung des Abformwerkzeugs in Werkzeugstahl durchgeführt. In Versuchen zur Dichteigenschaft des skalierten Dichtrings wurden die Erwartungen hinsichtlich Anlaufmoment und Standzeit übererfüllt. Daher wurde im Weiteren vom Einbringen eines Aluminiumkerns in den Dichtring abgesehen. Die Abformwerkzeuge in Werkzeugstahl wurden im Hause Freudenberg in Verschleißversuchen getestet. Zudem wurde gemeinsam mit dem Partner das Know-how in den Firmeneigenen Werkzeugbau transferiert und dort ein geometrisch ähnliches Werkzeug gleichen Durchmessers mit nochmals verkürztem Bauraum umgesetzt und ebenfalls abgeformt.

Die abgeformten prototypischen Dichtringe wurden in einem eigens konstruierten Prüfstand im Hause Freudenberg getestet. Der Dichtring wurde 1800 h bei einer Umdrehungszahl von 6000 min⁻¹ beansprucht. Nach 1800 h konnte lichtmikroskopisch kein Verschleiß festgestellt werden. Somit entstand im Rahmen des Transferprojektes T1 der weltkleinste funktionsfähige Radialwellendichtring. (Abbildung 7)



Abbildung 7: Miniaturisierter Radialwellendichtring

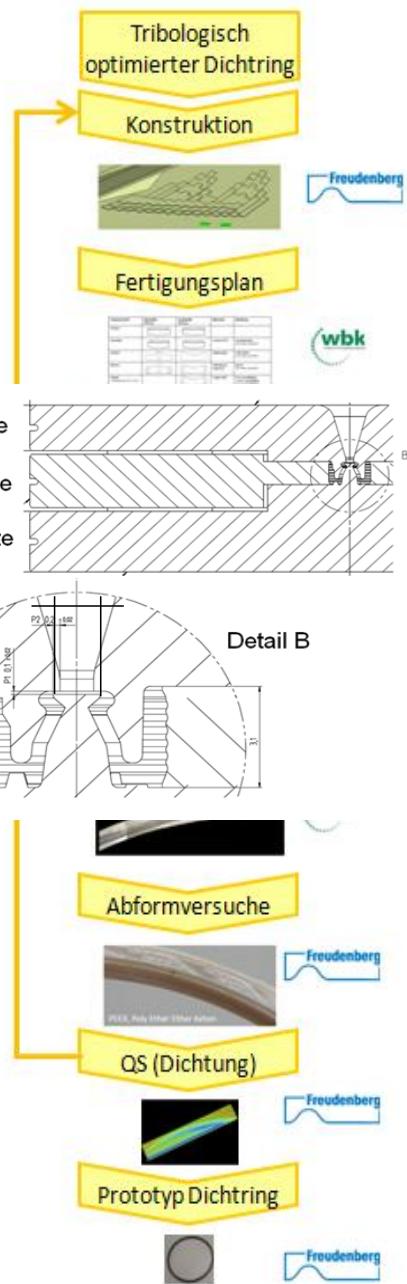


Abbildung 6: Detailplanung der Arbeitsplanung des Demonstrators zur Detektion kleinster Fertig- und Abformbarer Strukturdetails (Tribologisch optimierter Dichtring)

In einem weiteren Vorgehen wurde ermittelt, wie klein Strukturen gefertigt und mit den typischen Abformtechnologien des Unternehmens darstellbar sind. Als Hintergrund dienen Bestrebungen, das Anlaufmoment sowie das Umströmungsverhalten von Dichtringen im Automotive-Bereich zu beeinflussen. Da meist eine Relativbewegung zwischen Fluid und Dichtung vorhanden ist, entsteht Reibung. Durch Adaption von in der Natur bewährten Formen, ergab sich ein Höhenprofil, das günstig in Bezug auf seine Strömungseigenschaften ist. Im Rahmen des Transferprojekts wurde die durch Freudenberg DS erstellte Konstruktion hinsichtlich ihrer Fertigbarkeit in enger Absprache mit dem Institut für Produktionstechnik angepasst. Das konstruierte Abformwerkzeug hat auf seinem Durchmesser von 39 mm 24 gleichmäßig verteilte kommaförmige Strukturen. Diese sind in Stufenform mit Stufenhöhen von 2 µm ausgeführt. Die gesamte Strukturhöhe beträgt 18 µm.

Bei der Erstellung des Fertigungsplans musste auf die sich daraus ergebenden Herausforderungen eingegangen werden. Besonderes Augenmerk musste auf Fehlerquellen wie beispielsweise Werkstückverkippung gelegt werden, da diese das Einhalten der Toleranzen unmöglich machten. (Abbildung 8)



Abbildung 8: Fertigungsplan des Formwerkzeuges der Tribostruktur (links), abgeformter Dichtring (PEEK) mit Tribostruktur (rechts)

Die Probefertigung erfolgte testweise in Messing. Die zweigeteilte Form stellt durch die Kombination der großen Ausdehnung des Abformwerkzeugs mit den geringen Stufenhöhen hohe Anforderungen an die Maschinengenauigkeit. Die Güte der Struktur wurde in der Qualitätssicherung der Firma Freudenberg DS validiert. Neben der Fertigung des Abformwerkzeugs erfolgte auch die direktstrukturierende Fertigung der Feinststruktur in PEEK am Institut für Produktionstechnik. Im Standzeitversuch wurde nachgewiesen, dass die Prototypen des Dichtrings bei eingegrenzten Drehzahl- und Druckgrößen eine verminderte Reibung ergeben. Somit wurde weiterer Forschungsbedarf des Unternehmens in diesem Feld diagnostiziert, der angegangen wird. Abschließend erfolgte der Transfer der Parameter und der Vorgehensweise in den Formenbau bei Freudenberg, wo die Fertigung des Abformwerkzeuges in Eigenregie in leicht erhöhter Skalierung erfolgte.

Zur Darlegung der Prozesssicherheit erfolgte die Fertigung der Maße des Abformwerkzeuginnenelementes in einer vereinfachten Struktur, die auf das Tiefenmaß und den Durchmesser beschränkt wurde. Diese Struktur wurde 50 Mal mit den für X90CrMoV18 detektierten Parametern mit einer Prozessfähigkeit von 1,67 bzw. 1,63 umgesetzt.

AP 3.2 Mikrobohren in gehärtetem Stahl

Mit dem Projektpartner Bosch Diesel Systems, vertreten durch das Werk Homburg, wird eine zweigleisige Arbeitsweise vereinbart. Zum einen wird an Projekten des Musterbaus das Verbesserungspotenzial des Mikrobohrrens harter Werkstoffe untersucht. Diese Arbeit wird im Werk Homburg durch Mitarbeiter von Bosch gemeinsam mit Mitarbeitern des Instituts für Produktionstechnik durchgeführt. Zum anderen wurde Grundlagenwissen zum Prozessverständnis am Institut für Produktionstechnik in Absprache mit dem Unternehmen erarbeitet und am Ende die Anwendbarkeit im Unternehmen ermittelt. (Abbildung 9)

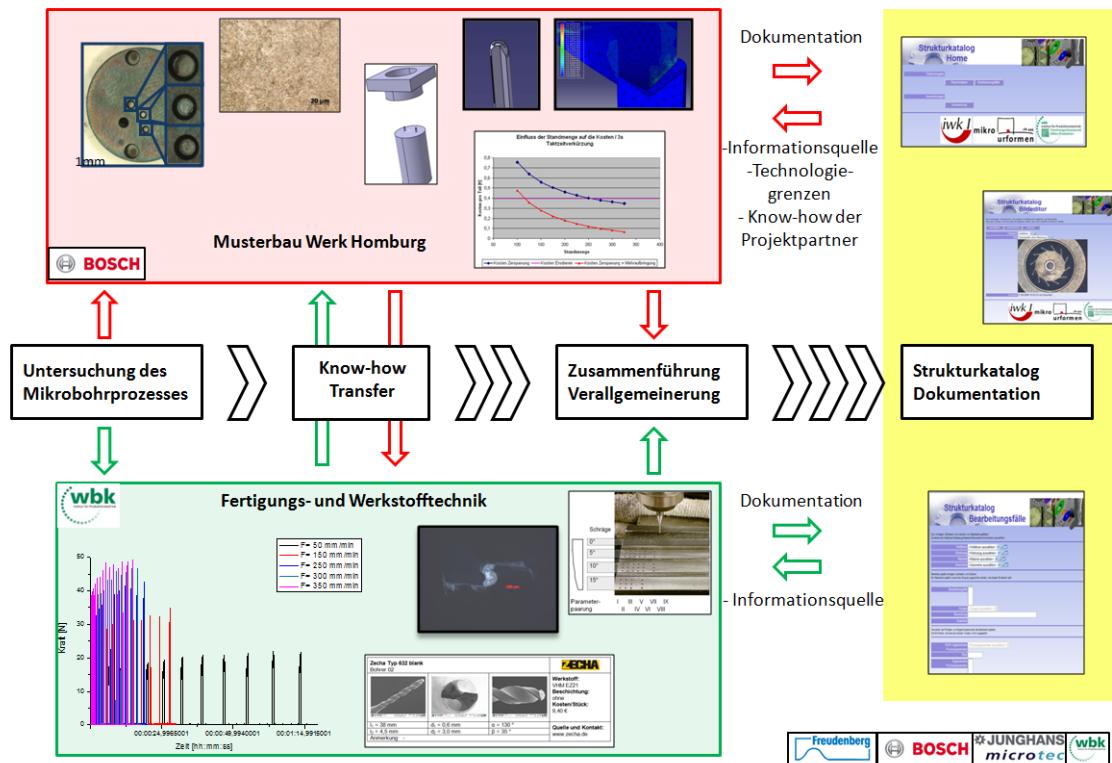


Abbildung 9: Arbeitsplanung Teilstruktur Bosch

Bei Kleinstbohrungen in gehärteten Stahl (Durchmesser 200 µm) wurde die Umstellung eines elektrochemischen Bohrverfahrens auf eine spanende Bearbeitung überprüft. Als Demonstrator diente die Drosselplatte eines Einspritzventils. (Abbildung 10) Pro Bauteil wurden je drei Durchgangsbohrungen eingebracht. In einem ersten Arbeitsschritt wurde der Bohrprozess auf die wichtigsten Einfluss- und Einstellgrößen bei der Zerspanung untersucht. Hierzu erfolgte eine Prozessanalyse nach der Ishikawa Methode.

Im Anschluss folgte mittels Vorversuchen eine Überprüfung der Realisierbarkeit einer zerspanenden Bearbeitung. Neben der Machbarkeit war es das Ziel, die besten Werkzeuge auszuwählen und einen geeigneten Parametersatz als Ausgangspunkt für die nachfolgenden Standmengenversuche festzulegen.

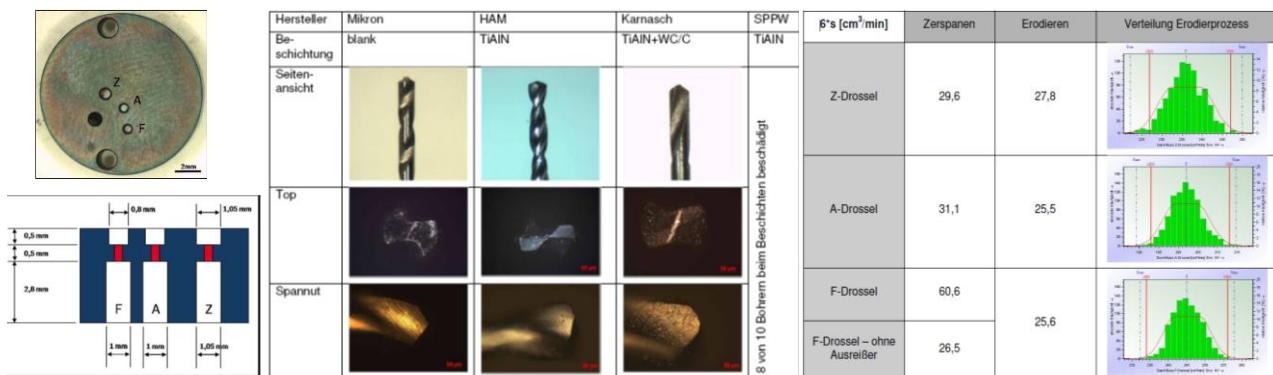


Abbildung 10: Demonstrator Drosselplatte (links), Werkzeugvariation Ø 200 µm (mitte), Vergleich Zerspanen und Erodieren anhand Durchflussmessung (rechts)

Standmengenversuche nach einem faktoriellen Versuchsplan dienten daraufhin der Ermittlung optimaler Parameter und der Erweiterung des Prozessverständnisses. Das beste Ergebnis von 164 Bohrungen konnte beim Vorschub von 2 µm/U und der Schnittgeschwindigkeit 30 m/min (47.000 1/min) erreicht werden. Die Bohrungsgüte wurde bei Bosch durch eine Durchflussmessung sichergestellt, die in einem späteren Serienprozess als Werkzeug der Qualitätssicherung eingesetzt wird. Die Maschinenfähigkeiten wurden für die Positionen von Bohrungsein- und Austritt ermittelt und ergaben sich für eine zulässige Positionsabweichung von 10 µm zum Bohrungseingang: $C_{mk}=1,55$ und Bohrungsaustritt: $C_{mk}=1,34$. Im Vergleich des Erodierprozesses mit dem Zerspanprozess zeigt sich, dass eine Standardabweichung in der gleichen Größenordnung wie im Serienprozess (Erodieren) erreicht werden konnte. Die Bearbeitungszeit ließ sich von 13 Sekunden pro erodierend hergestellter Bohrung auf unter 2 Sekunden pro zerspanend hergestellter Bohrung senken.

Die Durchflussmessung zeigte zudem eine höhere Konstanz und somit eine bessere Reproduzierbarkeit der zerspanend hergestellten Bohrungen.

Zusätzlich wurde die Möglichkeit betrachtet die Nebenzeiten möglichst gering zu halten. Hierzu wurden verschiedene Konzepte betrachtet und das am besten bewertete Konzept umgesetzt. Die Nebenzeiten wurden mit dem Projektpartner abgeschätzt und per Vakuumspannen konstruiert. Die Spannzeit ist dadurch auf < 1 Sekunde möglich. Das mechanische Konzept wurde für die Versuche umgesetzt. (Abbildung 11)

	Magnetisch	Mechanisch	Pneumatisch
Automatisierbarkeit	3	1	3
Kosten	1	3	2
Spannungsprozess	1	3	2
Σ	5	7	7
Mögl. Probleme	Restmagnetisierung → Späne	-	Ausreichende Befestigung



Abbildung 11: Bewertungstabelle Spannsystemkonzepte (oben) und Umsetzung (unten)

Ausgehend von der Ventildrossel wurde ein weiterer Demonstrator umgesetzt, an dem der Mikrobohrprozess exemplarisch an Hand eines Hochdruckspeichers (Rails) untersucht wurde. (Abbildung 12) Das charakteristische Merkmal ist eine Bohrung des Durchmessers 0,6 mm bei einer Tiefe von 7,2 mm (Aspektverhältnis 12). Aufgrund der Bohrsituation in großer Tiefe war zusätzlich eine große Gesamtlänge des Werkzeugs nötig.

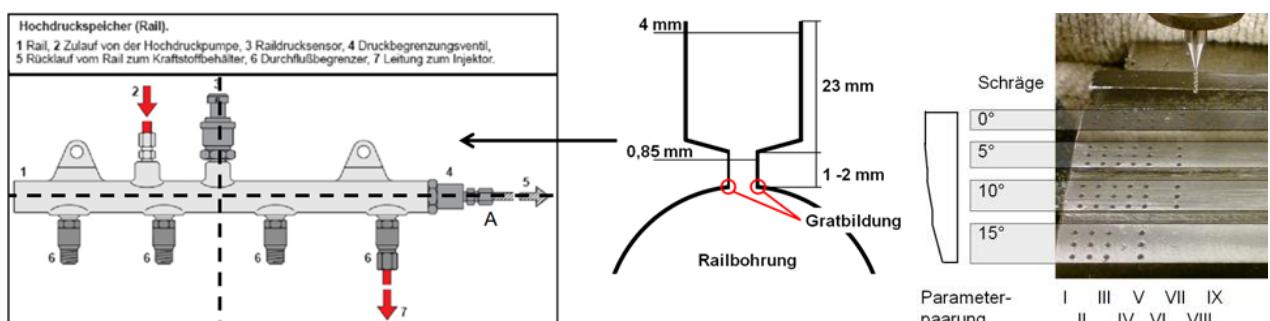


Abbildung 12: Demonstrator "Hochdruck Rail mit Injektionsbohrungen" (links), Demonstrator zur Ermittlung der Prozessparameter beim anbohren schräger Flächen (rechts)

Das Sammeln aller Einflussparameter auf den skalierten Prozess wurde nach der 5M-Methode durchgeführt. Durch das Aufstellen einer Einflussmatrix wurden die Parameter in Beziehung zueinander gesetzt. Daraus erfolgte eine Priorisierung in der diejenigen Prozessparameter abgeleitet wurden, die auf Zielgrößen wie Rauheit, Position oder Prozesssicherheit den größten Einfluss haben. Zur Optimierung hinsichtlich der geforderten Zielgrößen wurde ein Versuchsplan abgeleitet. (Abbildung 13)

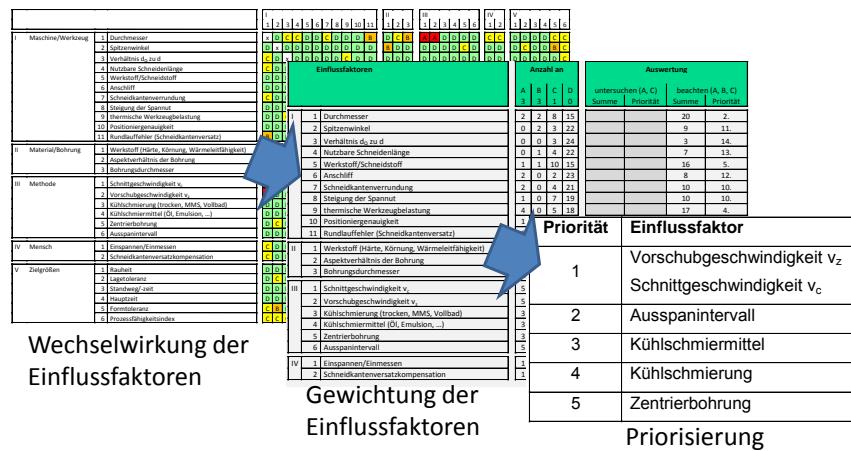


Abbildung 13: Priorisierung der Einflussfaktoren

Es wurde nach dem erarbeiteten Versuchsplan eine Parametervariation durchgeführt, um die idealen Schnittbedingungen zu ermitteln. Hierfür erfolgte eine Variation der Schnittgeschwindigkeit in 7 Stufen von 15 m/min bis 115 m/min. Der Vorschub pro Umdrehung wurde in 3 μm Schritten von 3 μm bis 15 μm variiert. Mit den als ideal ermittelten Parametern wurden die Standwege der 14 verschiedenen Werkzeuge und Be- schichtungen ermittelt. (Abbildung 14 und Abbildung 15)

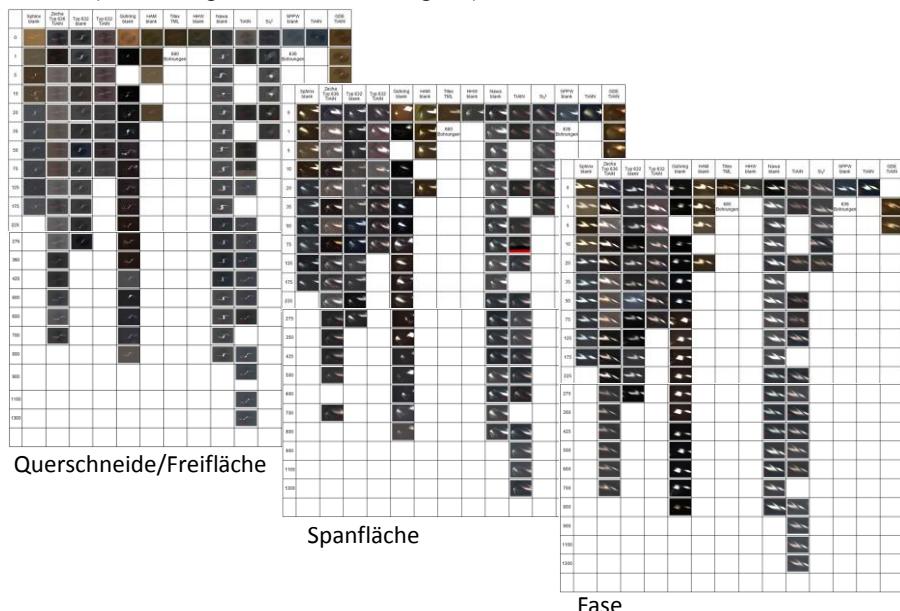


Abbildung 14: Verschleißdokumentation der Standzeitversuche über 14 Werkzeuge, Bildtabelle mit jeweils Aufnahmen von Querschneide, Spanfläche und Fase über dem Standweg

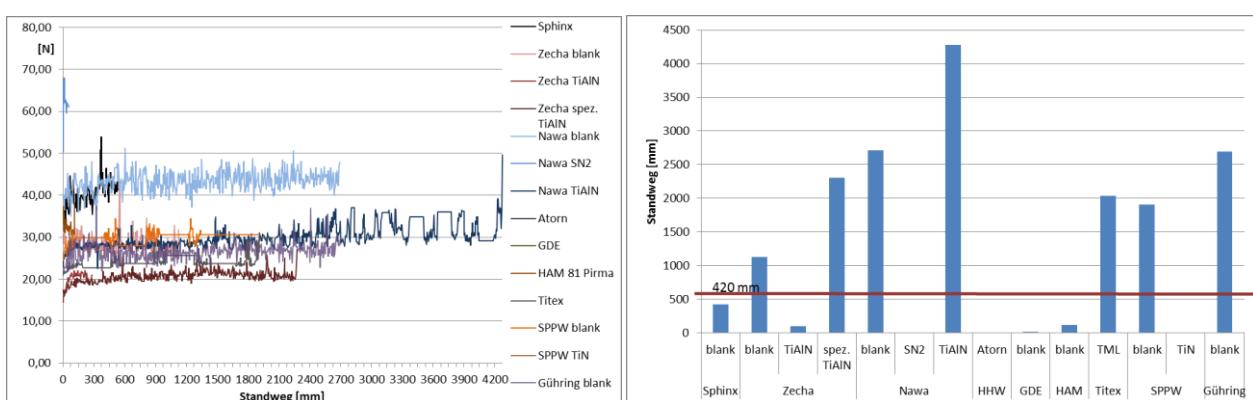


Abbildung 15: Vorschubkraft über Standweg der Werkzeuge (links); Ergebnende Standwege der Werkzeuge (rechts)

Die Fertigung der Bohrungen des Demonstrators Ventildrossel wurde in Standzeitversuchen mit 14 hinsichtlich Beschichtung und Anschliff unterschiedlichen Bohrwerkzeugen durchgeführt. Bei den Bohrerherstellern Zecha und Nawa ist ein Absinken der Vorschubkraft durch die Beschichtung TiAlN zu beobachten, wohingegen andere Werkzeuge mit Beschichtung höhere Vorschubkräfte aufwiesen. Hierdurch haben z.B. die Werkzeuge von Zecha durchschnittlich einen geringeren Standweg mit Beschichtung erreicht, wobei die Werkzeuge des Herstellers Nawa deutlich längere Standwege realisierten. Es war ersichtlich, dass eine Beschichtung nicht grundsätzlich als Verbesserung angesehen werden kann. Eine mögliche Ursache liegt in der Beschichtungstechnologie des jeweiligen Herstellers. Die Schichtdicke und die Methode mit der die Beschichtungen aufgebracht waren, waren bestimmt für die sich ergebende Schneidkantenverrundung.

Werkzeug	Klenk						Gühring					
	26,7 m/min			160,2 m/min			26,7 m/min			160,2 m/min		
v_c	1 μm	5 μm	20 μm	1 μm	5 μm	20 μm	1 μm	5 μm	20 μm	1 μm	5 μm	20 μm
Lichtmikroskop												
konfokales Mikroskop												
Grat-höhe	14,7 μm	26,7 μm	33,5 μm	(36,1 μm)	22,3 μm	10,5 μm	12,2 μm	32,8 μm	23,5 μm	14,7 μm	20,1 μm	14,6 μm

Abbildung 16: Reduktion der Gratbildung

Eine weitere Zielsetzung war die Reduktion der Grathöhe auf der Bohreraustrittsseite des Rails. Hierzu wurden, um den direkten Bezug zum realen Bauteil zu haben, 50 Rails mit je 6 zu setzenden Bohrungen als Demonstrator verwendet. Es erfolgte eine Variation der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubs pro Umdrehung. Die Untersuchung erfolgte mit den Werkzeugen, die hinsichtlich des Standweges am besten abgeschnitten hatten. Die Gratbildung konnte durch die Parametervariationen vom Ausgangszustand der Untersuchung, die im Mittel ca. 25 μm betrug, auf ca. 10 μm mehr als halbiert werden. (Abbildung 16)

Zur Ermittlung des Einflusses beim Anbohren schräger Flächen, wie sie bei Rail-Einspritzsystemen der Firma Bosch vorkommen, wurden die Abdrängungen in Abhängigkeit von Vorschub pro Umdrehung (4 μm , 12 μm und 20 μm) und Schnittgeschwindigkeit (15 m/min, 30 m/min, 90 m/min) untersucht. Der Winkel zwischen Werkzeug und Werkstückoberfläche wurde in 4 Schritten zwischen 0° und 15° variiert. Werden Vorschub pro Umdrehung gering und Schnittgeschwindigkeit hoch gewählt, wird der Bohrungsverlauf unabhängig von der Neigung der Fläche verringert. Beim Bohren auf schrägen Flächen muss der Anbohrvorgang parameterseitig derart abgestimmt werden, dass bis zum Volleingriff des Bohrers der Vorschub f gering und die Schnittgeschwindigkeit v_c hoch gewählt wird. Die Bohrung verläuft stets in Richtung der Flächenneigung. Beim Anbohren entsteht eine höhere Werkzeugbelastung durch Abdrängung bei Erhöhung der Flächenneigung. Es wurde gezeigt, dass durch die oben vorgeschlagene Strategie diese Belastung verringert werden kann. (Abbildung 17) Werkzeugbrüche werden mit der Parameterpaarung $f = 12 \mu\text{m}/\text{U}$ bei $v_c = 90 \text{ m/min}$ bei allen Flächenneigungen beobachtet. Ebenso erfolgte der Werkzeugbruch bei einer Flächenneigung von 15° und 20 $\mu\text{m}/\text{U}$. Bei 90 m/min ist nur die Bohrung von 0° vorhanden. Dies jedoch bei bester erzielter Genauigkeit.

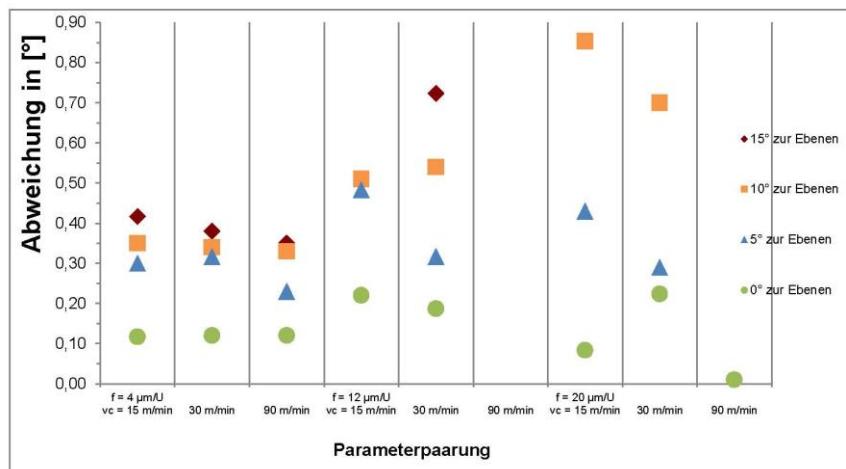


Abbildung 17: Ergebnis der Untersuchung zum Anbohren schräger Flächen

AP 3.3 Verfahrensvergleich

Der Antrag sieht für die Zusammenarbeit mit Junghans microtec einen Verfahrensvergleich der im SFB 499 eingesetzten Mikrofertigungsverfahren Laserablation (B6), Funkenerosion (B4) und Mikrofräsen (B2 bzw. Z3) vor. Hierbei ist eine Probegeometrie in ausgewählten Materialien zu fertigen. Die Probegeometrie wird an die Geometrie von Bosch und Freudenberg DS angelehnt. Aber auch Junghans-spezifische Konturen sollen sich wiederfinden. Die Materialien, die bei AP 3.1 und AP 3.2 bearbeitet werden, werden auch hier eingesetzt. In den existierenden Produktionslinien der Firma Junghans microtec werden bereits Bauteile mit wenigen Zentimetern Größe gefertigt. Hauptsächlich kommen schleifende Bearbeitungen zur Anwendung. Um eine weitere Miniaturisierung der Baugruppen zu ermöglichen, wird der Einsatz von Mikrofertigungsverfahren erforderlich sein. Der Kunde erwartet von den Produkten jedoch eine hohe Zuverlässigkeit, so dass sich diese auch in der Prozesssicherheit der Mikrofertigungsverfahren widerspiegeln muss. Junghans Feinwerktechnik muss daher die Grenzen der im SFB 499 verfügbaren Mikrofertigungsverfahren genau kennen. Für die im SFB verfügbaren genannten Fertigungsverfahren soll dies in diesem Paket als Hauptzielsetzung dienen.

Zu Beginn der Ausarbeitungsphase wurde die Projektorganisation in Zusammenarbeit mit Junghans FWT wie folgt gemeinschaftlich festgelegt. (Abbildung 18)

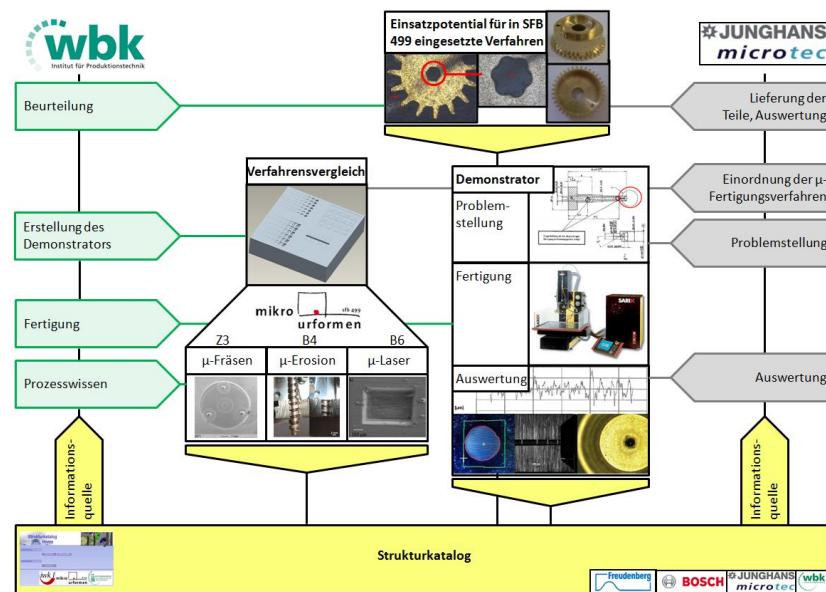


Abbildung 18: Arbeitsplanung Teilstruktur Junghans microtec

Um das Potenzial für den Einsatz von Mikrofertigungsprozessen, wie sie im SFB 499 entwickelt wurden, im Unternehmen Junghans microtec aufzuzeigen, wird zunächst eine Beurteilung von typischen Bauteilen hinsichtlich ihrer Fertigbarkeit durch die Mikrofertigungsverfahren Laserablation, Funkenerosion und Mikrofräsen durchgeführt. Hierzu werden die gelieferten Bauteile zunächst in Kategorien eingeteilt. Dies fördert die Übertragbarkeit der Machbarkeitsanalyse, weil geometrische ähnliche Bauteile aus der Produktion ebenfalls mit den gewählten Verfahren fertigbar sind. Die gewählten Kategorien sind Wellen mit Verzahnung, Zahnräder und Gehäuse.

Anforderungen			Laser	EDM	Fräsen	Anmerkung
Gehäuse	Minimaler Radius	$r_{min} = 0,1 \text{ mm}$	+	+	+	
	Hinterschnitt	$R_g = 0,2 \mu\text{m}$	+	+	+	
	Zu bearbeitende Härte	30 HRC	o	o	+	Nur für Fräsen relevant
	Absorptionsgrad	Ausreichend	+	o	o	Nur für Laser relevant
	Elektrisch leitend	Ja	o	+	o	Nur für EDM relevant
	Bauteilgröße handlebar	$d = 32 \text{ mm}$	+	+	+	
	Kleinste Struktur	$d = 0,2 \text{ mm}$	+	+	+	
	Scharfe Kanten	Nein	+	+	+	
	Umspannen	Ja	+	+	+	
	Aspektverhältnis	4	-	+	+	→ Laser nicht möglich

Abbildung 19: Festgelegte Bauteilkategorien (links), Beispiel Machbarkeitsbetrachtung des Bauteils „Gehäuse“ (rechts)

Für jede Kategorie wird eine Machbarkeitsanalyse durchgeführt. Diese orientiert sich an den bekannten Prozessgrenzen der untersuchten Verfahren. Die Machbarkeit gliedert sich nach, für die Bearbeitung relevanten Größen wie Härte oder Strukturgröße (vergleiche Abbildung 19). Für das Beispiel des Gehäuses ist eine Fertigung durch EDM oder Mikrofräsen machbar. Auf Basis dieser Analyse hat der Firmenpartner Fertigungsstrategien für die Produkte festgelegt. Diese finden sich später in der Ausgestaltung des Verfahrensvergleichs wieder.

Als Fazit ergibt sich für den Firmenpartner, dass die Skalierung der Produkte durch die Mikrofertigungsverfahren des SFB 499 erfolgreich durchgeführt werden kann. Die für das Unternehmen neuen Verfahren kommen dabei nur an ausgewählten Bauteilen zum Einsatz, deren Toleranzen durch die konventionellen Verfahren nicht gewährleistet werden können. Um eine Aussage über die Eignung der Verfahren Laserablation, Mikrofräsen und Mikrofunkenerosion für die Außenkonturfertigung zu treffen, wurde am Institut für Produktionstechnik eine Testgeometrie entwickelt.

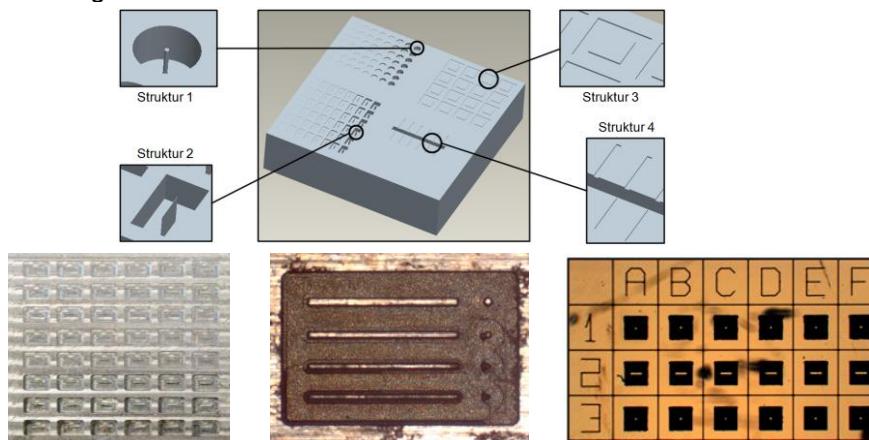


Abbildung 20: Oben allgemeiner Aufbau der Struktur, Testgeometrie Mikrofräsen (links), Mikrobahnerosion (mitte), Laserablation (rechts)

Die in Abbildung 20 dargestellte Geometrie besteht aus vier Strukturen. In den Strukturen eins und zwei wird jeweils das Aspektverhältnis und die Dicke beziehungsweise der Durchmesser der Struktur variiert. Hieraus ergeben sich Aussagen zu Verfahrensgrenzen wie Aspektverhältnis und kleinsten fertigbarer Dicke. Durch Struktur 3 wird die Wiederholgenauigkeit der verwendeten Werkzeugmaschine dokumentiert. Struktur vier dokumentiert die bei der spanenden Bearbeitung vorhandene Werkzeugabdrängung. Die Summe aller Strukturen ergab Auskunft über die Technologiegrenzen bzgl. kleinsten darstellbaren Strukturgrößen bei unterschiedlichen Aspektverhältnissen, der Fertigbarkeit scharfer Kanten und der Gratbildung bei den einzelnen Verfahren. Die betrachteten Werkstoffe wurden von den Projektpartnern in Abstimmung mit den Teilprojektleitern von B4, B6 und Z3 (B2) gewählt. Teil der Betrachtung ist auch der Werkstoff Graphit, der bereits in den Arbeitspaketen mit dem Firmenpartner Freudenberg DS eingesetzt wurde. Beim Verfahren Erosion wurde Graphit, Toolox 44 und Hartmetall (TSF44) untersucht. Die Laserablation bearbeitete die Werkstoffe Hartmetall (TSF44) und Mischkeramik ($Al_2O_3 + Ti$). Das Mikrofräsen untersuchte die Materialien Stahl (C45E), Graphit und Messing ($CuZn39Pb2$). Die eingesetzte Hartmetallsorte TSF44 hat eine mittlere Korngröße des Wolframkarbids von $0,4 \mu m$ bei einer Härte von 1900 HV1. Die Keramik des Typs SH2 wird vom Hersteller CeramTech bezogen und bei einer Härte von 2100 HV1 bearbeitet. Bei der Laserablation wurde zu Beginn eine Parametervariation durchgeführt. Hierbei wurde die Leistung in zehn Stufen von fünf bis 55 mW erhöht, der Puls- und Bahnabstand von ein bis neun Mikrometern in neun Stufen und der Bahnabstand ebenfalls von ein bis neun Mikrometern in neun Stufen variiert. Die Zustellung der Fokuslage erfolgt individuell und geregelt, wobei die akustische Fokusfindung des Teilprojekts B6 zum Tragen kam.

	Konturen	Kleinste Strukturgröße [µm]	Tiefe [µm]	Wandwinkel [°]	Abtragsrate [µm³/s]
Laser Hartmetall TSF44		5	150	15-20	700
Laser Keramik Al2O3 + Ti (SH2)		5	250	15-20	14000
Bahnerosion Toolox44		5	50	0	12.500
Bahnerosion TSF44		5	50	0	29.800
Bahnerosion Graphit		20	100	0	10.500
Mikrofräsen C45E		2,5 (nach Rundlaufkompensation)	100	0	150.000
Mikrofräsen CuZn39Pb2		5 (ohne Rundlaufkompensation)	100	0	1.600.000

Abbildung 21: Technologievergleich am Beispiel der Teststruktur im Bezug auf kleinste Strukturgröße, erzielter Tiefe, Wandwinkel und Abtragsrate für die Verfahren Laserablation, Bahnerosion und Fräsen

Die Mikrofräsbearbeitung wurde durch einen Schaftfräser des Durchmessers 100 µm bei einer Drehzahl von 20.000 U/min in Stahl (C45E) und durch einen Schaftfräser des Durchmessers 300 µm bei einer Drehzahl von 40.000 U/min Zahnvorschub 2 µm, Zustellung 2 µm in Messing (CuZn39Pb2) durchgeführt.

Die Bahnerosion erfolgte mit Elektroden des Durchmessers 50 µm mit jeweils negativer Erosionspolarität. Die Impulsdauer betrug 1 µs bei einer Frequenz von 160 kHz. Die Stromstärke betrug 0,8 A bei 80 V Leerlaufspannung. Die Zustellungen betrugen 1 µm für Stahl (Toolox44) und Graphit sowie 1,5 µm für Hartmetall (TSF44).

Die erzielten Ergebnisse hinsichtlich kleinster Strukturgröße, Tiefe, Wandwinkel und Abtragsrate werden in Abbildung 21, die Ergebnisse bzgl. der Rauheit in Abbildung 22 dargelegt.

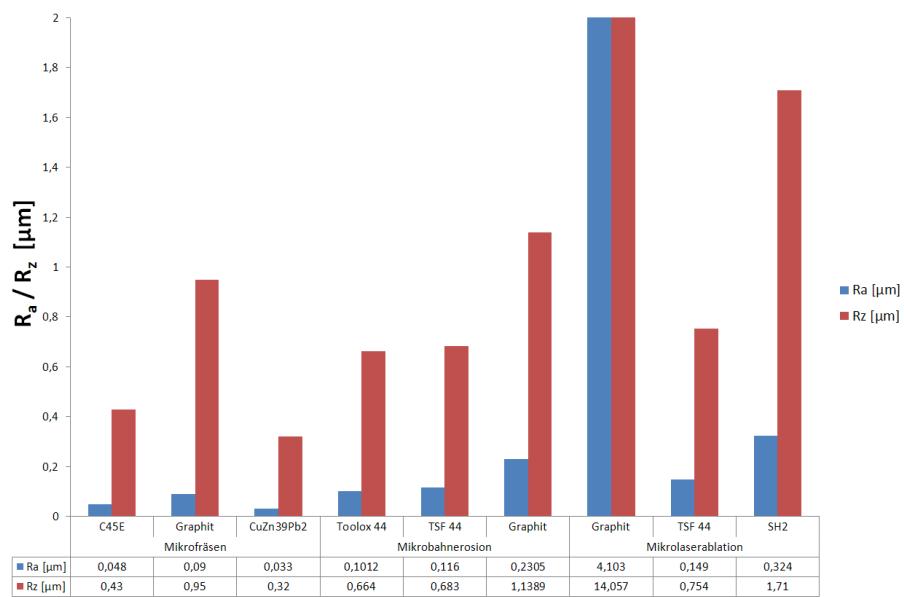


Abbildung 22: Vergleich der erzielbaren Rauheiten in Abhängigkeit der Verfahren und Werkstoffen

Als Grenzwert wurde der kleinste PIN bzw. Quader bei der jeweiligen Tiefe festgelegt, der noch als solcher erkennbar war. Ein weiteres Abbruchkriterium war die Bearbeitungszeit, welche Pro Struktur auf maximal 1 Stunde begrenzt wurde. In Abbildung 23 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung detailliert dargestellt. Die rot gefärbten Säulen markieren die Strukturen, bei welchen das zeitlich definierte Abbruchkriterium von 1 h erreicht wurde. Die Auswertung des Prozessfähigkeitsvergleiches anhand der quadratischen Strukturen die in horizontaler und vertikaler Richtung vermessen wurden, ist in Abbildung 24 ersichtlich. Als Basis diente die kurzfristige Prozessfähigkeit die aus je 25 Werten ermittelt wurde. Die Sollgrößen wurden entsprechend der Verfahrenseigenschaften angepasst und betrugen für das Fräsen und die Bahnerosion 1x1mm² und für die Laserablation (aufgrund der geringeren Abtragsraten 305x305 μm². Das Toleranzfeld betrug $\pm 5 \mu\text{m}$. Als Ergebnis wurde von Seiten des Erodierens eine Prozessfähigkeit von annähernd 1 erreicht. Die Laserablation erzielte in X-Richtung einen Wert von annähernd 1. In Y-Richtung ergab sich ein Wert von 0,69. Eine Betrachtung der Streubreite zeigt, dass es sich nicht um einen systematischen Fehler handelt. Es wird eine Schwingung vermutet, welche in diese Richtung bei den verwendeten Werten das Ergebnis verfälscht. Das Mikrofräsen, welches laut Antrag die höchste Prozessfähigkeit erreichen sollte, kann im vorhandenen Toleranzfeld nur einen Wert von 0,25 bzw. 0,42 erzielen. Dies entspricht den aktuell gefahrenen Prozessen der meisten Unternehmen, da hier der Solldurchmesser des Werkzeuges als Berechnungswert für die Bahnberechnung in die CAM-Software einfließt. Aufgrund des hohen Rundlauffehlers von bis zu 20 μm beim Mikrofräsen kann so ein c_{pk} von 1,5 nicht erreicht werden. Dies zeigten auch Untersuchungen die in AP3.2 im Rahmen des Projektes im Hause Bosch anhand eines Serienbohrprozesses durchgeführt wurden. Hier ergab sich in einem laufenden Prozess mit Mikrobohrungen ein c_{pk} von ~0,9. Um das Projektziel zu erreichen wurden die hier definierten Untersuchungen mit einer Rundlaufkompensation und einer Radiuskorrektur durchgeführt. Die sich dadurch ergebenden Werte von c_{pk} 1,34 in X- und von sogar 2,9 in Y-Richtung zeigen das hohe Potenzial dieses Optimierungsansatzes und mündeten in einem weiteren Forschungsthema bei dem aktuell ein mechatronisches, justierbares Spannsystem im Rahmen eines ZIM geförderten Projektes entwickelt wird. Dieses neuartige System kann den Unternehmen zukünftig helfen, das vorliegende Potenzial zu erschließen.

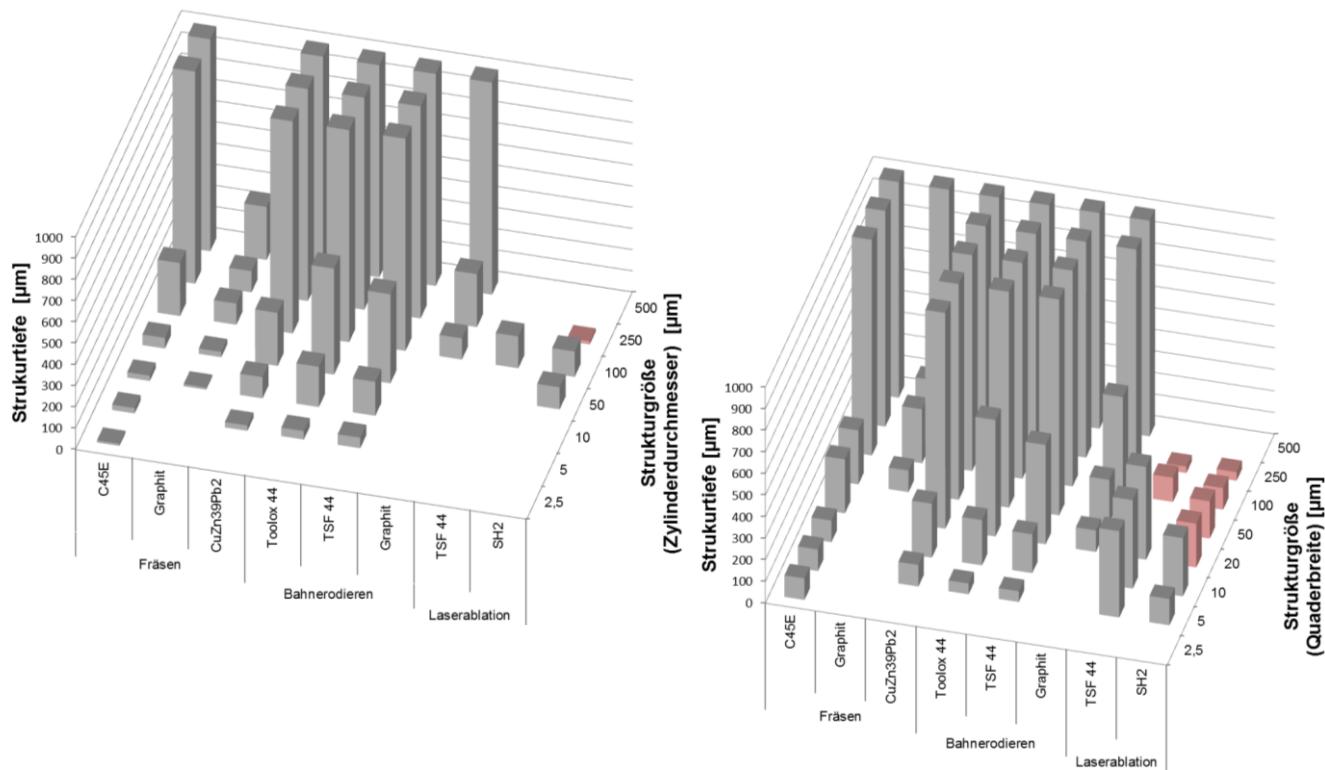


Abbildung 23: Überblick der erzielten Aspektverhältnisse und Strukturgrößen der Verfahren (links Zylinder, rechts Quader)

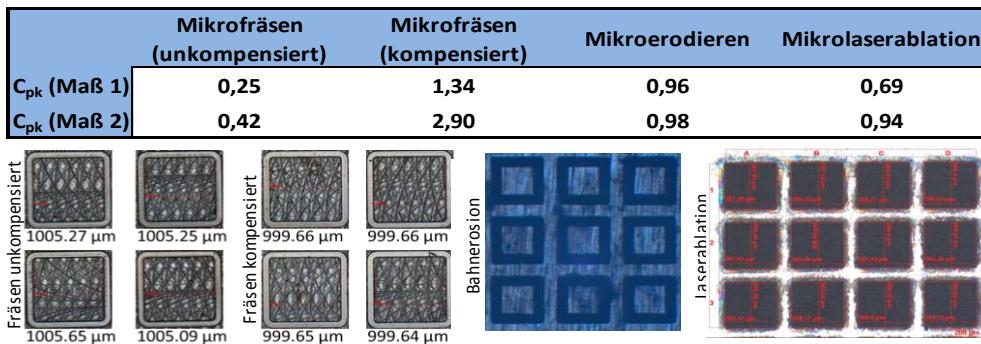


Abbildung 24: Ermittelte Prozessfähigkeiten am Testbauteil (Fräsen unkompeniert/kompenziert in C45E, Bahn erosion und Laserablation in TSF44)

AP5: Unterstützung der Firmen bei der Einführung der Technologien durch Erweiterung des Strukturkatalogs auf die Maschinentechnologie (Bosch, Freudenberg, Junghans, Institut für Produktionstechnik)

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die drei Industriepartner bei der Umsetzung der Ergebnisse in den jeweiligen Betrieb unterstützt. Dabei wurden dem Industriepartner die für ihn relevanten Maschinen mit den jeweiligen Daten zusammengestellt. Dies erfolgte in einem eigenständigen Vergleich der den Industriepartnern die Auswahl der Maschinentechnologie erleichtert. Hierfür wurden im Rahmen einer Tabelle die aktuell verfügbaren UP-Maschinen zusammengeführt, welche den Mindestanforderungen der Unternehmen an eine Positioniergenauigkeit im Submikrometerbereich ($<0,5 \mu\text{m}$) Genüge taten. Bosch, Junghans und Freudenberg zeigten hier den Bedarf nach 3- und fünfachsigen Mikrozerspanungsmaschinen. Der Bedarf

von Bosch erweiterte sich hier um einen speziellen Anwendungsfall bei dem eine UP-Maschine ermittelt wurde, die den Ersatz eines Erodierprozesses durch die zerspanende Fertigung betrachtet.

Anbieter [©]	Kugler [©] www.kugler-precision.com [©]		PRIMA CON-Maschinenbau GmbH [©] www.primacon.de [©]		Kern Micro- und Feinwerktechnik [©] www.kern-microtechnic.com [©]			LT-ULTRA [©] www.lt-ultra.com [©]		
Modell [©]	Micro [©] nano [©]	MicroMaster [©] MM2 [©]	PFM-4024-5D [©]	PFM-24-NG [©]	Pyramid Nano [©]	Evo [©]	Micro [©]	MMC1100Z2 [©]	MMC900 [©]	MMC410 [©]
Max. Aufspanngewicht [kg] [©]	100 [©]	300 [©]	250 [©]	700 [©]	250 [©]	500 [©]	300 [©]	300 [©]	300 [©]	300 [©]
Haupt- spinde- l [©]	Antreisleistung [kW] [©]	0,5-1,3 [©]	- [©]	12 [©]	40 [©]	11-6,4 [©]	0,17-6,4 [©]	0,17-3,4 [©]	0,3-3 [©]	0,3-1,7 [©]
Drehzahl [min ⁻¹] [©]	Drehmoment [Nm] [©]	- [©]	6,7 [©]	3,8 [©]	4-1,5 [©]	Bis 1,5 [©]	Bis 0,8 [©]	Bis 1,5 [©]	Bis 1,5 [©]	- [©]
Bis-200.000 [©]	Bis-200.000 [©]	400-42.000 [©]	300-140.000 [©]	500-50.000 [©]	Bis-160.000 [©]	Bis-160.000 [©]	500-200.000 [©]	500-200.000 [©]	500-200.000 [©]	500-200.000 [©]
Präz- iso- n [©]	Positioniergenauigkeit- [um] [©]	$\pm 0,3^{\circ}$	$\pm 0,15^{\circ}$	3 [©]	1,5 [©]	$\pm 0,4^{\circ}$	$\pm 1^{\circ}$	$\pm 1^{\circ}$	$\pm 0,3^{\circ}$	$\pm 0,3^{\circ}$
Rundlaufgenauigkeit- Spindel [um] [©]	Spindel [um] [©]	$<2^{\circ}$	$<1^{\circ}$	$\leq 1^{\circ}$	$\leq 1^{\circ}$	$<2^{\circ}$	$<2^{\circ}$	$<2^{\circ}$	$<1^{\circ}$	$<1^{\circ}$
Achse- n [©]	Führungen [©]	Luftlager [©]	Hydrostatisch [©]	Walzlager [©]	Doppelprisma- Walzführungen [©]	Hydrostatisch [©]	Nadellager [©]	Nadellager [©]	Hydrostatisch Luf [©]	Hydrostatisch Luf [©]
Achsen [©]	Linearmotor [©]	KGT [©]	KGT [©]	Hydrostat-KGT [©]	KGT [©]	KGT [©]	KGT [©]	Linearmotor [©]	Linearmotor [©]	Hydrostat-KGT [©]
Verfa- hrweg [©]	X-Achse [mm] [©]	300 [©]	400 [©]	420 [©]	240 [©]	500 [©]	300 [©]	250 [©]	1100 [©]	410 [©]
Vors- hub [©]	Y-Achse [mm] [©]	300 [©]	300 [©]	240 [©]	240 [©]	500 [©]	280 [©]	220 [©]	300 [©]	- [©]
Z-Achse [mm] [©]	200 [©]	250 [©]	350 [©]	240 [©]	300 [©]	250 [©]	200 [©]	250 [©]	400 [©]	410 [©]
Max. Vors- hub [©]	X-Achse [m/mm] [©]	15 [©]	3,5 [©]	40 [©]	12 [©]	30 [©]	16 [©]	6 [©]	1 [©]	0,38 [©]
Y-Achse [m/mm] [©]	15 [©]	3,5 [©]	40 [©]	12 [©]	30 [©]	16 [©]	6 [©]	1 [©]	1 [©]	- [©]
Z-Achse [m/mm] [©]	2 [©]	1 [©]	40 [©]	12 [©]	30 [©]	16 [©]	6 [©]	1 [©]	1 [©]	0,38 [©]
Max. Beschleu- nung [©]	X-Achse [m/s ²] [©]	100 [©]	- [©]	10 [©]	10 [©]	10 [©]	8 [©]	2 [©]	10 [©]	10 [©]
Y-Achse [m/s ²] [©]	100 [©]	- [©]	10 [©]	10 [©]	10 [©]	10 [©]	8 [©]	2 [©]	10 [©]	10 [©]
Z-Achse [m/s ²] [©]	100 [©]	- [©]	10 [©]	10 [©]	10 [©]	10 [©]	8 [©]	2 [©]	10 [©]	10 [©]
Steuerung (Satzverarbeitungszeit)- [ms] [©]	PITAU [©]	PITAU [©]	Heidenhain iTNC 530 [©]			Heidenhain [©]		PITAU [©]	PITAU [©]	PITAU [©]
Maße (L x B x H) [mm] [©]	1700 x 2000 x- 2380 [©]	1400 x 1250 x- 2218,5 [©]	2200 x 1900 x- 2110 [©]	1860 x 1580 x- 2100 [©]	2850 x 3220 x- 2830 [©]	2800 x 2500 x- 2200 [©]	2000 x 2200 x- 2100 [©]	2300 x 1900 x- 2100 [©]	2300 x 1900 x- 2100 [©]	2000 x 1800 x- 2100 [©]
Gewicht [kg] [©]	3600 [©]	- [©]	3100 [©]	1000 [©]	7000 [©]	3000 [©]	1700 [©]	-4000 [©]	-4000 [©]	-4000 [©]

Abbildung 25: Auszug aus Vergleich der Mikrofräsmaschinenhersteller (Kugler, Primacon, Kern, LT-Ultra)

Nach Fertigung der Formwerkzeuge des kleinsten Dichtringes am Institut für Produktionstechnik und Prüfung der Funktionsfähigkeit im Hause Freudenberg, erfolgte die Umsetzung weiterer Formen unter Hilfe der abgelegten Daten des Strukturkatalogs in Eigenregie im Hause Freudenberg. Hierbei erfolgte bei Fragestellungen technische Hilfestellung durch das Forschungsinstitut. Das Ergebnis ist in Abbildung 26 dargestellt.



Abbildung 26: Durch transferierte Technologie im Hause Freudenberg umgesetzter miniaturisierter Radialwellendichtring

Für BOSCH wurde für das in AP 3.2 untersuchte Beispielprodukt eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt. Diese zeigte im Vergleich zum Serienprozess deutliches Einsparpotenzial. Eine Umsetzung im Hause Bosch ist angedacht, sobald eine Ersatzbeschaffung für die bestehenden Maschinen ansteht.

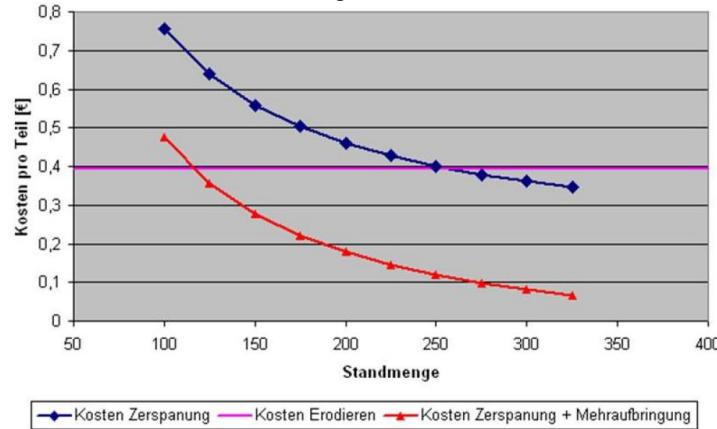


Abbildung 27: Stückkosten in Abhängigkeit der Standmenge (Wirtschaftlichkeitsrechnung BOSCH)

Als Demonstrator für den direkten Transfer des Know-how ins Unternehmen wurde im Rahmen einer Make-or-Buy Analyse die Machbarkeit von Bohrungen mit hohen Aspektverhältnissen überprüft. Hierzu wurden, in Absprache mit dem Projektpartner, Strategien zur Fertigung mit einer kombinierten Bearbeitung (SFB 499, B6 und Z3 (B2)) durch das Verfahren spanendes Mikrobohren und funkenerosives Bohren erstellt. Die spanende Fertigung erfolgte hierbei bei Junghans microtec, das Funkenerosive Bohren durch die Verfahren des SFB 499, B4).

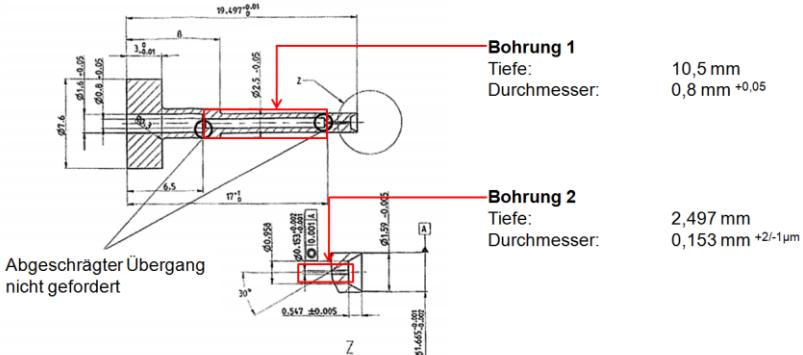


Abbildung 28: Demonstrator "Hülse"

Die Verfahrensauswahl erfolgt aufgrund des hohen Aspektverhältnisses der Bohrung und der Anwendung des Verfahrens Mikrofunkenerosion beim Industriepartner.

Die Auswertung der Bohrung unter den Gesichtspunkten Oberflächenqualität der Bohrungsinnenwand, Konzentrität und Maßhaltigkeit des Bohrungsdurchmessers übernimmt Junghans microtec. Vorgabe für die Rauheit der Bohrungswand ist $R_a = 0,3 \mu\text{m}$. Die Konzentrität wird mit $5 \mu\text{m}$ toleriert. Der Schwerpunkt der Untersuchungen richtet sich auf die Bohrung des Durchmessers $0,153 \mu\text{m}$.

In Anlehnung an den Verfahrensvergleich wurden Fertigungstechniken für einen spanenden und funkenerosiven Prozess aufgestellt. Durch den Firmenpartner erfolgte die Bewertung anhand von technologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Der gewählte funkenerosive Bohrprozess wird im Hause Junghans microtec ausgewertet. Die Vermessung der Bohrung erfolgt mit Messsystemen Werth Videocheck IP 400, Zeiss AxioCam ICc3 und Hommel Tester T8000. Mit den genannten Systemen wird die Rundheit, Maßhaltigkeit und Oberflächengüte geprüft. [JUN-10]

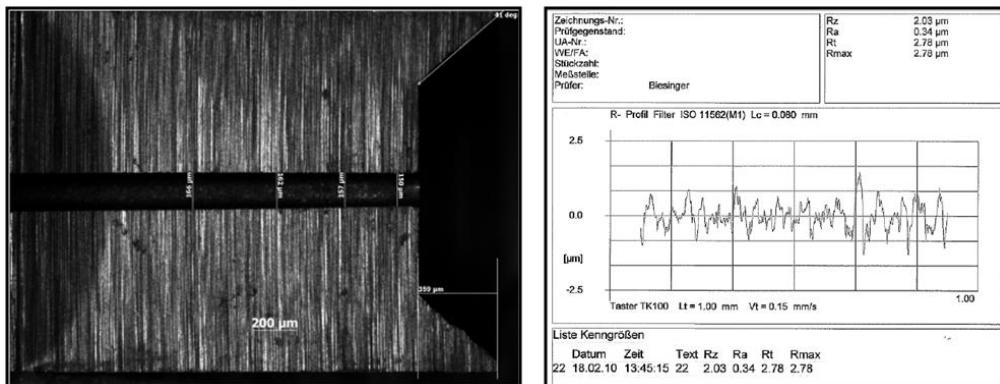


Abbildung 29: Messergebnisse der Fertigungsumsetzung „Hülse“

In Abbildung 29 ist exemplarisch eine Auswertung der einzelnen Messung zu sehen. Zunächst wird der Radius der Bohrung am rechten Ende der Hülse betrachtet, wo der Bohrprozess startet. Die Abweichungen zum Sollmaß betragen unter $14 \mu\text{m}$ und die Streuung des Durchmessers $4 \mu\text{m}$. Die Vermessung des Schliffbildes der Bohrung ergab, dass sich die Bohrung mit zunehmender Bohrungstiefe weitet. Dies ist auf Funkenüberschläge bei nicht ausreichender Spülung zurückzuführen. Die Rauheitsmessung als letztes Element der Analyse ergab für die Bohrungswand einen mittleren Rauheitswert $R_a = 0,34 \mu\text{m}$ und einer Rauhtiefe $R_z = 2 \mu\text{m}$. Die erzielten Werte wurden diskutiert, münden jedoch aktuell nicht in einen Serienanlauf des Produkts.

Vergleich mit den anwendungsspezifischen und wirtschaftlichen Erfolgskriterien

Bauteilspezifische Kriterien:

Ziel war es, zu zeigen, dass Graphitkomponenten mit Formabweichungen von $<\pm 5 \mu\text{m}$ fertigbar sind. Dies wurde in AP 3.3 sowohl für Graphit als auch für Hartmetall, Stähle und Keramiken aufgezeigt. Dabei ist anzumerken, dass dieses Ziel beim Mikrofräsen nur mit erhöhtem Fertigungsaufwand (aufgrund Fräserradiuskompensation mit Rundlaufehlerkorrektur) erreicht wurde.

Prozessspezifische Kriterien:

Als prozessspezifisches Kriterium wurde der Prozessfähigkeitskennwert verwendet. Das Ziel einer Serienreihe haben die Verfahren partiell erreicht. Die Mikrozerspanung erzielt ohne zusätzliche Kompensationsverfah-

ren (Status Industriepartner) beim Toleranzfeld von $\pm 5 \mu\text{m}$ nur eine kurzfristige Prozessfähigkeit von 0,25 (X-Richtung) und 0,42 (Y-Richtung).

Die aus der Forschung (TP Z3) transferierte Mikrozerspanung mit Fräserradiuskompensation und Rundlauffehlerkorrektur erzielte hingegen eine kurzfristige Prozessfähigkeit von 2,9 bei Maß 1 und 1,34 bei Maß 2. Die Maße unterschieden sich durch die angesteuerten Achsen der Maschine. Es zeigt sich also, dass die Achsgenauigkeit einen erheblichen Einfluss auf die erzielte Prozessfähigkeit zeigt. Der angestrebte Prozessfähigkeitsindex von 1,5 kann somit bei ausreichend genauen Maschinenachsen erreicht werden. Die Bahnerosion erzielte mit 0,95 bzw. 0,98 annähernd den Sollwert von 1. Die Mikrolaserablation erzielte den Sollwert von ca. 1 jedoch nur in Y-Richtung (0,94). Weiterhin wurden die Maschinenfähigkeitskennwerte für die 200 μm Drosselbohrungen (BOSCH) mit 1,55 bzw. 1,34 ermittelt.

Wirtschaftliche Kriterien:

Die Bearbeitungszeiten beim Bohren von Drosseln des Unternehmens Bosch konnten im Rahmen des Projektes T1 bei verbesserter Bohrungsqualität von 13 Sekunden (funkenerosives Bohren) auf 2 Sekunden (spanendes Mikrobohren) gesenkt werden. Der Vorgabewert einer Größenordnung wurde somit erreicht. Die Ausschussquoten betrugen bei allen untersuchten Verfahren bei eingefahrenem Prozess deutlich unter 10 %. Die Nebenzeiten beim Spannen konnten reduziert werden, indem Beispielhaft eine Spanvorrichtung entwickelt wurde, die per Vakuum das Mikrobauteil Drosselplatte spannt. Dieses System funktioniert auch bei Graphit sowie Grünkeramiken. Die Spannzeit beträgt somit unter 1 Sekunde. Damit ist das Kriterium der kurzen Nebenzeiten beim Spannen erfüllt.

Weiterhin wurde in einer Wirtschaftlichkeitsrechnung nachgewiesen, dass das Verfahren des spanenden Bohrens das Erodieren bei einem Durchmesser von 200 μm beim in 3.2 genannten Bohrverfahren von Drosselplatten ersetzen kann. Eine Umsetzung ist geplant, wenn Ersatzbeschaffungen der Maschinen nötig werden.

Auswirkungen auf die Situation der beteiligten Anwendungspartner

Die Situation der beteiligten Anwendungspartner konnte im Wesentlichen gestärkt werden.

Der Vergleich der Mikrofertigungsverfahren bei Junghans Feinwerktechnik bietet einen allgemeinen Überblick über die Grenzen der Verfahren. Diese können zukünftig von den beteiligten Unternehmen online abgerufen werden.

Dem Unternehmen Bosch konnte in einer umfassenden Wirtschaftlichkeitsrechnung künftige Potenziale ermittelt werden, die den Break Even für den Ersatz des aktuell durchgeführten Erodierbohrens durch eine zerspanende Bohrbearbeitung darlegt.

Das Unternehmen Freudenberg konnte zwei hochinteressante Themenfelder angehen, welche künftig hohe wirtschaftliche Vorteile liefern können. Es wurde erkannt, dass eine tribologische Mikrostruktur im Hochleistungskunststoff Peek eine Reibungsminimierung erzielen lässt. Dieser Ansatz wird im unternehmenseigenen Forschungsdienst weiter verfolgt. Als zweites Themenfeld wurde gemeinschaftlich der weltkleinste Radialwellendichtring umgesetzt. Dieser wurde direkt im Anschluss an das Transferprojekt in das Produktpotfolio eingebunden und geht 2012 in Serienproduktion. Als erste Anwendung gelangt das Produkt 2012 in einer neuartigen Mikrozahnringpumpe der Firma HNP Mikrosysteme GmbH in die Produktion.

Eingesetzte Ergebnisse aus anderen Teilprojekten des Sonderforschungsbereichs

Das Teilprojekt T1 arbeitete mit zahlreichen anderen Teilprojekten des Sonderforschungsbereiches zusammen. Hauptsächlich zu nennen sind hierbei die Teilprojekte B2 (Z3), B4 und B6, welche im Hinblick auf Mikrozerspanung, Mikroerodieren und Mikrolaserablation unterstützten. Weiterhin erfolgte die Betrachtung der Oberflächennachbehandlung mit B5. B4, B6 und Z3 erhielten zudem von T1 Auskunft über die Prozessfähigkeit ihrer Technologien. C1, C2 und C5 profitierten durch bessere Formen für das Mikrogießen, Spritzgießen und 2K Spritzgießen.

Rückwirkungen auf die Grundlagenforschung und die Lehre

Die Rückwirkungen auf die Grundlagenforschung ergaben sich, wie im vorigen Abschnitt dargelegt, auf den SFB499. Weiterhin ergab sich aus der Problematik des Einflusses der Rundlauffehler ein ZIM gefördertes Forschungsprojekt mit der Kugler GmbH und der Hyprostatik GmbH, welches in einem mechatronischen Spannsystem mit Messsystem und hydrostatischer Spindel mündet. Weiterhin ergaben sich Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt, die in einem weiteren Transferprojekt aus dem SFB 499 mündeten (T6), welches sich mit der „Entwicklung einer Methodik zur Erstellung aufwandsoptimierter Prozessketten“ beschäftigt. Die Erkenntnisse aus dem Transferprojekt flossen zudem in die Lehrveranstaltung „Mikrolabor“ am Institut für Produktionstechnik ein. Zudem entstanden aus dem Projekt eine Studienarbeit und zwei Diplomarbeiten, die gemeinsam von Institut und Firmenpartnern betreut wurden.

7.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

- [1] Schulze, V.; Deuchert, M.; Ruhs, C.; Weber, P.; Weingärtner, R.: Fertigungstechnologien zur Erzeugung hochgenauer Mikrostrukturen und Oberflächen. Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, 11. - 12. Oktober 2011, Karlsruhe, Germany, Verlag KIT Scientific Reports, Band , Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, ISBN 978-3-86644-747-9, S. 65 - 74
Erscheinungsjahr: 2011
- [2] Schulze, V.; Weber, P.; Deuchert, M.; Haupt, S.; Ruhs, C.; Kienzler, A.: Limits and challenges of manufacturing micro moulds. in: International Journal of Nanomanufacturing, Jahrgang 2010, Heft/Band Vol. 6, No.1/2/3/4, Verlag InderScience Publishers, DOI 10.1504/IJNM.2010.034782, S. pp. 176 - 189
Erscheinungsjahr: 2010
- [3] Schulze, V.; Deuchert, M.; Kienzler, A.; Ruhs, C.; Weber, P.: Prozessübergreifende Betrachtung abtragender Verfahren zur Mikroformenherstellung. 4. Kolloquium Mikroproduktion, 28.-29.10.2009, Bremen, Deutschland, Verlag BIAS-Verlag, Herausgeber/Veranstalter F. Vollertsen, S. Büttgenbach, O. Kraft, W. Michaeli, Band , 4. Kolloquium Mikroproduktion, Bremen, ISBN 978-3-933762-32-0, S. 125-131
Erscheinungsjahr: 2009
- [4] Schulze, V.; Deuchert, M.; Ruhs, C.: Compensation of the size effect due to the cutter radius offset in the micro milling process. 5th International Conference on Multi-Material Manufacture (4M) and the 4th International Conference on Micro Manufacturing (ICoMM), 23rd-25th September 2009, Karlsruhe, Germany, Verlag Charlesworth Group, Herausgeber/Veranstalter 4M and ICoMM Associations, Band , 4M/ICoMM 2009 The Global Conference on Micro Manufacture, Wakefield, UK, S. 437-440
Erscheinungsjahr: 2009

7.2.3 Dokumentation weiterer Aktivitäten

- [1] Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499, Vortrag: Dichten vom Feinsten! Miniaturisierte und Mikrostrukturierte Dichtsysteme; 12.10.2011; Karlsruhe;
- [2] VDMA Roadshow Microfluidic 2010/2011 (Mannheim, Rheinfelden, Köln, Frankfurt, Bitterfeld, Salzburg, Rotterdam, Leverkusen)
- [3] 16. Internationale Dichtungstagung; 12. bis 13.10.2010; Universität Stuttgart
- [4] Entwicklung dynamischer Mikrodichtungen und funktionaler Oberflächentopologien, Vortrag SFB 499 Seminar; Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherungurgeformter mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen, 26.04.2010
- [5] Miniatur Simmerring: Ein echter Winzling. Scope Online, Best Practice für Produktion und Technik; Maschinenelemente, April 2011, Kennziffer 182, Verlag: Hoppenstedt Publishing GmbH, <http://www.scope-online.de/Maschinenelemente/Maschinenelemente---Miniatur-Simmerring.htm>
- [6] Simmerring in Miniaturformat, Produktmeldung 24.03.2011, KEM Informationsvorsprung für Konstrukteure, Konradin Verlag R Kohlhammer GmbH, <http://www.kem.de/heftarchiv/-/article/30599594/31103527?returnToFullPageURL=back>;
- [7] Elastomer-Simmerring / Mikro-Simmerring; Produktmeldung in Heft 01/02 2011; MED engineering, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 15.02.2011, http://www.med-eng.de/ta001/na/pi201102141038353/Elastomer-Simmerring_produkt.html
- [8] Kleinster Simmerring entwickelt; konstruktionspraxis.de, 22.12.2010, Vogel Business Media, <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/themen/konstruktionsbauteile/articles/297028/>
- [9] Freudenberg Forscher entwickeln den weltweit kleinsten Simmerring; Delta p, das internationale Magazin für Pumpentechnologie; Ingenieur Verlag Nagel; 15.12.2010;
- [10] Freudenberg Manufactures World's Smallest Seal; medtechinsiders (from the publisher of emdt); 15.12.2010; <http://medtechinsider.com/archives/20169>;
- [11] Mini liegt voll im Trend, Freudenberg Forscher entwickeln weltweit kleinsten Simmerring; Pressemitteilung Freudenberg; 19.11.2010; http://www.freudenberg.de/ecomaXL/index.php?site=FCO_de_pressemitteilungen_detail&udtx_id=3143
- [12] Dichtungen im Miniaturformat, Drittes Globales Innovationsforum - Freudenberg Magazin Nr. 3 2010;
- [13] Je kleiner, um so komplizierter; Echo Online; 26.11.2010; <http://www.echo-online.de/region/bergstrasse/rhein-neckar/Je-kleiner-um-so-komplizierter;art1252,1402512>
- [14] Mini is fashion European Rubber Journal Vol. 192, No. 6: November/December 2010,
- [15] Weltweit kleinster Simmerring; 19.11.2010; Produktion, Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie; Verlag Moderne Industrie GmbH;
- [16] Weinheim – Freudenberg entwickelt kleinste Dichtung; 19.11.2010; mrn-news.de, News aus der Metropolregion Rhein-Neckar
- [17] VDMA Microtechnology – Roadshow Mikrofluidik zum sicheren Einsatz von mikrofluidischen Bauteilen; 29.07.2010; MaschinenMarkt, Das Industrie Portal; Vogel Business Media GmbH & Co. KG

7.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wird seit 07/2008 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wurde 06/2011 beendet.

7.3.1 Personal im Transferprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1.	Fleischer, Jürgen; Prof.Dr.-Ing.; Institutsleiter	Produktionstechnik, Maschinenbau	Institut für Produktionstechnik, KIT	5B, bis Ende erstes Halbjahr	
	2.	Prof.Dr.-Ing. habil. Volker Schulze	Produktionstechnik, Maschinenbau	Institut für Produktionstechnik, KIT	5B, ab zweitem Halbjahr	
	3.	Kotschenreuther, Jan; Dipl.-Wi.-Ing.; Bereichsleiter	Fertigungstechnik, Maschinenbau	Institut für Produktionstechnik, KIT	5B	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	4.	Becker, Matthias; Techniker		Institut für Produktionstechnik, KIT	20	
	5.	Ohletz, Maritta; Dipl.-Inf.		Institut für Produktionstechnik, KIT	10	
Kooperationspartner						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	6.	Pannhorst, Johann; Dr.-Ing.; Produktionsmanager		Junghans microtec, Dunningen-Seedorf	5	
	7.	Müller, Uwe; Leiter Innovation		Freudenberg GmbH und Co. KG, Weinheim	5	
	8.	Voigt, Thomas; Gruppenleiter		Bosch GmbH, Homburg/Saar	5	
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	9.	Grieb, Walter; Betriebsmittelbau		Junghans microtec, Dunningen-Seedorf	15	
	10.	Nahrwold, Olaf; Techniker		Freudenberg GmbH und Co. KG, Weinheim	15	
	11.	Grenz, Florian; Dipl.-Ing. (BA) Techniker		Bosch GmbH, Homburg/Saar	15	
Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	12.	Ruhs, Christoph; Dipl.-Ing.	Produktionstechnik	Institut für Produktionstechnik, KIT	39,5 (6 Monate)	E13
	13.	Deuchert, Marco; Dipl.-Ing.	Produktionstechnik	Institut für Produktionstechnik, KIT	39,5 (24 Monate)	E13
	14.	Ambrosy, Florian; Dipl.-Ing.	Produktionstechnik	Institut für Produktionstechnik, KIT	39,5 (6 Monate)	E13
nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	15.	Hildenbrand, Thomas; Techniker		Institut für Produktionstechnik, KIT	20	E9

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die beantragte Förderperiode (Grundausstattung):

1 Fleischer, Jürgen

Herr Prof. Fleischer ist als Leiter des Instituts für Produktionstechnik (Bereich Werkzeugmaschinen und Handhabungstechnologie), und Teilprojektleiter von mehreren Teilprojekten innerhalb des SFBs für die wissenschaftliche Betreuung und für Problemstellungen in Bezug auf Produktionstechnik zuständig. Zudem leistete er die wissenschaftliche Außendarstellung des Teilprojektes T1. Er übernahm diese Aufgabe bis Ende des ersten Halbjahres der Projektlaufzeit.

2 Schulze, Volker

Herr Prof. Schulze ist als Leiter des Instituts für Produktionstechnik (Bereich Fertigungs- und Werkstofftechnik) und Teilprojektleiter von mehreren Teilprojekten innerhalb des SFBs für die wissenschaftliche Betreuung und für Problemstellungen in Bezug auf Produktionstechnik zuständig. Zudem leistete er die wissenschaftliche Außendarstellung des Teilprojektes T1. Er übernahm diese Aufgabe ab dem zweiten Halbjahr der Projektlaufzeit.

3 Kotschenreuther, Jan

Herr Dipl.-Wi.-Ing. Kotschenreuther ist als Bereichsleiter Fertigungstechnik des Instituts für Produktionstechnik für die Beratung in fertigungstechnischen Angelegenheiten zuständig.

4 Becker, Matthias

Herr Becker arbeitet als Techniker am Institut für Produktionstechnik für die Gruppe Fertigungstechnik. Er ist verantwortlich für die Versuchsmaschine Kugler Micro Master II auf der ein Großteil der Versuche durchgeführt wird. Herr Becker verfügt über langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Mikrozerspanung und wird bei dem Einrichten und der Durchführung der Versuche unterstützen.

5 Ohletz, Maritta

Frau Dipl.-Inf. Ohletz arbeitet im Service Center EDV des Instituts für Produktionstechnik. Sie beschäftigt sich vorrangig mit der SQL Programmierung und hat bereits in den vergangenen Jahren an dem Strukturkatalog in seiner aktuellen Form gearbeitet. Sie ist daher bestens vertraut mit den fachlichen und inhaltlichen Themen des zu erweiternden Strukturkatalogs.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die beantragte Förderperiode (Kooperationspartner):

6 Pannhorst, Johann

Herr Dr.-Ing. Pannhorst arbeitet als Produktmanager bei Junghans microtec. Er ist dort zuständig für die Entwicklung und Produktion von verschiedensten feinwerktechnischen Produkten. Herr Dr. Pannhorst wird gemeinsam mit Herrn Müller, Herrn Voigt und Herrn Kotschenreuther die Versuche für seinen Teilbereich planen und überwachen. Zusätzlich wird er die bei Junghans microtec durchzuführenden Arbeiten einlasten und überwachen.

7 Müller, Uwe

Herr Müller ist bei Freudenberg GmbH & Co. KG im Geschäftsfeld Dichtung und Schwingtechnik tätig. Zusammen mit Herrn Dr. Pannhorst, Herrn Voigt und Herrn Kotschenreuther wird er die Versuchsreihen für seinen Teil planen und überwachen. Herr Müller ist verantwortlich für die Arbeiten welche bei Freudenberg durchgeführt werden sollen.

8 Voigt, Thomas

Herr Voigt ist Gruppenleiter bei der Robert Bosch GmbH im Werk Homburg / Saar im Bereich Dieselsysteme. In diesem Projekt wird er mit Herrn Dr. Pannhorst, Herrn Müller und Herrn Kotschenreuther die Versuchsreihen für seinen Arbeitsbereich planen und überwachen. Herr Voigt ist für die Einlastung und Überwachung der Arbeiten bei der Robert Bosch GmbH verantwortlich.

9 Grieb, Walter

Herr Grieb ist im Betriebsmittelbau der Junghans microtec angestellt. Ihm obliegt die operative Durchführung der geplanten Aktivitäten bei der Firma Junghans microtec. Zudem ist Herr Grieb für die Überprüfung des Strukturkataloges auf seine Eignung hin verantwortlich und gibt das Feedback an seinen Vorgesetzten und an das Institut für Produktionstechnik.

10 Olaf Nahrwold

Der Techniker bei der Freudenberg GmbH & Co. KG ist für die Durchführung (Koordination) der Aktivitäten, Erprobung der verschiedenen Werkzeuge durch Abformversuche zuständig und versorgt das Institut für Produktionstechnik mit entsprechenden Probekörpern. Auf der Mitarbeiterebene wird der Techniker die für die Firma Freudenberg relevanten Teile des Strukturkataloges überprüfen und wendet sich mit Feedback an seinen Vorgesetzten und an das Institut für Produktionstechnik.

11 Dipl.-Ing. (BA) Florian Grenz

Der Techniker in der Betriebsmittelbauabteilung der Robert Bosch GmbH im Werk Homburg/Saar ist für die Ausführung der für die Firma Bosch geplanten Aktivitäten im Rahmen des Teilprojektes T1 verantwortlich und versorgt das Institut für Produktionstechnik mit geeigneten Proben. Zudem ist der Techniker für die Überprüfung des Strukturkataloges auf seine Eignung hin verantwortlich und gibt das Feedback an seinen Vorgesetzten und an das Institut für Produktionstechnik.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die beantragte Förderperiode (Ergänzungsausstattung):

12-14 Dipl.-Ing. Christoph Ruhs, Marco Deuchert, Florian Ambrosy

Die genannten Personen arbeiten als wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik. Sie sind für die Organisation des Gesamtprojekts sowie für die Planung und Durchführung der Versuche für die Zerspanung und für die Funkenerosion am Institut für Produktionstechnik verantwortlich. Ihnen obliegen die Durchführung von Messungen und die Auswertung der Messergebnisse. Zusammen mit den Projektpartnern erstellen sie Veröffentlichungen und dokumentieren die Arbeitsfortschritte.

15 Hildenbrand, Thomas

Herr Hildenbrand arbeitet als Techniker am Institut für Produktionstechnik. Herr Hildenbrand verfügt über langjährige Erfahrung im Bereich der Laserablation und kann die wissenschaftlichen Mitarbeiter bei den abtragenden Verfahren mit der Versuchsdurchführung unterstützen. Zudem kann er kompliziertere Messaufgaben übernehmen und für die Versuchsreihen der Laserablation und der Funkenerosion beratend zur Verfügung stehen.

7.1 Allgemeine Angaben zum Transferprojekt T2

7.1.1 Titel: Fertigungsnaher Mikro-Qualitätssicherung

7.1.2 Projektleitung

Lanza, Gisela, Prof. Dr.-Ing., geb. 04.08.1973, deutsch
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Produktionstechnik (wbk)
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe

Telefon: 0721/608-44017
E-Mail: Gisela.Lanza@kit.edu

Bis 20.08.2008:

Fleischer, Jürgen, Prof. Dr.-Ing., geb. 07.01.1961, deutsch
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Produktionstechnik (wbk)
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe

Telefon: 0721/608- 44009
E-Mail: Juergen.Fleischer@kit.edu

7.1.3 Kooperationspartner

Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH

Bader, Ferdinand, Dipl.-Ing (FH)
73446 Oberkochen
Telefon: 07364 / 20-8897
E-Mail: f.bader@zeiss.de

Mitarbeiter: 1.300
Umsatz: 280.000.000 €

Die *Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH*, ein Unternehmen der *Carl Zeiss Gruppe*, hat ihren Hauptsitz in Oberkochen. Das Unternehmen ist Weltmarktführer bei CNC-Koordinatenmessmaschinen und Komplettlösungen der mehrdimensionalen Messtechnik für die unterschiedlichsten Industriebereiche. In den drei Fertigungsstandorten und mehr als 100 Vertriebs- und Service-Zentren sind rund 1.300 Beschäftigte für die Kunden weltweit tätig. *Carl Zeiss 3D Metrology Services GmbH* ist eine hundertprozentige Tochtergesellschaft der *Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH* und ist mit etwa 140 Mitarbeitern für Dienstleistungen rund um die Messtechnik verantwortlich. *Carl Zeiss* ist eine weltweit führende internationale Unternehmensgruppe der optischen und optoelektronischen Industrie.

Q-DAS GmbH & Co. KG

Dietrich, Edgar, Dr.-Ing.
Eisleber Str. 2, 69469 Weinheim
Telefon: 06201 / 3941-0
E-Mail: edgar.dietrich@q-das.de

Mitarbeiter: 32
Umsatz: 6.400.000 €

Q-DAS ist ein international tätiges Softwarehaus, das sich mit der Abbildung statistischer Verfahren auf Rechnersystemen beschäftigt. Dabei stehen insbesondere Problemlösungen aus dem Bereich des Qualitätsmanagements im Vordergrund. In diesem Zusammenhang sind die Programmpakete qs-STAT®, procelia® und destra® entstanden. Diese Produkte orientieren sich an der gültigen Normung und unterstützen marktgängige Richtlinien sowie Standards. Darüber hinaus wirkt(e) die Firma Q-DAS in den Arbeitskreisen und Ausschüssen ISO/TC 69 (Statistik) zur Erarbeitung der Norm ISO 21747, dem Normenausschuss „Angewandte Statistik“ DIN, im VDA1, im VDA5 und im VDI GMA Ausschuss 1.12 aktiv mit: Die erarbeiteten Ergebnisse werden in praxisnahen Fachbüchern und Fachzeitschriften veröffentlicht.

7.2 Entwicklung des Teilprojekts

7.2.1 Bericht

Ausgangssituation und Zielsetzung

Die Mikrofertigungsverfahren und die zur Qualitätsbeurteilung erforderliche Mikromesstechnik ermöglichen in vielen Branchen neue und innovative Anwendungen. Durch die immer weiter voranschreitende Miniaturisierung von Bauteilen konnten einerseits neue Sektoren erschlossen werden, andererseits zeigten sich jedoch Forschungsdefizite. Da die herkömmlichen Verfahren der üblichen Makrofertigung im Mikrometerbereich an ihre Grenzen stoßen, werden neue Konzepte für die Mikrofertigung und die Messtechnik im Mikrometerbereich benötigt. Ein Ziel der Qualitätssicherung ist es, auf Grundlage der Messergebnisse den Fertigungsprozess zu regeln, um eine stabile und qualitativ hochwertige Fertigung gewährleisten zu können. Aufgrund der geringen Größe der Bauteile bzw. ihrer Toleranzen stellt dies ein erhebliches Problem dar. Die Sensortechnik und damit die gesamten Messprozesse weisen eine, im Vergleich zu den engen Spezifikationen im Mikrometerbereich, erhebliche Messunsicherheit auf. Um Fertigungsprozesse unter solchen Bedingungen regeln zu können, ist eine Trennung bei den erfassten Messdaten bezüglich der Mess- und Fertigungsprozessstreuung erforderlich, wozu neue Handlungsrichtlinien und Werkzeuge zu entwickeln sind.

Im Sonderforschungsbereich 499 wurden Messstrategien zur Messung mit Koordinatenmessgeräten (KMG) sowie mikrospezifische Prozessregelungen entwickelt, welche nun im Transferprojekt in der Praxis erprobt werden sollten. Die Zielsetzung ist somit der Aufbau eines IT-unterstützten Werkzeugs zur Ableitung von KMG-Messstrategien für mikrostrukturierten Bauteile. Dies wurde mit dem Industriepartner Carl Zeiss in Abhängigkeit des Fertigungsprozesses und den zugrunde liegenden Messdaten durchgeführt, um dem Anwender eine daraus resultierende Empfehlung bezüglich der zu wählenden Messstrategie geben zu können. Zudem wurde der Einfluss fertigungsbedingter Gestaltabweichungen und anderer signifikanter Umweltfaktoren in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Carl Zeiss auf das Messunsicherheitsbudget abgeschätzt und modelliert. Gemeinsam mit Q-DAS wurde eine Implementierung einer statistischen Prozessregelung und einer Optimierung von Fertigungs- und Messprozess angestrebt, um eine robuste Mikroproduktion zu ermöglichen.

Methode und eingesetzte Ergebnisse aus anderen Teilprojekten des Sonderforschungsbereichs

Die im Teilprojekt C4 „Mikroprozesskettengerechte Qualitätssicherung“ des Sonderforschungsbereichs 499 entwickelten theoretischen Methoden und Grundlagen wurden im Transferprojekt T2 umgesetzt und sofern sinnvoll und möglich validiert. Die relevanten Bereiche des Teilprojekts C4 beinhaltet drei Schwerpunkte, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden: der entwickelte Microfeature-Katalog, die dimensionelle Mikromesstechnik sowie eine statistische Prozessregelung für Mikrofertigungsprozesse.

Microfeature-Katalog:

Zunächst wurde der Microfeature-Katalog [1, 2], ein mikroprozesskettengerechtes Informationsmanagementwerkzeug, erstellt, um die interdisziplinären Erfahrungen und Informationen zu strukturieren. Die qualitätsrelevanten Informationen (z. B. Prozessparameter, Analysen über Form, Maß, Lage, Oberflächengüte etc.) in den Bereichen Konstruktion, zerspanende bzw. abtragende Werkzeugherstellung der Formeinsätze, formgebende Urformverfahren und Qualitätssicherung, sind im Microfeature-Katalog strukturiert, analysiert sowie verdichtet und durch eine ASP.NET-Webanwendung in eine prozessübergreifende Informationsplattform implementiert. Hierdurch können Messstrategien verglichen und Empfehlungen [1, 2, 3] über die Messungen an Mikrobauteilen abgeleitet werden, wodurch der Teil der Qualitätssicherung im Microfeature-Katalog einen Schwerpunkt darstellt und eine Basis für das Transferprojekt T2 bildet. In Abbildung 1 ist ein Screenshot des entwickelten Microfeature-Katalogs dargestellt.

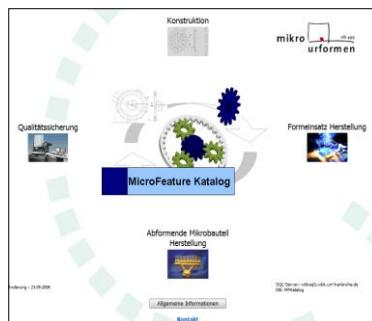


Abbildung 1: Anwendergerechte Informationserfassung im Microfeature-Katalog

Dimensionelle Mikromesstechnik:

Der Auf- und Ausbau der dimensionellen Mikromesstechnik bildet den zweiten Schwerpunkt. Unter Einsatz des Multisensor-Koordinatenmessgeräts Werth Video Check HA 400, welches speziell der Erfassung von Mikrostrukturen dient, konnten Messstrategien in der Mikromesstechnik bezüglich der Anforderungen der betrachteten Bauteile und Bauteildimensionen sowie der Abmessung der funktionsrelevanten Qualitätsmerkmale entwickelt und verbessert werden [4, 5]. Durch die Messung ungeformter Mikrokomponenten und die weitgehende Automatisierung der Messung konnten weitreichende Erfahrungen gesammelt und der Messprozess fehlerresistenter gestaltet werden [5, 6]. Nach der Durchführung einer experimentellen Messunsicherheitsbestimmung an kalibrierten werkstückähnlichen Messobjekten [7] gemäß DIN 15530-3, konnte die Messunsicherheit abgeschätzt und ein Messunsicherheitsbudget erstellt werden. Die hier gewonnenen Erkenntnisse konnten im Rahmen des Transferprojekts T2 validiert werden.

Mikroprozessgerechte statistische Prozessregelung:

Der dritte Schwerpunkt behandelt das Thema der Prozessregelung und -analyse im Mikrometerbereich. Die im Makrobereich verwendete Statistische Prozessregelung (SPC) setzt eine im Verhältnis zu Fertigungsstreuung kleine Messstreuung voraus. In der Mikromesstechnik kann oft die "goldene Regel der Messtechnik" (Messunsicherheit \leq Toleranz/10) nicht eingehalten werden. Dies führt zu einer stärkeren Bedeutung der Messunsicherheit im Mikrometerbereich, da sie in Relation zu den Spezifikationen einen großen Anteil darstellt und den für die Mikrofertigung nutzbaren Bereich deutlich einschränkt. Um dieses Effekt zu berücksichtigen, wurde im SFB 499 eine Methode zur mikroprozessgerechten statistischen Prozesskontrolle erarbeitet [8, 9].

Ist die Messstreuung in Bezug auf die Toleranzen gering, so wird davon ausgegangen, dass die beobachtete Prozessstreuung (Überlagerung von Prozess- und Messstreuung) relativ nahe an der tatsächlichen Prozessstreuung liegt. Ist dagegen die Messstreuung in Bezug auf die Toleranzen groß, so weicht mit hoher Wahrscheinlichkeit die beobachtete von der tatsächlichen Prozessstreuung signifikant ab. Abbildung 2 zeigt diesen Zusammenhang.

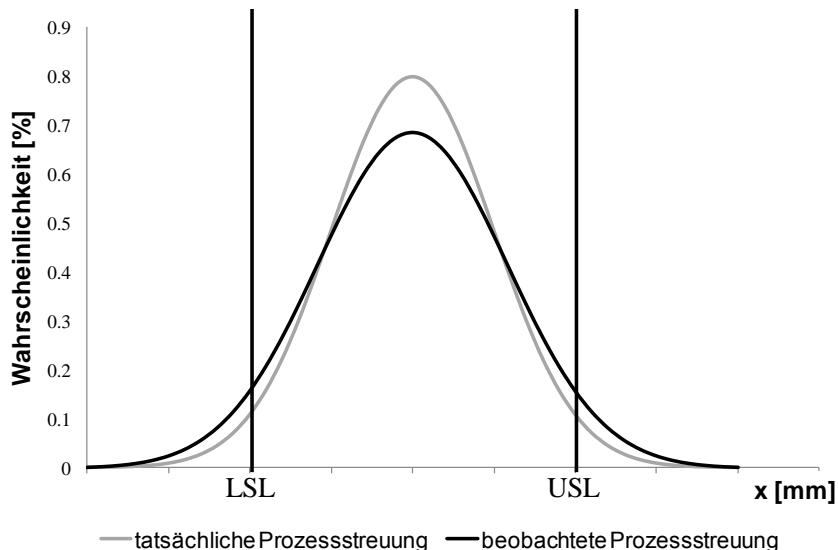


Abbildung 2: Überlagerung von Prozessverteilung und Messstreuung

Da die Messstreuung und die Prozessstreuung in der Mikrofertigung in der gleichen Größenordnung sein können, entsteht der Bedarf nach einem neuen Qualitätsregelkartendesign, welches eine simultane Quantifizierung, Visualisierung und Trennung des Fertigungs- und Messprozesses ermöglicht [8, 9]. Die im SFB 499 TP C4 entwickelte μ -EWMA-Qualitätsregelkarte (EWMA engl. exponentially weighted moving average) trägt auf der Abszisse die Stichprobenmittelwerte der aktuellen Qualitätsmerkmale und auf der Ordinate, durch wiederholte Messungen am gleichen Messobjekt, die Standardabweichung auf. Somit können die Trends und Störungen des Fertigungsprozesses sowie die des Messprozesses visualisiert und gesteuert werden. Diese Werte werden gepaart und in einem gemeinsamen Diagramm mit neuer Eingriffsgrenze übertragen. Diese Methode erleichtert die Übersicht, um mögliche Fertigungs- und Messprozessstörungen und Trends zu erkennen. In Abbildung 3 ist die entwickelte μ -EWMA-Qualitätsregelkarte dargestellt.

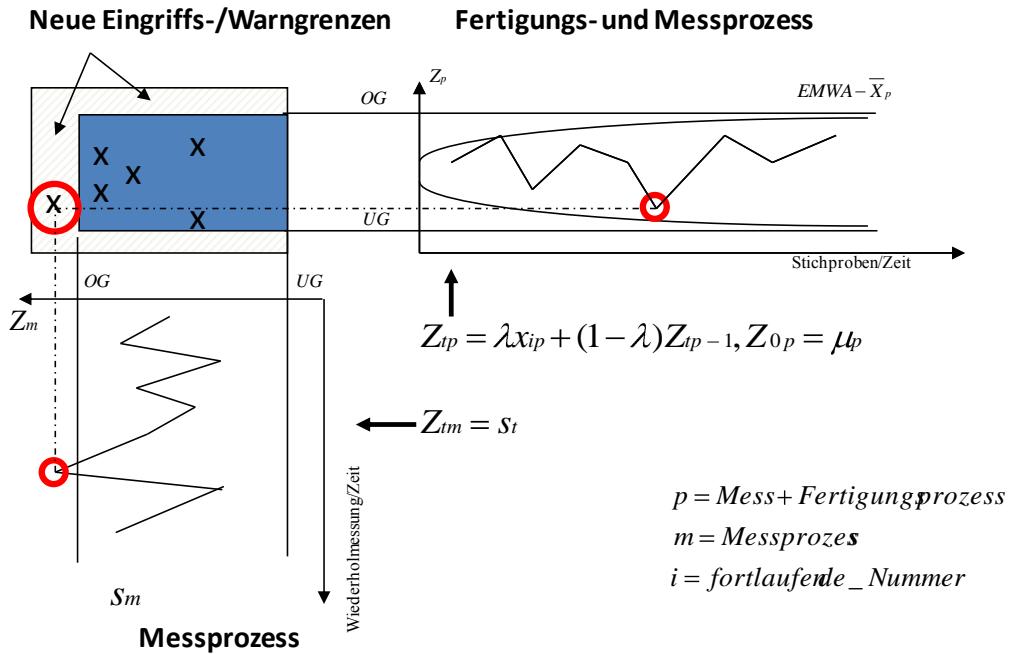


Abbildung 3: Multivariate Qualitätsregelkarte für den Mess- und Fertigungsprozess

Um eine differenzierte Ursachenanalyse von Fertigungs- und Messprozess durchführen zu können, wurde noch ein Gewichtungsfaktor λ_t ($0 < \lambda_t < 1$) der EWMA-Qualitätsregelkarte hinzugefügt. Dieser wird in Abhängigkeit von der zugrunde liegenden zeitlich varierenden Messstreuung $\sigma_{M,t}$ verwendet.

$$\lambda_t = f \sigma_{M,t} \text{ mit } \lambda_t \uparrow \text{ wenn } \sigma_{M,t} \downarrow \text{ und } \lambda_t \downarrow \text{ wenn } \sigma_{M,t} \uparrow \quad (0 < \lambda_t < 1)$$

In umfangreichen Simulationsstudien wurde gezeigt, dass die Leistungsfähigkeit der multivariaten EWMA-Qualitätsregelkarte in Bezug auf die Average Run Length (ARL) die beste Lösung im Vergleich zu den bisher genutzten Qualitätsregelkarten und die Einzige, welche eine Trennung von Mess- und Fertigungsprozessstreuung zulässt und somit eine Ursachendiagnose möglich macht, ist.

Beschreibung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen des DFG-Transferprojekts T2 der Firmen Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH und der Q-DAS GmbH & Co. KG in Zusammenarbeit mit dem wbk Institut für Produktionstechnik wurden die Methoden und Grundlagen aus dem Teilprojekt C4 des SFB 499 in der Praxis erprobt und überarbeitet. Hierbei wurden verschiedene Themen gestaffelt bearbeitet.

IT-Datenbank als Unterstützung zur Entwicklung mikrogerechter Messstrategien:

Das erste Themengebiet beschäftigt sich mit der Wahl der Messstrategie durch den Messmaschinenbediener. Die Auswahl der richtigen Messstrategie ist entscheidend, um Messabweichungen in Submikrometerbereich zu erzielen. Da die Methoden und Strategien aus dem Makrobereich nicht direkt übertragbar sind und ein hohes Maß an Expertenwissen und Erfahrung bei der Entscheidung erforderlich ist, wurde als Ziel eine anwendungsorientierte Wissensbasis für Messaufgaben im Mikrometerbereich definiert. Um dieses Wissensbasis greifbar zu machen wurde in Zusammenarbeit mit der Firmen Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH und Q-DAS GmbH & Co. KG eine IT-basierte Erfahrungsdatenbank entwickelt, um das Wissen aufzunehmen, zu strukturieren und nach Bedarf abrufbar zu machen (siehe Abbildung 4).

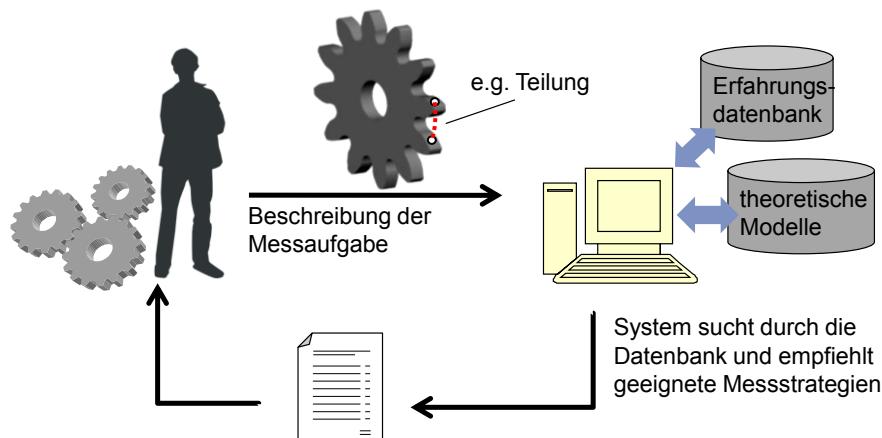


Abbildung 4: Intelligentes anwenderunterstützendes System [15]

Das Rückgrat des unterstützenden Systems bildet die rationale Datenbank, welche Informationen über bisherige Messstrategien für bestimmte Prüfmerkmale speichert. Jede Messung wird hierbei archiviert, wobei nicht nur die Resultate aufgenommen werden, sondern auch das eingesetzte Messgerät, Sensoren, Messstrategie sowie die Sensorparameter. Um einen möglichst breiten Anwendungsbereich zu garantieren, wurden die Definitionen von Sensoren und ihrer Parameter flexibel aufgebaut. Wie Abbildung 5 zeigt, können mehrere Messstrategien für ein Prüfmerkmal definiert werden. Für jede Messung kann darüber hinaus das Messergebnis gespeichert werden. Hierbei werden bei jeder Messstrategie Informationen wie z.B. verwendete Sensoren und Parametereinstellungen festgehalten.

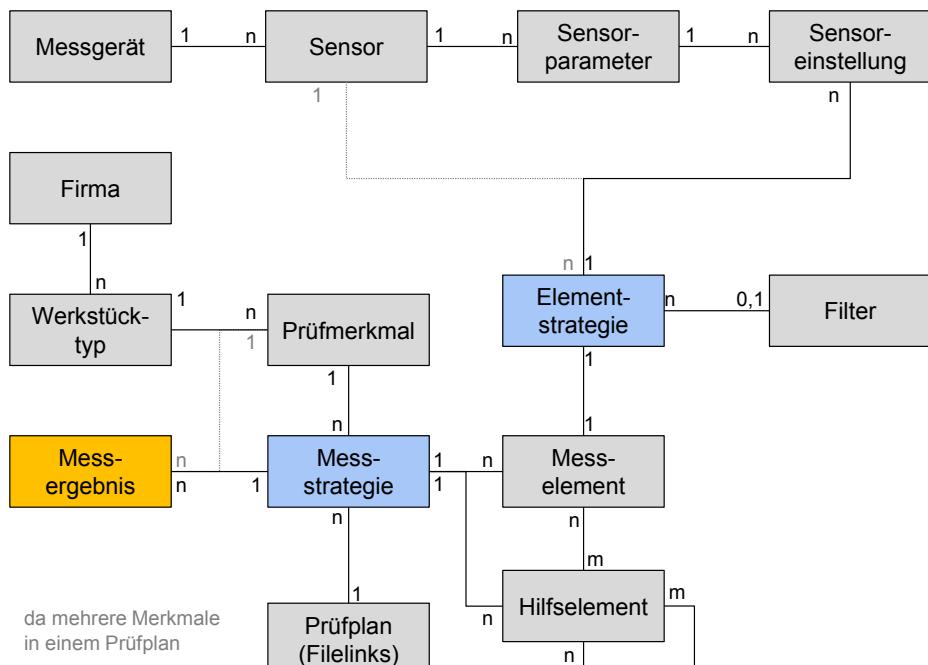


Abbildung 5: Datenbankstruktur

Die entwickelte Datenbank ermöglicht es dem Anwender übersichtlich und einfach eine Messstrategie zu finden, welche seinen Ansprüchen gerecht wird. Dies erfolgt über eine integrierte Suchfunktion, welche auf die in der Datenbank gespeicherten Daten zurückgreift, nach ausgesuchten Merkmalen filtert und nach Relevanz sortiert. Die einzelnen möglichen Suchkriterien umfassen beispielsweise Prüfmittel, Soll- und Ist-Werte, geometrische Grundform oder die verwendeten Sensoren. Durch die implementierte Suchfunktion kann der Anwender von der gespeicherten Expertenerfahrung profitieren (siehe Abb. 6). Somit haben die Firmen Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH und Q-DAS GmbH & Co. KG sowie das wbk Institut für Produktions-technik ein funktionsfähiges Tool erstellt, welches dem Kunden unabhängig von der gewählten Hardware oder dem jeweiligen Hersteller eine breite Palette an Möglichkeiten bietet und mit einem innovativen System durch den Auswahlprozess führt [10].

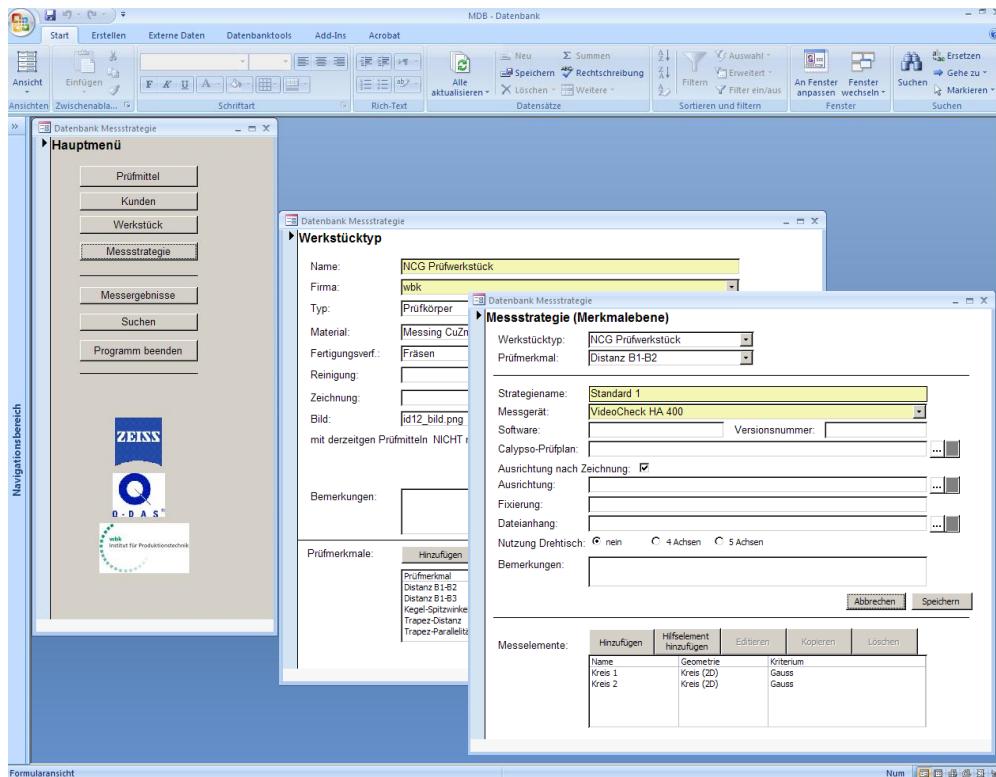


Abbildung 6: Implementierung des Empfehlungsassistenten für Messprozesse in MS-Access

Antaststrategien für formabweichungsbehaftete Mikrobauteile:

Abweichungen des Messobjektes von der idealen Form üben einen deutlichen Einfluss auf Messergebnis und Messunsicherheit in der Mikro-Koordinatenmesstechnik aus. Dabei existieren grundlegende Abhängigkeiten zwischen den Formabweichungen des Messobjektes, der gewählten Antaststrategie, sowie der Art der Auswertung der Messdaten. In der Mikro-Koordinatenmesstechnik werden diese Abhängigkeiten besonders deutlich, da Mikrostrukturen und mikrostrukturierte Bauteile im Vergleich zur Strukturgröße große Formabweichungen bei einer sehr engen Tolerierung aufweisen. Durch die Auswertung des formabweichungsbehafteten Messobjekt mit Hilfe der Einpassung von idealgeometrischen Ausgleichselementen in die Messpunktewolke kommt es zu einer Beeinflussung des Messergebnisses von einzelnen Messpunkten. Somit können selbst wenige Messpunkte mit einer geringen Auslenkung aus ihrer idealen Lage das Messergebnis signifikant verzerrn. Aus diesem Grund muss von einer Unsicherheit der Gesamtauswertung, hervorgerufen durch Formabweichungen in Verbindung mit der Einpassung von idealgeometrischen Ausgleichselementen, ausgegangen werden, s. Abbildung 7 [11, 12, 18].

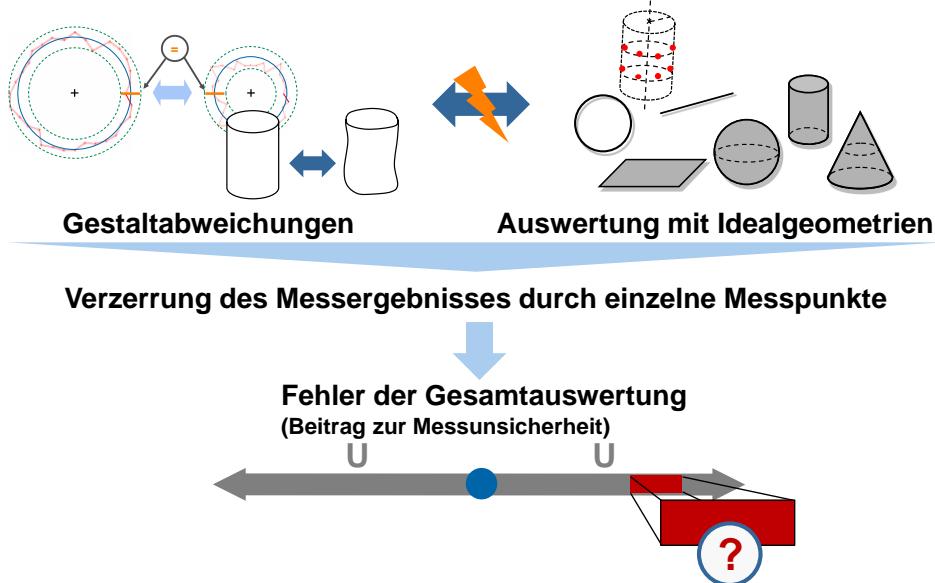


Abbildung 7: Einfluss von Formabweichungen auf Messergebnis und Messunsicherheit

Ein Lösungsansatz zur Bestimmung und Quantifizierung dieser Unsicherheit besteht in der Bewertung des Einflusses jedes einzelnen Punktes auf das Messergebnis und der anschließenden Ermittlung des Standardfehlers. Hierfür wurde das statistische Resampling-Verfahren „Jackknife“ ausgewählt. Statistische Resampling-Verfahren nutzen die in einer gezogenen Stichprobe (sampling) enthaltenen Daten, um durch das Erzeugen von Teilmengen aus der Stichprobe (resampling) Informationen über einen statistischen Schätzer zu erlangen. Da die Verteilung und die verschiedenen Parameter einer Grundgesamtheit häufig unbekannt sind und sich nur mit großem Aufwand bzw. in einigen Fällen überhaupt nicht direkt bestimmen lassen, kann der Wert eines bestimmten Parameters der Grundgesamtheit nur mit Hilfe einer Schätzfunktion über den Schätzer bestimmt werden. Beim Jackknife-Resampling Verfahren werden n Teilmengen mit einem Umfang von jeweils k Beobachtungen durch die bewusste Herausnahme einer Beobachtung aus der Stichprobe (Messpunktewolke) erzeugt. Aus den einzelnen Jackknife-Teilmengen lassen sich anschließend die Teilstichprobenschätzer bestimmen [13].

Handelt es sich bei der Stichprobe um eine für die Grundgesamtheit repräsentative Stichprobe, so kann die Varianz in den Daten der Grundgesamtheit auch in der Stichprobe und damit ebenfalls in den erzeugten Teilmengen wiedergefunden werden. Basierend auf den Teilstichprobenschätzern können damit sowohl die Verzerrung (Bias) als auch der Standardfehler des Schätzers berechnet werden. Aus diesen Informationen lassen sich anschließend Konfidenzintervalle um den Schätzer ermitteln. In Abbildung 8 wird die exemplarische Anwendung des Jackknife-Resampling Verfahrens an einer Messpunktewolke aus einer Messung der Bohrung eines Mikrozahnrades mit den entsprechenden Ergebnissen dargestellt. In diesem Beispiel wurden insgesamt acht Messpunkte an dem kreisförmigen Messobjekt aufgenommen. Die Auswertung des Radius r erfolgt durch die Berechnung eines Ausgleichskreises nach Gauß [13].

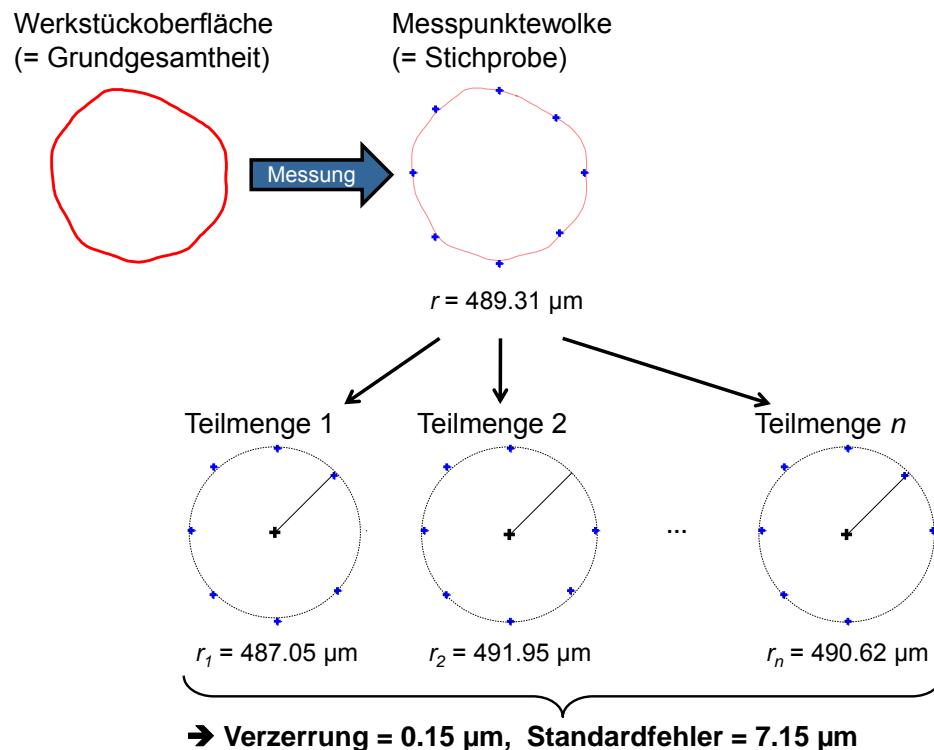


Abbildung 8: Anwendung des Jackknife-Resampling-Verfahrens am Beispiel der Bohrung eines Mikrozahnrades [14]

Erfolgt die Auswertung zu Beginn noch mit allen Messpunkten, wird zur Bestimmung der Radien jeweils ein Messpunkt bei der Berechnung des Ausgleichskreises der Teilmengen aus der Punktwolke entfernt. Aus den dargestellten Teilmengenradien ist im Vergleich zum errechneten Radius aus der Stichprobe ein deutlicher Einfluss der Formabweichungen des Messobjekts auf das Messergebnis erkennbar [14]. In dem gewählten Beispiel beträgt die Verzerrung $0,15 \mu\text{m}$ bzw. der Standardfehler des Schätzers $7,15 \mu\text{m}$.

Die Vorteile des Jackknife-Resampling Verfahrens zeigen sich darin, dass für seine Anwendbarkeit keine Annahmen über die Verteilung der Grundgesamtheit (z. B. Normalverteilung) oder Unabhängigkeit der Beobachtungen angenommen werden müssen. Für aussagekräftige Ergebnisse sollte die Grundstichprobe jedoch ein repräsentatives Bild der Messobjektoberfläche wiedergeben. Durch die dargestellte Anwendung des Jackknife-Resampling Verfahrens auf die Messpunktewolke eines Messobjekts lässt sich der Beitrag des Auswerteverfahrens zur Messunsicherheit mithilfe der Verzerrung und des Standardfehlers des Schätzers bestimmen.

Um den Ansatz zu validieren und Modelle für den Einfluss verschiedener Arten von Formabweichungen zu bilden wurde eine Simulationsstudie durchgeführt. Hierbei wurde der Einfluss der simulierten Gestaltabweichung, wie z. B. eine sinusförmige Welle oder eine Abplattung, auf das Messergebnis abgebildet, Abbildung 9.

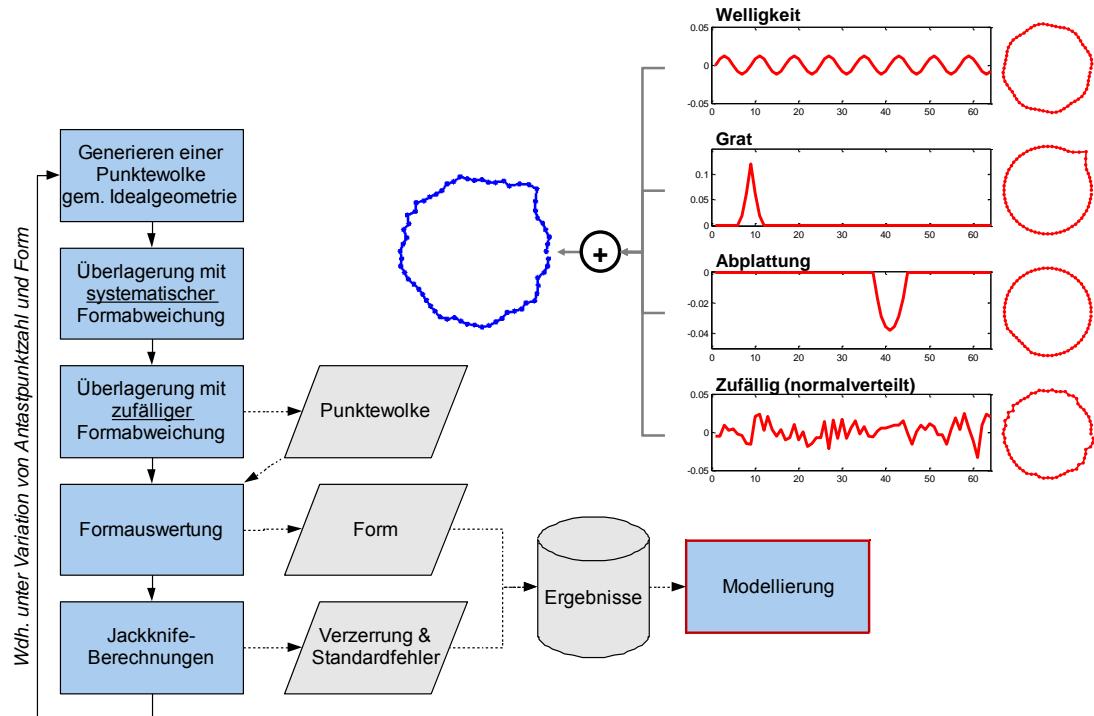


Abbildung 9: Simulationsstudie zur Modellbildung

Mit den folgenden Simulationsergebnissen wird für die Parameter des Ausgleichskreises in 2D das Verhalten der Auswerteunsicherheit beschrieben und analysiert. Der untersuchte Geometrieparameter ist der Radius r eines 2D-Kreises mit zufällig normalverteilter Formabweichung. Die Ergebnisse des Simulationsszenarios bestätigen, dass die aufgestellte Modellfunktion eine sehr gute Anpassung an das beobachtete Verhalten von u_{eval} darstellt.

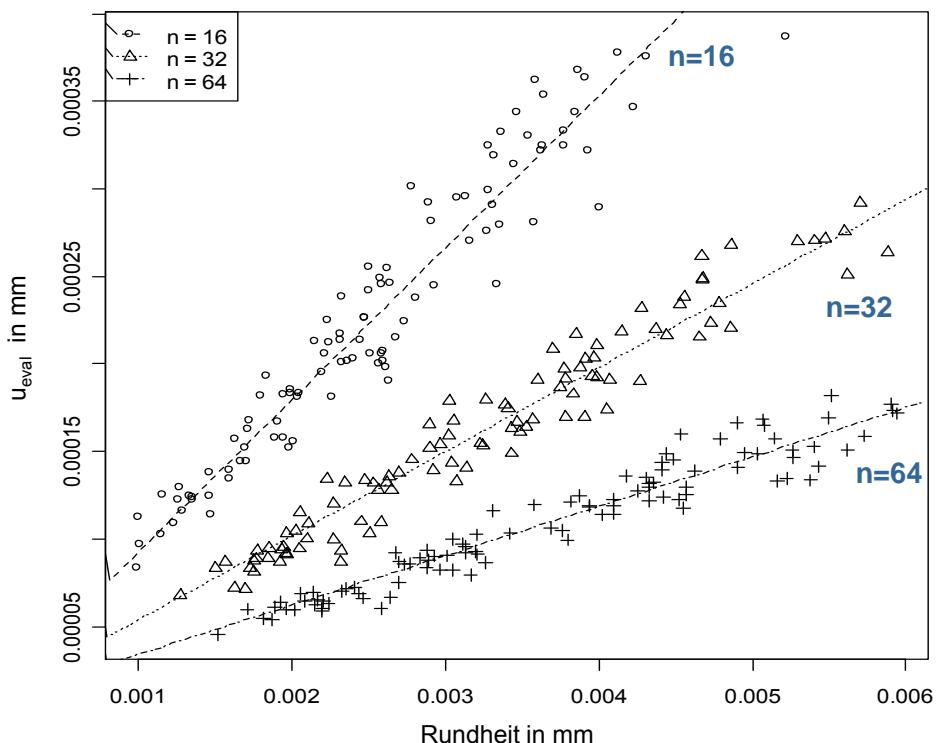


Abbildung 10: Ergebnis aus der Simulationsstudie [14]

Das auf theoretischen Überlegungen aufgebaute Modell ist sehr gut in der Lage, das Verhalten der Auswerteunsicherheit u_{eval} in den Ergebnissen der Simulation abzubilden. u_{eval} steigt mit zunehmendem Formwert. Darüber hinaus liegen die Unsicherheitswerte für eine größere Anzahl verwendeter Messpunkte unter den Werten mit weniger Messpunkten. Diese Differenz wird umso kleiner, je geringer die beobachtete Formabweichung ist. Die Modellgeraden der untersuchten Messpunktanzahlen schneiden sich in der Nähe zum Ursprung des Koordinatensystems. Dies entspricht der theoretischen Überlegung, dass die Anzahl der Messpunkte bei einem idealen Messelement keinen Einfluss auf die Unsicherheit der Auswertung hat und die ermittelte Unsicherheit u_{eval} für alle Messpunktanzahlen gleich 0 ist. Darüber hinaus ist zu beobachten, dass die Streuung der Simulationsergebnisse um die Modellgeraden mit zunehmender Formabweichung steigt. Das Verhalten der durch das Jackknife-Verfahren ermittelten Auswerteunsicherheit u_{eval} entspricht also den Erwartungen [14].

Somit wurde durch dieses Verfahren eine effektive Möglichkeit zur Wahl und Berechnung von Antaststrategien und Messpunkten entwickelt, da dieser Lösungsansatz mehrere entscheidende Vorteile in der praktischen Anwendung aufweist. Zum einen lässt das Resampling von Daten eine Analyse der Einzelpunkteinflüsse zu, welche zur Quantifizierung des Formeinflusses des Werkstücks auf die Messunsicherheit zur Bestimmung von Formabweichungen und Fehlern im Antastvorgang verwendet werden kann. Zum anderen ist dieses Verfahren flexibel anwendbar und benötigt keine Annahmen über die Normalverteilung und Unabhängigkeit der Abweichungen von der Idealgeometrie. Zudem werden für dieses Verfahren keine aufwändige Wiederholmessung oder die Erstellung eines Simulationsmodells für die Durchführung benötigt, was eine Automatisierung der Auswertung von Einzelpunktmessdaten erlaubt und sowohl die Stabilität als auch die Laufzeit verbessert und gleichzeitig ermöglicht, einen Vorschlag für die Mindestanzahl an Antastpunkten für Antaststrategien vorzuschlagen [14]. Das Verfahren ist daher in Auswertesoftware für Messdaten implementierbar und birgt eine große Interpretationshilfe.

Statistische Prozessregelung und -optimierung für Mikrofertigungsprozesse:

Um die Funktionalität von mikromechanischen Bauteilen zu gewährleisten, werden die geometrischen Toleranzspezifikationen meist im einstelligen Mikrometer- oder sogar im Submikrometerbereich gewählt. Eine flexible geometrische Messtechnik, die es erlaubt, solche komplexen dreidimensionalen Mikro-Qualitätsmerkmale mit einer Messunsicherheit von 10-15% des Toleranzbandes (wie im Makrobereich gefordert) zu charakterisieren, ist bisher nicht vorhanden.

Um der erhöhten Bedeutung der Messunsicherheit in der Mikrowelt Rechnung zu tragen bzw. um das Ziel, einen Fertigungsprozess basierend auf Messdaten, überwachen und regeln zu können, muss aus den Messdaten die Streuung des Messsystems und des Messprozesses extrahiert werden. Findet diese Extraktion nicht statt, so unterliegt man der Gefahr, nicht den realen Fertigungsprozess sondern eine Überlagerung aus Fertigungs- und Messprozess zu regeln. Der innerhalb des SFB 499 entwickelte Ansatz sieht vor, das Vertrauen in den vorliegenden Messprozess und dessen über die Zeit variierende Güte über die Berechnung der Standardabweichung aus Wiederholmessungen (s_M) zu quantifizieren, s. Abbildung 11.

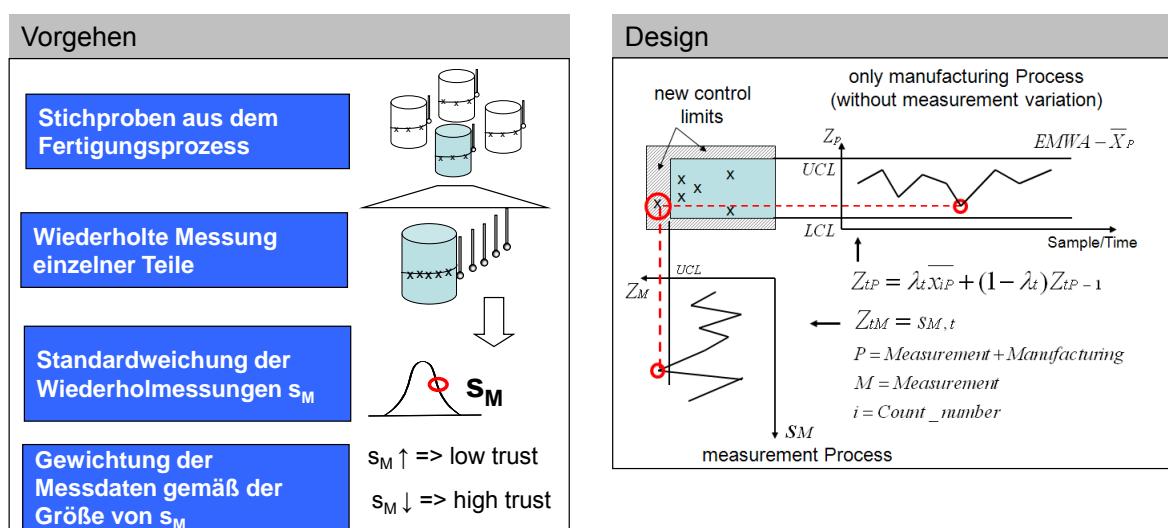


Abbildung 11: Konzept der μ -EWMA-Regelkarte [16]

Es werden also wie in der statistischen Prozessregelung (SPC) üblich, Stichproben aus dem Fertigungsprozess gezogen und charakterisiert (Schritt 1). Ein Bauteil der Stichprobe wird wiederholt gemessen (Schritt 2) und über die aktuelle Messstreuung $s_{M,t}$ wird anschließend die gesamte Stichprobe ($=x_{P,t}$) gewichtet

(Schritt 3). Die Gewichtung der Prüfstatistik $Z_{P,t}$ wird über einen variablen Gewichtungsfaktor λ_t der EWMA (exponentially weighting moving average)-Transformation herbeigeführt [15]. Die Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess erfolgte über die Wahl eines variablen Gewichtungsfaktors λ_t in Abhängigkeit der aktuellen Messstreuung $s_{M,t}$:

$$\lambda_t = f(s_{M,t}) \quad \text{mit } \lambda_t \downarrow \text{falls } s_{M,t} \uparrow \text{ und } \lambda_t \uparrow \text{falls } s_{M,t} \downarrow (0 < \lambda_t < 1)$$

$$\lambda_t = \lambda_{\max} \cdot 1 / (\lambda_{\max} / \lambda_0)^{s_{M,t} / s_{M,\text{Ref}}}$$

wobei λ_{\max} , λ_0 und $s_{M,\text{Ref}}$ verfahrensabhängige Konstanten sind. Diese Berechnungsvorschrift und der prädiktive Regler wurden in ein multivariates Qualitätsregelkartendesign überführt und in der Statistiksoftware R implementiert, s. Abbildung 12.

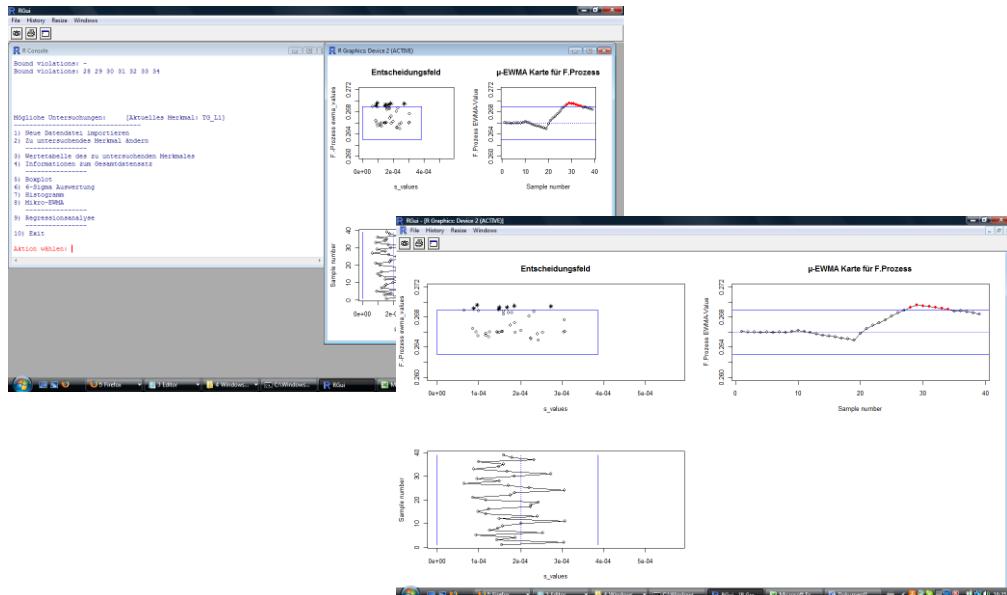


Abbildung 12: Prototype-Implementierung in R

Am Beispiel der Mikrozerspanung konnte schon in Teilprojekt C4 des SFB499 gezeigt werden, dass die Kombination von Regelungstechnik und SPC zusammen mit der Trennung der Streuung von Fertigungs- und Messprozess die fertigungsnahe Qualitätssicherung einzelner Mikrofertigungsprozesse erlaubt [16]. Des Weiteren wurde im Rahmen des Tranferprojekts die entwickelte multivariate Qualitätsregelkarte für Mikrofertigungsprozesse erfolgreich in die Software der Q-DAS GmbH & Co. KG prototypisch implementiert, siehe Abbildung 13.

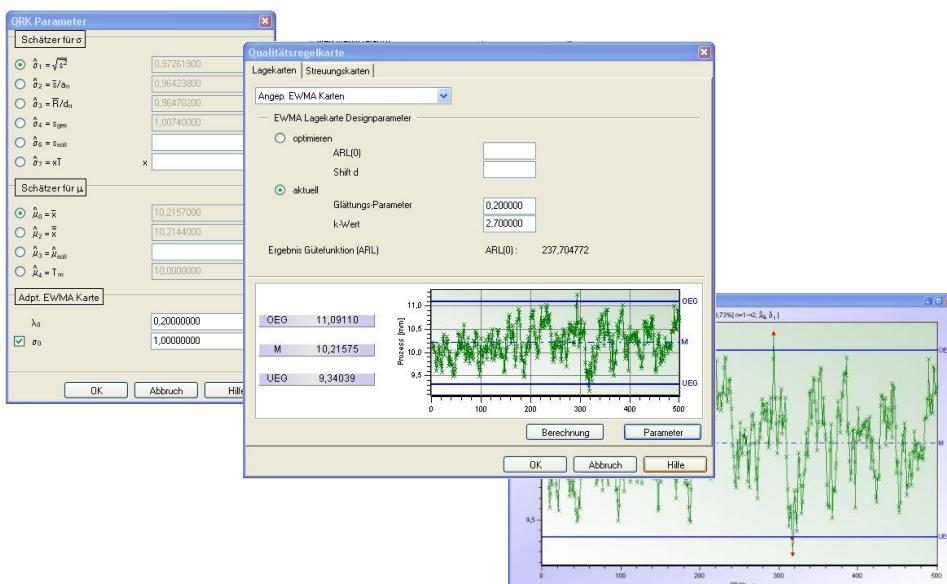


Abbildung 13: Prototypische Implementierung der μ -EWMA-Karte in qs-STAT

Zur Validierung der Implementierung wurden Testdaten verwendet um beide Implementierungen zu vergleichen. Die Ergebnisse der Implementierung bei Q-DAS stimmen, bis auf Rundungsfehler, mit den wbk-Ergebnissen überein.

Des Weiteren wurde im Rahmen des Projekts der Einsatz verschiedener Data-Mining-Verfahren zur Identifikation von Prozessverbesserungsmöglichkeiten untersucht. Die Herausforderung hierbei bestand in der Bestimmung der Korrelationen zwischen den einzelnen Parametern und den damit verbundenen Qualitätsmerkmalen. Diese können über Experimente bestimmt werden, wobei hier der Aufbau und die Wiederholbarkeit der Experimente entscheidend sind. Grundsätzlich bieten sich zwei Methoden an, solche Experimente durchzuführen. Zum einen kann versucht werden, das gleiche Experiment mehrfach möglichst identisch zu wiederholen und die hierbei entstandenen Ergebnisse zu interpretieren. Da solche Versuche jedoch zum einen teuer und zum anderen zeitintensiv und aufgrund des Mikrobereichs schwer identisch zu wiederholen sind, ist ein solches Vorgehen nur in Ausnahmesituationen ratsam. Um die Durchläufe zur Bestimmung der Parameter möglichst gering zu halten, kann ein anderes Verfahren verwendet werden. Hierbei werden Experimente mit zufällig verteilten Parametern als Messbasis herangezogen und diese Ergebnisse durch eine multiple Regressionsanalyse interpretiert. Ein solches Vorgehen kann, wie in Abbildung 14 dargestellt, durchgeführt werden [17].

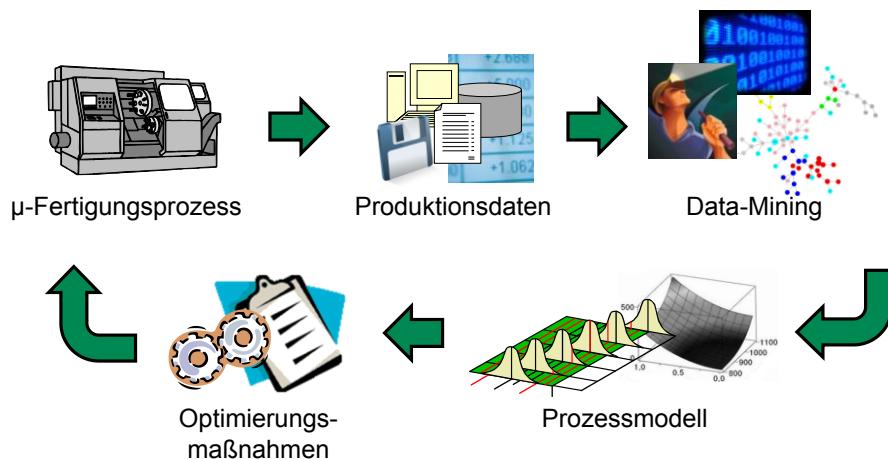


Abbildung 14: Prozessmodellierung und -optimierung durch Data-Mining

Im Rahmen des Projekts wurden Untersuchungen anhand vorhandener Prozess- und Qualitätsdaten des Prozesses Mikrosinterfügen aus dem SFB 499 durchgeführt. Hiermit konnte ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Temperatur des Sinterofens und dem maximal vom Bauteil auszuhaltenden Innendruck der Proben festgestellt werden [17].

7.2.1.1 Verwertungspotential

Aufgrund des wachsenden Markts der Mikrosystemtechnik und der steigenden Anforderungen für die Qualitätssicherung kleinster Bauteile wird ein großes Verwertungspotential gesehen. Grundsätzlich stammt ein Großteil der angewandten Methoden aus dem Bereich der Messtechnik, was eine Weiterentwicklung der Methodik in Zusammenarbeit mit entsprechend spezialisierten Industriepartnern interessant macht. Hierbei erscheint besonders die weitere Übertragung entwickelter theoretischer Ansätze in die Praxis interessant.

Die Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH schätzt den entwickelten Ansatz zu systematischen Aufnahme von Erfahrungswissen als sehr wertvoll ein. Vor allem sieht sie Potential bei der automatischen Auswahl einer geeigneten Messstrategie auf multisensorische Messgeräte. Sie streben eine Anbindung der entwickelten Erfahrungsdatenbank mit ihrer Messmaschinensoftware Calypso an. Hierfür wird derzeit eine Schnittstelle zu Calypso implementiert. Des Weiteren möchte Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH den Ansatz weiterentwickeln und auf die industrielle Computertomographie übertragen.

Mit der Implementierung der entwickelten μ -EWMA-Karte in das Software Programm QS-STAT der Q-DAS GmbH & Co. KG konnte eine weitere Übertragung der Ansätze in die Industrie erfolgreich durchgeführt werden. Darüber hinaus wurde die Arbeit an der Entwicklung der Methode zur statistische Prozessregelung und -optimierung von Mikrofertigungsprozessen mit dem Walter-Masing-Preis 2010 ausgezeichnet [18]. Die Q-DAS GmbH & Co. KG hat berichtet, dass sie durch die Preisverleihung eine große Öffentlichkeitswirkung erzielen konnte.

7.2.1.2 Zusammenfassung

Die Bedeutung der Mikrofertigung nimmt in vielen Bereichen, wie der Automobil- und Medizinindustrie, weiterhin stark zu. Sie verlangt jedoch aufgrund des geringen Spezifikationsbereichs in der Mikrofertigung eine hohe Präzision der Fertigungs-, Mess- und Steuerungssysteme. Ziel war es, den Herausforderungen hinsichtlich der Bestimmung der Messstrategien, der vorhandenen Varianzen und Abweichungen in den Messprozessen und der Aufbereitung der Messdaten zu begegnen. In verschiedenen Themenbereichen wurden diese Aufgaben durch die Unternehmen Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH und der Q-DAS GmbH & Co. KG in Zusammenarbeit mit dem wbk Institut für Produktionstechnik durchgeführt.

Es wurde eine Datenbank mit Hilfe der Erfahrung der Firma Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH in der Messtechnik entwickelt. Die mittels Expertenwissen erstellte Datenbank ermöglicht es dem Anwender, mögliche Messgeräte sowie Umgebungsbedingungen zu deklarieren und hierdurch eine Empfehlung durch das System für eine geeignete Messstrategie zu erhalten. Die Möglichkeit einzelne Messergebnisse sowie in der Vergangenheit eingesetzte Messstrategien durch die Suchfunktion zu finden, erleichtert die Benutzung.

Durch das wbk Institut für Produktionstechnik und die Messtechnik der Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH wurde eine Methode entwickelt, welche die Messunsicherheit bei formabweichungsbehafteten Bauteilen durch das statistische Resampling-Verfahren „Jackknife“ für Standardgeometrieobjekte angibt. Diese Methode ermöglicht es besonders auffällige Punkte zu klassifizieren und gibt für die jeweilige Geometrie eine bestimmte Antaststrategie, sowie die benötigte Anzahl an Antastpunkten an. Diese Methode wurde durch das wbk Institut für Produktionstechnik in eine Software implementiert, welche die direkte Berechnung eines Unsicherheitsmessbudgets und Empfehlungen für die Antaststrategien in Abhängigkeit der geometrischen Objekte zulässt.

Zuletzt wurde eine μ -EWMA-Qualitätsregelkarte entwickelt. Hierdurch lässt sich eine Trennung der Mess- und der Fertigungsstreuung durchführen und ein Eingriff in den Prozess kann bereits vor dem Verletzen einer Eingriffsgrenze vorgenommen werden. Durch das neuartige, innovative Layout der μ -EWMA-Qualitätsregelkarte lässt sich der Handlungsbedarf zur Verringerung der Streuung des Fertigungsprozesses ableiten. Durch die Implementierung dieser Karte in ein Softwaresystem, welches von Q-DAS GmbH & Co. KG und dem wbk Institut für Produktionstechnik entwickelt wurde, kann eine direkte, zeitsparende und kostengünstige Regelung von Mikrofertigungsprozessen stattfinden.

Literaturverzeichnis

- [1] Fleischer, J.; Spath, D.; Elsner, J.: Integrative Qualitätssicherung von Mikrobauteilen mittels Microfeatures. In: Hesselbach (Hrsg.): Kolloquium Mikroproduktion, Vulkan Verlag, (2003), ISBN 3-8027-8670-x, S. 161-171
- [2] Elsner, J.: Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse. Dissertation Universität Karlsruhe (TH), 2003
- [3] Fleischer, J.; Behrens, I.; Peters, J.; Schlipf, M.: Hilfssystem unterstützt bei Messablaufplanung von Mikroteilen - Charakterisierung kleinstter Strukturen. in: Mikroproduktion (2006), Nr. 4, S. 63-64
- [4] Fleischer, J.; Behrens, I.: Quality Assurance in Micro Production - Chances and Challenges - . in: Conference Proceedings of the 5th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 8.-11. Mai 2005, Montpellier, Frankreich, S. 687-690
- [5] Fleischer, J.; Behrens, I.: Quality Assurance and Dimensional Measurement Technology. in: Micro-Engineering in Metals and Ceramics – Design, Advanced Replication Techniques and Properties, Special Edition of „Advanced Micro and Nanosystems“ Vol. 3, VCH Wiley Verlag, 2005, S. 499-519
- [6] Fleischer, J.; Schlipf, M.; Deuchert, M.; Dieckmann, A.-M.: Process Chain for the Manufacturing of Micro Parts and Molds. Conference Proceedings 7th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN), May 20th - May 24th 2007, Bremen, Germany, S. 177-180
- [7] Fleischer, J.; Behrens, I.: The Challenge of Estimating Measurement Uncertainty for the Dimensional Measurement of Micro Parts on CMMs. 8th International Symposium on Measurement and Quality Control in Production, Erlangen, 12.-15.10.2004. In: VDI-Berichte 1860: Measurement and Quality Control in Production, S. 257-264
- [8] Fleischer, J.; Lanza, G.; Schlipf, M.: Statistical Quality Assurance in High Precision Engineering. Conference Proceedings 6th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN), May 28th - June 1st 2006, Baden bei Wien, Austria
- [9] Lanza, G.; Fleischer, J.; Schlipf, M.: Statistical Process and Measurement Control for Micro Production. Conference Proceedings 7th International Workshop on High-Aspect-Ratio Micro-Structure Technology (HARMST), S. 145/146 7-9th June 2007, Besancon, France

7.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

- a) Arbeiten, die in Publikationsorganen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung zum Zeitpunkt der Antragstellung erschienen oder endgültig angenommen sind, und Buchveröffentlichungen:**
- [10] Lanza, G.; Peters, J.; Kippenbrock, K.: Experience-based user support system for the measurement of micro-mechanical parts. 10th International Conference on the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, 31.05.–04.06.2010, Delft, Netherlands, Conference Proceedings Vol I, ISBN 13: 978-0-9553082-8-4, S. 100-103
 - [11] Lanza, G.; Peters, J.: Impact of Workpiece Shape Deviations on the Evaluation Process in Coordinate Metrology. 11th International Conference on Computer Aided Tolerancing, 26.-27.03.2009, Annecy, France, Herausgeber/Veranstalter CIRP, Band Proceedings, S. B3/1-6
 - [12] Lanza, G.; Peters, J.: Impact of Workpiece Shape Deviations in Coordinate Metrology. in: ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc, London, UK; New York, USA, Giordano, M.; Mathieu, L.; Villeneuve, F., Product Lifecycle Management - Geometric Variations, 2010, S. 405-418
 - [13] Lanza, G.; Viering, B.; Kippenbrock, K.; Stockey, S.: Messunsicherheit als bedeutende Größe in der Mikroproduktion. in: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 100 (2010), Heft/Band 11/12, Verlag Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 875-879
 - [14] Peters J.: Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik. Dissertation Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 2010, ISBN-13: 978-3832292393
 - [15] Fleischer, J.; Lanza, G.; Schlipf, M.: Statistical quality control in micro-manufacturing through multivariate μ -EWMA chart. in: CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008), p. 521–524
 - [16] Schlipf M.: Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile. Dissertation Universität Karlsruhe (TH), 2009, ISBN 978-3-8322-8058-1
 - [17] Lanza, G.; Fleischer, J.; Viering, B.; Klimscha, K.; Kippenbrock, K.; Stockey, S.: Data Mining Approach for Identifying Optimal Process Parameters in Micro-Manufacturing. 11th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, 23.-27.05.2011, Como, Italy, Conference Proceedings Vol II, ISBN 978-0-9553082-9-1, S. 467-470
- b) Andere Veröffentlichungen**
- [18] Schlipf, M.; Lanza, G.; Dietrich, E.; Schulze, A.: Heilsame Trennung. QZ Jahrgang 55, 2010 10, S. 68-71
 - [19] Lanza, G.; Peters, J.: Challenges and User Support in Micro Coordinate Metrology. 1st International F25 User Meeting, Oberkochen, June 3rd-4th, 2008
- c) Patente, gegliedert nach angemeldet und erteilt.**
- entfällt -

7.2.3 Dokumentation weiterer Aktivitäten

Während des Vorhabens erfolgte die Qualifikation von wissenschaftlichem Nachwuchs im Rahmen mehrerer wissenschaftlicher Arbeiten sowie durch die Beschäftigung mehrerer wissenschaftlichen Hilfskräfte. Des Weiteren wurde durch die enge Kooperation mit Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH die Ausbildung von Studenten der Fachrichtungen Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) unterstützt. Am 16. Dezember 2009, 8. Dezember 2010 sowie am 9. Januar 2012 fand eine Exkursion der Qualitätsmanagementvorlesung bei Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH in Oberkochen statt. Hierbei haben jeweils ca. 50 Studenten Einblicke in die Produktion von industriellen Koordinatenmessgeräten bekommen. Darüber hinaus hat Herr Ferdinand Bader am 26.04.2010 im Rahmen der Seminarreihe des SFB 499 einen Vortrag zum Thema „Messen von Mikroteilen: Besonderheiten-Voraussetzungen-Lösungen“ in Karlsruhe gehalten. Dadurch konnten auch weitere Wissenschaftler des SFB499 über die Herausforderungen der Mikromesstechnik erfahren.

7.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wurde seit Anfang Juli 2008 im Sonderforschungsbereich gefördert. Es wurde zum Ende Juni 2011 beendet.

7.3.1 Personal im Transferprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

laufende Nummer	Name, akademischer Grad, Dienststellung	engere Fachzugehörigkeit	Institut der Hochschule oder der außeruniversitären Einrichtung	Mitarbeit im Projekt in Wochenstunden	Kategorie
Grundausstattung					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	1 Lanza, Gisela; Prof. Dr.-Ing.; Bereichsleiter	Wirtschaftsingenieurwesen	KIT / wbk	8	
	2 Fleischer, Jürgen; Prof. Dr.-Ing.	Maschinenbau	KIT / wbk	4	
Nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	3 Raab, Manfred Techniker		KIT / wbk	4	
Kooperationspartner					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	4 Hoppe, Dipl.-Ing., Produktmanager	Maschinenbau/ Messtechnik	Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH	2	
	5 Stark, Dipl.-Ing (FH), Anwendungstechniker	Feinwerktechnik/ Messtechnik	Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH	6	
	6 Bader, Dipl.-Ing (FH), Anwendungstechniker	Maschinenbau/ Messtechnik	Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH	2	
	7 Schad, Anwendungstechniker	Maschinenbau/ Messtechnik	Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH	2	
	8 Dietrich, Dr.-Ing., Geschäftsführer	Elektrotechnik/ Statistik	Q-DAS GmbH & Co. KG	2	
	9 Schulze, Dipl.-Ing., Geschäftsführer	Maschinenbau/ Statistik	Q-DAS GmbH & Co. KG	5	
	10 Paetzold, Dr.-Ing., Entwickler	Maschinenbau/ Statistik	Q-DAS GmbH & Co. KG	15	
beantragte Ergänzungsausstattung					
Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler	11 Peters, Jochen; Dipl.-Wi.-Ing.; wissenschaftlicher Mitarbeiter	Wirtschafts-Ingenieurwesen Produktionsinformatik	KIT / wbk	39,5	TVL E13
	12 N.N.	Maschinenbau	KIT / wbk	19,25	SH
Nichtwissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	13 Hildenbrand, Thomas; Techniker		KIT / wbk	39,5	TVL E9

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die beantragte Förderperiode

Grundausstattung:

(1) **Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza**

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza leitet den Forschungsbereich Produktionssysteme am Institut für Produktionstechnik (wbk) und hat die wissenschaftliche Federführung des Transferprojektes inne. Sie gewährleistet mit Ihrem Fachwissen im Bereich der Qualitätsprognose von Fertigungsprozessen die weiterführende Planung und Entwicklung von mikrospezifischen Qualitätssicherungsmethoden.

(2) Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer hat die Leitung des Transferprojektes gemeinsam mit Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza inne. Zugleich unterhält er Kontakte zu anderen Teilprojektleitern und Institutionen des Sonderforschungsbereichs zwecks Förderung der kooperativen Zusammenarbeit.

(3) Manfred Raab

Herr Manfred Raab unterstützt als Techniker die messtechnischen Aufgaben in Bezug auf konstruktive Ergänzungen für Spannmittel im Teilprojekt.

*Kooperationspartner:***(4) Mario Vizcaino-Hoppe**

Herr Mario Vizcaino-Hoppe ist Produktmanager „Optische Koordinatenmessgeräte“ des Geschäftsbereichs „Systeme“ bei der Firma Carl Zeiss, Industrielle Messtechnik GmbH und übernimmt die Projektkoordination seitens der Firma Carl Zeiss, Industrielle Messtechnik. Herr Vizcaino-Hoppe ist Spezialist für die Entwicklung von Multisensor-KMGs und deren Peripherie und wird seine Erfahrung in das Transferprojekt T2 einbringen.

(5) Dipl.-Ing. (FH) Christoph Stark

Herr Dipl.-Ing. (FH) Christoph Stark ist Anwendungstechniker der Firma Carl Zeiss, Industrielle Messtechnik im Bereich KMG-Mikromesstechnik. Herr Stark ist an der Entwicklung des KMG F25 beteiligt und beschäftigt sich mit der praktischen Anwendung der F25 auf industrielle Messaufgaben. Im Transferprojekt T2 trägt Herr Stark mit seinen umfangreichen Erfahrungen im Bereich der Messtechnik und dem Messprozess an der Entwicklung der Messstrategien bei.

(6) Dipl.-Ing. (FH) Ferdinand Bader

Herr Dipl.-Ing. (FH) Ferdinand Bader ist Anwendungstechniker der Firma Carl Zeiss, Industrielle Messtechnik im Bereich KMG-Mikromesstechnik. Herr Bader ist sowohl an der Entwicklung des KMG F25 als auch des KMG O-Inspect beteiligt und ist Experte für die taktile Messtechnik. Im Transferprojekt T2 trägt Herr Bader mit seinen umfangreichen Erfahrungen im Bereich der taktilen Messtechnik und dem Messprozess an der Entwicklung der Messstrategien bei.

(7) Roland Schad

Herr Roland Schad ist Anwendungstechniker der Firma Carl Zeiss, Industrielle Messtechnik im Bereich KMG-Mikromesstechnik. Herr Schad ist an der Entwicklung des KMG O-Inspect beteiligt und ist Experte für optische Sensoren. Im Transferprojekt T2 trägt Herr Schad mit seinen umfangreichen Erfahrungen im Bereich der optischen Messtechnik und dem Messprozess an der Entwicklung der Messstrategien bei.

(8) Dr.-Ing. Edgar Dietrich

Dr.-Ing. Edgar Dietrich ist Geschäftsführer der Firma Q-DAS GmbH & Co KG und übernimmt die Projektkoordination seitens der Firma Q-DAS. Herr Dr.-Ing. Dietrich hat umfangreiche Erfahrungen in der statistischen Qualitätssicherung und ist ein ausgewiesener Experte in den Themengebieten Prozess- und Prüfmittelüberwachung.

(9) Dipl.-Ing. Alfred Schulze

Dipl.-Ing. Alfred Schulze ist Geschäftsführer der Firma Q-DAS GmbH & Co KG und übernimmt die Projektkoordination seitens der Firma Q-DAS. Herr Schulze hat umfangreiche Erfahrungen in der statistischen Qualitätssicherung und statistischen Optimierung und ist ein ausgewiesener Experte in der programmtechnischen Umsetzung statistischer Verfahren. Herr Schulze ist darüber hinaus Mitglied in verschiedenen Gremien und Ausschüssen der Themen Messunsicherheit und statistischer Prozessregelung.

(10) Dr.-Ing. Frank Paetzold

Herr Dr.-Ing. Frank Paetzold ist Entwickler in der Firma Q-DAS GmbH & Co KG. Herr Dr. Paetzold war an der Entwicklung und Implementierung des Q-DAS Messunsicherheitsdesigners und der Statistischen Versuchsplanungssoftware destra beteiligt und trägt durch sein Anwendungswissen im Bereich der statistischen Qualitätssicherung zur Messunsicherheitsmodellierung und Statistischen Mikroprozessregelung im Transferprojekt bei.

*Ergänzungsausstattung:***(11) Dipl.-Wi.-Ing. / Jochen Peters**

Herr Dipl.-Wi.-Ing. Jochen Peters ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter für die Planung, Koordination und Durchführung der in Abschnitt 3.4 präzisierten Forschungsarbeiten im Transferprojekt T2 sowie für die Kooperation mit den Industriepartnern verantwortlich.

(12) N.N. (studentische Hilfskraft)

Aufgabe der studentischen Hilfskraft (N.N.) ist die Unterstützung von Mitarbeiter Nr. 8 bei der statistischen Auswertung des Datenmaterials und bei der Durchführung organisatorischer Aufgaben. Ebenso soll er einen eng abgegrenzten Teil der Implementierungsaufgaben übernehmen.

(13) Thomas Hildenbrand

Herr Thomas Hildenbrand bringt seine langjährige Erfahrung in der Messtechnik mit ein und unterstützt die Erweiterungen der Messeinrichtungen sowie die Optimierung der Messabläufe.

7.1 Allgemeine Angaben zum Transferprojekt T3

7.1.1 Titel: Verschleißsimulation tribologisch beanspruchter Systeme

7.1.2 Projektleitung

Kraft, Oliver, Prof. Dr. rer. nat., geb. 04.11.1964, deutsch
Universität Karlsruhe (TH), Institut für Zuverlässigkeit von Bauteilen und Systemen
Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe

Telefon: 0721 / 608-4363
E-Mail: oliver.kraft@imf.fzk.de

Huber, Norbert, Prof. Dr.-Ing., geb. 20.01.1968, deutsch
(Mittragsteller TP D4 und seit Apr. 06 assoziiertes Mitglied)
Helmholtz-Zentrum Geesthacht GmbH
Max-Planck-Str. 1, 21502 Geesthacht

Telefon: 04152 / 87-2500
E-Mail: norbert.huber@hzg.de

7.1.3 Kooperationspartner

Treutler, Christoph P.O., Dr. rer.nat., geb. 10.05.1952
Robert Bosch GmbH, Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung
Abteilungsleiter „Physikalische Technologien“ CR/ART
Postfach 10 60 50, 70049 Stuttgart
Telefon: 0711 / 811-6308
E-Mail: christoph.treutler@de.bosch.com

Die Robert Bosch GmbH ist eines der größten Industrieunternehmen Deutschlands. Bosch erreichte im Jahr 2006 einen Umsatz von rund 44 Mrd. €, rund 74% davon entfielen auf das Ausland. Anfang 2007 beschäftigte das Unternehmen rund 260 000 Mitarbeiter, 42% davon in Deutschland. Die überdurchschnittlich hohen Aufwendungen für Forschung und Entwicklung (3,3 Mrd. € im Jahr 2006) bilden die Grundlage der Innovationskraft des Unternehmens, die durch jährlich mehr als 2000 Patentanmeldungen belegt wird.

7.2 Entwicklung des Transferprojekts

7.2.1 Bericht

Ausgangssituation und Zielsetzung

Das Teilprojekt D4 und das daraus beantragte Transferprojekt T3 repräsentieren einen wichtigen Teil der Prozessentwicklungskette für die Vorhersage der Lebensdauer tribomechanisch belasteter Bauteile. Im SFB 499 betrifft dies in erster Linie das Planetengetriebe mit den stark beanspruchten Lagerkontakte und Zahnenflanken; für Bosch sind DLC-beschichtete Komponenten in Einspritzpumpen von zentraler Bedeutung für die Lebensdauer des Gesamtsystems. Ausgehend von Modellversuchen mit einfachen Probekörpern wird eine möglichst präzise Voraussage der tatsächlich erreichbaren Lebensdauer in prototypischen Komponententests angestrebt. Mit Hilfe von Simulationsverfahren kann damit unterstützend in die Prozesskette eingegriffen werden, bevor diese mit großem Aufwand in die Praxis umgesetzt wird. Dies erlaubt eine Verkürzung teurer und langwieriger Iterationsschleifen, die die gesamte Prozesskette angefangen von der Werkstoffauswahl über die Herstellungsverfahren komplexer Bauteile bis zur Prüfung von Prototypen umfasst.

Die im vorausgegangenen Teilprojekt D4 „Verschleißsimulation“ des SFB 499 entwickelten Simulationswerkzeuge waren zu Beginn des Transferprojektes in der Lage, den zeitlichen Fortschritt von Verschleiß tribologisch beanspruchter Systeme quantitativ auf der Grundlage des Archard Gesetzes zu berechnen und somit Voraussagen von Lebensdauern zu ermöglichen. Die Berechnungswerkzeuge hierzu lagen bereits in Form von Globalen Inkrementellen Verschleißmodellen für spezielle Geometrien bzw. eines allgemein an-

wendbaren Verschleißprozessors vor, der an kommerzielle Finite-Elemente Software angekoppelt wird. Ziel des Transferprojektes war es, diese Werkzeuge für transiente Probleme zu erweitern, wie sie z.B. bei Getrieben vorliegen. Die Herausforderung bestand darin den Einfluss von Fertigungstoleranzen auf die Lebensdauer komplexer Komponenten, wie z.B. eines Getriebes, infolge unterschiedlich starken Verschleißes berechnen zu können.

Wesentlicher Gegenstand dieses Transferprojekts war es außerdem, frühzeitig durch die Kooperation zwischen dem SFB 499 mit der Robert Bosch GmbH die Umsetzung und praktische Anwendbarkeit der im Teilprojekt D4 entwickelten Methoden zur Vorhersage und Bewertung von Verschleiß in tribologischen Modellsystemen und komplexeren realitätsnahen Systemen, wie z.B. in Nockenantrieben, im industriellen Entwicklungsumfeld zu demonstrieren. Von besonderem Interesse war hierbei die Übertragung der vorhandenen Methoden zur Identifikation von Verschleißmodellen für DLC-beschichtete Komponenten anhand von Stift-Scheibe Triboversuchen auf zeitlich veränderliche tribologische Beanspruchungen zu realisieren.

Der Nachweis der Übertragbarkeit der entwickelten Modelle und Simulationswerkzeuge hat für den beteiligten Industriepartner höchste Relevanz. Teure und zeitaufwändige Triboteste werden damit eingespart und Voraussagen für komplexere Geometrien und Lastgeschichten ermöglicht.

Gleichzeitig war es ein wesentliches Ziel der Kooperation, die Grundlagenforschung im SFB 499 durch spannende Fragestellungen aus der Kooperation heraus zu inspirieren.

Methode und eingesetzte Ergebnisse aus anderen Teilprojekten des Sonderforschungsbereichs

Verschleißprozessor:

Der im SFB 499 entwickelte Verschleißprozessor aus TP D4 (s. z.B. [7] und die dort zitierten Arbeiten) war durch seine modulare Programmierung auf andere Tribosysteme, wie z.B. für die Simulation eines Kugel/Platte Schwingverschleißes oder eines Zylinder/Kolben-Systems erweiterbar. Darüber hinaus sollten über eine effiziente Programmierung auch erheblich komplexere 3D-Modelle mit realistischen Verschleißmodellen berechenbar werden.

Die Erweiterung des Verschleißprozessors erforderte eine Anpassung des existierenden Moduls für einsinnigen Stift/Scheibe-Verschleiß (die Scheibe dreht sich unter einem vertikal belasteten kugelförmigen Stift) auf die Bedingungen des Schwingverschleiß-Versuchs, wie er bei Bosch durchgeführt wird. Hierbei war die Einlaufphase in einem vorgesetzten Schritt zu berücksichtigen. Dabei unterscheiden sich Last, Frequenz und Schwingbreite von dem eigentlichen, nachgesetzten Tribotest. Dies bedeutet eine signifikante Verallgemeinerung des vorhandenen Moduls bezüglich der Lastgeschichte.

GIWM:

Die bereits im SFB 499 mit dem Verschleißprozessor und mit experimentellen Daten aus TP D3 abgesicherten Globalen Inkrementellen Modelle (GIWM) waren auf die speziellen Randbedingungen beim Schwingverschleiß anzupassen. Der Einsatz des GIWM für den Spezialfall des Tribotests Kugel/Platte ermöglichte eine äußerst effiziente Identifikation der Verschleißmechanismen aus den umfangreichen experimentellen Daten von Bosch. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Vergleich zwischen dem GIWM und den Experimenten dienten der Entwicklung des Verschleißmodells. Darüber wurde die Parameterwahl in den Tribotests motiviert und eine gezielte Variation der Lastgeschichten zur Aufklärung zusätzlicher, bisher nicht erfasster Abhängigkeiten ermöglicht. Für die Anpassung des GIWM-Modells auf Schwingverschleiß waren entsprechende Modifikationen im Programm-Code vorzunehmen, die die speziellen Besonderheiten des Experiments berücksichtigen. Im Gegensatz zu dem vorhandenen GIWM-Modell für den Schichtverschleiß im Stift-Scheibe-Experiment konnte für das System Stahl-Kugel/DLC-Schicht davon ausgegangen werden, dass die Stahlkugel deutlich schneller verschleißt, als die DLC-Schicht, so dass aus der Geometrieänderung der Kugel eine sich kontinuierlich ausdehnende kreisförmige Kontaktfläche angenommen werden konnte. Unter dieser Annahme war die Implementierung eines Einlaufvorgangs mit einer variablen Normalkraft, Frequenz und Amplitude in das GIWM realisierbar.

Arbeitsschritte der beteiligten Partner

AP1: Verschleißprozessor-Modul für Schwingverschleiß

1. Erweiterung des Verschleißprozessors

Schwerpunkt des Transferprojekts war die Erweiterung des Verschleißprozessors um ein Modul für den Schwingverschleiß Stift/Scheibe. Im Laufe der Arbeit am Verschleißprozessor profitierte dieses Arbeitspaket erheblich von Entwicklungen der Hard- und Software. Während noch unmittelbar vor Beginn der Förderphase noch auf Hochleistungs-Parallelrechnern gearbeitet werden musste, konnten die Entwicklungsarbeiten

bereits wenige Monate nach Beginn auf einen handelsüblichen Quad-Core PC mit LINUX-Betriebssystem übertragen werden. Mit Ausnahme der rechenintensiven Subroutinen wurde die gesamte Software des Verschleißprozessors von C++ auf Python umgestellt. Python erlaubt eine äußerst elegante Programmierung, die künftig erforderliche Anpassungen in der Software auch von Seiten des Kooperationspartners Bosch ermöglicht. Die ebenfalls zwischenzeitlich in Python verfügbaren Schnittstellen in ABAQUS zum Auslesen der binären (.odb) Ergebnis-Dateien gewährleisten eine 100%ige Kompatibilität des Verschleißprozessors unabhängig von Weiterentwicklungen innerhalb ABAQUS.

Für sämtliche Module des Verschleißprozessors wurde eine Dokumentation zu deren Anwendung inklusive Beispielen bereitgestellt und zusammen mit dem Quellcode an Bosch übergeben. Diese Module sind spezifisch für unterschiedliche Belastungssituationen (Quasi statisch/Transient) und Geometrien (2D/3D) der beiden Kontaktpartner zugeschnitten und umfassen folgende Fälle: I) 2D Transient mit 1a) Transient - Quasi statisch; 1b) Transient – Transient mit den beiden Integrationsoptionen Ipdsdt bzw. CForce (vgl. [1]); Ic) Multipel Transient – Transient; II) 3D Quasi statisch - Quasi statisch. Mit Ausnahme von [1] sei für Details hier auf die Literatur der Vorarbeiten verwiesen, die im Antrag enthalten sind.

2. Effizienter Integrationsalgorithmus CForce

Die Entwicklung der sogenannten „CForce“-Integrationsmethode stellt den wesentlichen grundlagenwissenschaftlichen Fortschritt dar, der für die Bewältigung dieses Arbeitspaketes zwingend notwendig war. Ohne diese neue effiziente Integrationsmethode wäre die Verschleißintegration vollständig transienter Kontaktprobleme für komplexe Systeme, wie die im TP betrachteten Planetengetriebe nicht möglich geworden. Vollständig transient bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Kontaktpunkt für beide Körper im Sinne eines Hertzischen Linienkontakts (2D) auf einen sehr kleinen Oberflächenbereich konzentriert ist und dieser beide Kontaktpartner zeitabhängig als Funktion der Kinematik rasch überstreicht. Die Kinematik wiederum verändert sich nur allmählich mit dem Verschleißfortschritt, weshalb die Kontaktgeschwindigkeits- und Kontaktdruckverteilung in Abhängigkeit des Verschleißfortschritts iterativ berechnet werden muss.

Die CForce Integration geht aus von dem Achard-Gesetz in seiner lokalen Form

$$\frac{dh}{ds} = k_D p \quad (1)$$

hervor, wobei die Verschleißrate dh/ds in Abhängigkeit von Verschleißkoeffizient k_D und dem aktuell anliegenden Kontaktdruck p gegeben ist. Durch Integration über den Gleitweg s kann der Verschleiß h an einem Oberflächenpunkt berechnet werden. Als Lösung ergibt sich das Integral

$$h = k_D \int p ds = k_D \int p(t) \frac{ds}{dt} dt. \quad (2)$$

Gleichung (2) ermittelt den Verschleiß h aus dem Produkt des lokalen Kontakttrucks p und der Gleitgeschwindigkeit ds/dt an einem vorgegebenen Oberflächenpunkt über die Zeit t . Die CForce Methode basiert auf der Idee, die anliegende Druckverteilung so in eine Kontaktkraft zu transformieren, dass ein Integral der Form $\int pdX$ resultiert, welches äquivalent zur Kontaktnormalenkraft F_N der beiden sich berührenden Körper ist. Gelingt dies, so kann die Verschleißintegration direkt durch die aus der FEM-Lösung berechneten Kontaktkraft ersetzt werden, womit die Notwendigkeit der Integration über die Zeit gemäß Gleichung (2) entfällt.

Die Gleitgeschwindigkeit ds/dt ist durch die relative Bewegung der beiden Oberflächen im Kontakt gegeben. Für Geometrien, wie sie in Zahnrädern vorliegen, kann angenommen werden, dass die Kontaktfläche gegenüber den beiden Körpern klein ist (Hertz'scher Kontakt). Die Beziehung zwischen dem Zeitinkrement dt und dem Ortsinkrement dX ist dann durch die Kontaktgeschwindigkeit v_c relativ zum Oberflächenpunkt mit Koordinatensystem X gegeben, wobei X die tangentiale Koordinate im lokalen Koordinatensystem des betrachteten Kontaktkörpers bezeichnet. Also gilt $dX = v_c dt$. Damit kann Gleichung (2) umgeformt werden gemäß

$$h = k_D \int p \frac{ds}{dt} dt = k_D \int p \frac{ds}{dt} \frac{dX}{v_c}. \quad (3)$$

Da die Kontaktfläche klein ist, kann angenommen werden, dass die Kontaktgeschwindigkeit v_c innerhalb der Kontaktfläche näherungsweise konstant ist, d.h. tangentiale elastische Verformungen des Körpers sind vernachlässigbar klein. Die Werte für die Gleitrate ds/dt und die Kontaktgeschwindigkeit v_c sind nur für den kurzen Zeitraum relevant, in dem der Gegenkörper den betrachteten Punkt überstreicht. Sie verändern sich

zwar allmählich im Verlauf des Gleitvorgangs in Abhängigkeit von der Kinematik des Getriebes, jedoch kaum innerhalb des kurzen Moments des Überstreichens eines Oberflächenpunktes. Ihre Veränderung ist vernachlässigbar klein gegenüber der raschen Veränderung des Kontaktdruckes während des Überstreichens von Null bis zum Maximaldruck und wieder zu Null. Es ist daher gerechtfertigt, Gleichung (3) in die folgende Form zu überführen:

$$h(x) = k_D \int p \frac{ds(x)}{dt} \frac{dX}{v_c(x)} = k_D \frac{ds(x)}{dt} \frac{1}{v_c(x)} \int p dX. \quad (4)$$

Das Integral auf der rechten Seite von Gleichung (4) entspricht identisch der Kontaktnormalkraft. Als Konsequenz kann der Verschleiß an jedem beliebigen Ort direkt aus dem Produkt der Größen Gleitgeschwindigkeit, Kontaktgeschwindigkeit und Kontaktkraft berechnet werden. Diese Transformation gemäß Gleichung (4) ist gültig für zweidimensionale Hertz'sche Kontakte, die einen Oberflächenpunkt mit einer Kontaktgeschwindigkeit ungleich Null überfahren. Relevante klassen technischer Systeme, die diese Anforderungen erfüllen, sind insbesondere Nockentriebe und Zahnrädergetriebe.

Die Implementierung der CForce Methode in den Verschleißprozessor sowie eine umfassende analytische und numerische Validierung am Beispiel eines vereinfachten Nockentriebs für mehrere Verschleißinkremente ist in [1] umfassend dargestellt.

Die Software als Produkt von AP1 wurde im Rahmen der Übergabe am 18.01.2010 von den Mitarbeitern des Teilprojekts gemeinsam auf dem LINUX-Parallelrechner von Bosch installiert und konnte unmittelbar ohne weitere Anpassungen erfolgreich in Betrieb genommen werden.

AP2: GIWM für Schwingverschleiß

1. Modellsystem Kugel-Platte

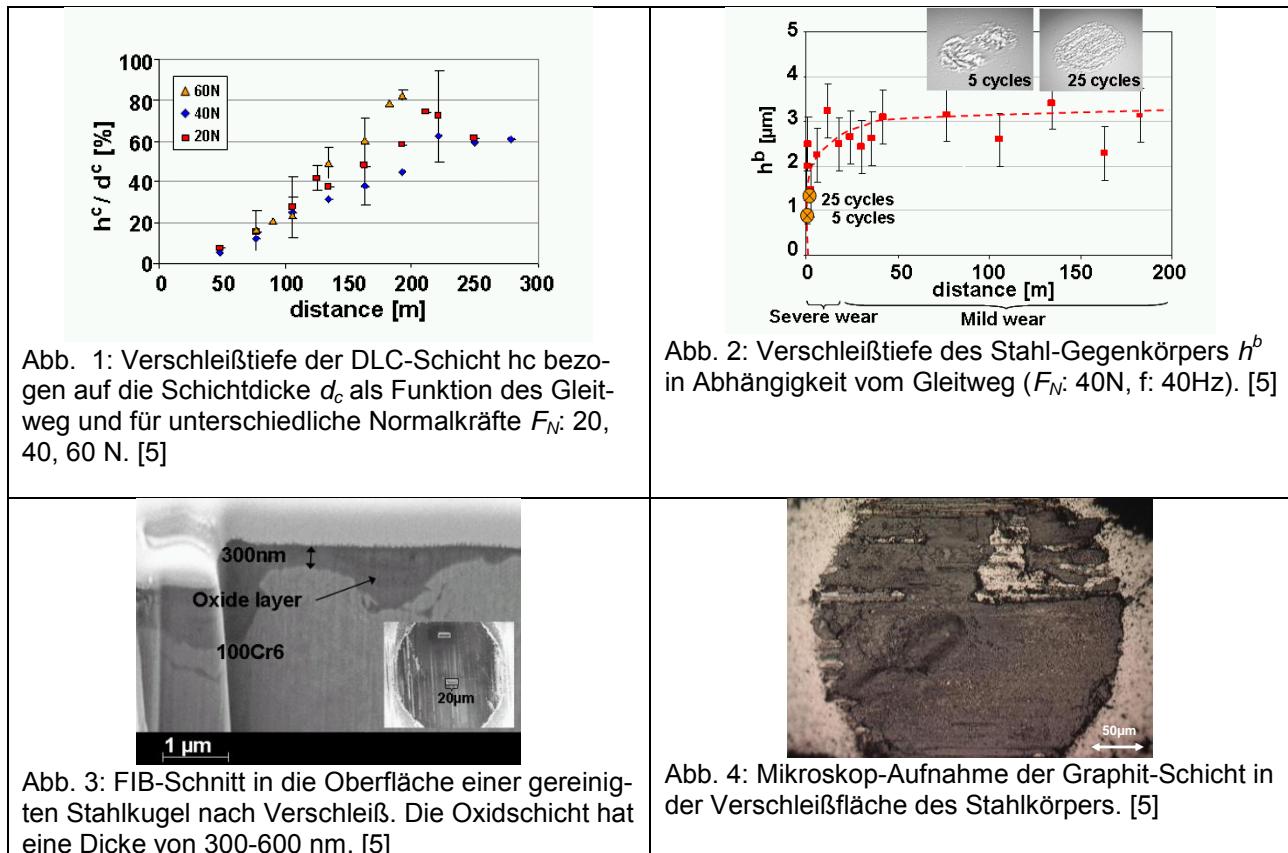
Die Erweiterung des GIWM-Modells für Schwingverschleiß gleich zu Beginn des Transferprojekts war äußerst wichtig für die Analyse der experimentellen Daten und der Planung von ggf. zusätzlichen Experimenten. Gleichzeitig sollte das GIWM für die Verifikation der Verschleißprozessor-Module zur Verfügung stehen. Das Konzept basiert auf der Idee, dass sich die Experimente, die von Bosch an DLC/Stahl durchgeführt wurden, mit dem Archard-Modell vorhergesagt bzw. auf komplexere Systeme übertragen werden können. Abweichungen vom Archard-Modell wurden analysiert und nach genauem Verständnis der verantwortlichen Mechanismen als Modellerweiterung implementiert.

Dieses Konzept bewährte sich im Verlauf der Arbeiten als wahre Fundgrube für die intensive gemeinsame wissenschaftliche Arbeit mit dem Kooperationspartner Bosch. Die Arbeit liefert einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung eines Verschleißmodells, das den notwendigen Transfer der Ergebnisse vom Modell zur Applikation erlaubt. Von der einfachen Kugel-Platte-Modellgeometrie ausgehend wurde ein neuartiges verallgemeinertes Verschleißmodell für ungeschmierte DLC/Stahl-Kontakte entwickelt, welches auf dem dissipativen Energieansatz basiert [3, 7]. Durch die Einführung eines geschichtsabhängigen Verschleißkoeffizienten im Modell konnte die Belastungs- und Geometrieabhängigkeit des Verschleißkoeffizienten einbezogen werden [3, 5]. Es konnte gezeigt werden, dass beim Wechsel auf andere Materialien und Geometrien der Verschleißkoeffizient nicht nachträglich auf veränderten Bedingungen angepasst werden muss [3, 4]. Er ergibt sich als Antwort des Modells auf die Belastungssituation.

Die Experimente dienten hierbei zur Analyse und Identifikation der wichtigsten Verschleißeffekte und Verschleißmechanismen. Verwendet wurde ein Standard Tester SRV3 für oszillierenden Verschleiß. Die getesteten Materialien waren eine 100Cr6 Stahlkugel mit einem Radius von 2mm und einer Mikrohärte von 14 GPa sowie eine Standard DLC-Schicht mit einer Mikrohärte von 24 GPa. Für beide Körper wurde der Verschleißfortschritt in Abhängigkeit des Gleitweges ermittelt. Abbildung 1 zeigt, dass für die DLC-Schicht annähernd lineare Abhängigkeiten zwischen Verschleißtiefe und Gleitweg sowie der aufgewendeten Normalkraft bestehen, was dem Archard-Modell gemäß Gl. (3) entspricht. Für den Stahlgegenkörper ist die Verschleißentwicklung jedoch stark nichtlinear (s. Abb. 2). Zu Beginn gibt es sehr starken Verschleiß und nach wenigen Metern Gleitweg geht die Kurve in ein Plateau über, d.h. der wesentliche Verschleiß des Gegenkörpers findet unmittelbar am Anfang statt. Genau dieses stark nichtlineare Verhalten war der Grund für die nähere Untersuchung der zugrunde liegenden Mechanismen und deren Einbeziehung in die Verschleißmodellierung.

Hierbei spielt die Rauigkeit der DLC-Schicht eine wichtige Rolle. Die hohen Spannungen an den Rauigkeitsspitzen bewirken lokale plastische Verformungen des Gegenkörpers innerhalb der Kontaktfläche. Diese sind in den eingefügten Mikroskop-Aufnahmen in Abb. 2 oben zu erkennen. Im nächsten Schritt formt sich eine Oxidschicht auf der Oberfläche des Stahlkörpers, die mit Hilfe von FIB-Schnitten, REM und XPS nachgewiesen werden konnte (s. Abb. 3). Es konnte eine 300-600 nm dicke Oxidschicht mit vorwiegend Fe_2O_3

gefunden werden, die über ihre höhere Härte eine verschleißschützende Wirkung hat. Anhand von Literaturangaben wurde hier für die Härte ein Faktor 3 gegenüber dem reinen Stahlkörper angenommen. Schließlich konnte über Raman-Spektroskopie die Bildung einer Graphit-Transferschicht auf dem Stahl-Gegenkörper nachgewiesen werden, wie sie in Abb. 4 zu sehen ist.



Das entwickelte Verschleißmodell [3, 5] unterscheidet sich wesentlich von bestehenden Modellen. Zum einen beinhaltet es physikalische Entwicklungsgleichungen zur quantitativen Beschreibung der wesentlichen experimentell bestimmten Mechanismen und tribochemischen Reaktionen. Zu diesen zählen die Oberflächentopographie der beschichteten Probe einschließlich deren Veränderung durch Verschleiß, die elastisch, plastische Verformung vor allem innerhalb der ersten Verschleißzyklen, die Erhöhung der Kontakttemperatur durch die Reibung, die Triboxidation des Stahl-Gegenkörpers sowie die Graphitisierung der DLC-Schicht. Zum anderen ist das Modell das erste Verschleißmodell, das die Berechnung des Verschleißes an beiden Kontaktpartnern ermöglicht. Der Entwicklungsprozess basierte hierbei auf einer wirkungsvollen Kombination von Modellierung, analytischer Verschleißberechnung und experimentellen Modelltests, die in einer iterativen Entwicklungsschleife eng miteinander verbunden wurden. Zu Details des Verschleißmodells und dessen Entwicklung sei hier auf die Lektüre der Referenzen [3, 5] verwiesen.

Als wichtige Errungenschaft ist die Fähigkeit des Modells anzuführen, den Verschleiß für DLC-Schichten unterschiedlicher Herstellung und Härte alleine anhand der Kalibrierung eines zentralen Parameters, des reduzierten Verschleißkoeffizienten \tilde{k}_D^* , für eine der betrachteten Schichten voraussagen zu können. Dieser reduzierte Verschleißkoeffizient wird über die bekannten Härteverhältnisse zwischen DLC-Schicht und Stahlgegenkörper auf andere Schichten übertragen. Außer der je Schicht individuell gemessenen Rauigkeit werden sonst keine weiteren Parameter im Modell verändert. Abbildung 5 zeigt die erzielten Voraussagen im Vergleich mit Messdaten für drei Schichten (A: 24GPa, B: 42GPa, C: 50GPa). Die Ergebnisse zeigen, dass die Übereinstimmung der Verschleißtiefen über den Gleitweg für alle DLC-Schichten außerordentlich gut ist. Abbildung 6 zeigt ergänzend die Voraussagen mit den experimentellen Daten für den Stahl-Gegenkörper, der gegen die drei Schichten mit unterschiedlichem Rauigkeitsgrad (Substrat geschliffen bzw. poliert) gelaufen ist. Im Rahmen der experimentellen Streuung resultieren gute Vorhersagen für den Stahlkörper. Mit der umfassenden Verifikation des entwickelten Verschleißmodells konnte gezeigt werden, dass die Implementierung der physikalischen Effekte in das Verschleißmodell eine sehr Vorhersage des Schicht- sowie des Gegenkörpers verschleißes ermöglicht [3, 4, 5].

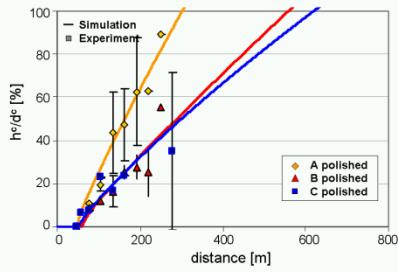


Abb. 5: Verschleißtiefe h^c aus Experiment und Modellvorhersage für drei Schichten mit unterschiedlicher Härte [5].

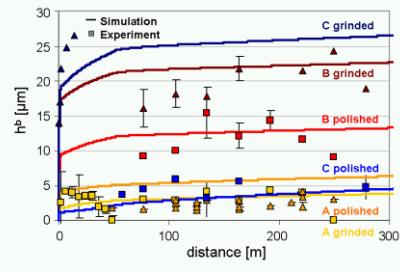


Abb. 6: Verschleißtiefe h^b aus Experiment und Modellvorhersage für den Stahl-Gegenkörper gegen drei DLC-Schichten mit unterschiedlicher Härte und Rauheit [5].

2. System Kolben-Zylinder

Der Nachweis der Übertragbarkeit des entwickelten Modells auf eine andere Geometrie und Belastungssituation erfolgt in einem zweiten Schritt [3, 4]. Zunächst wurde die Material- und Geometrieeinabhängigkeit des Verschleißmodells durch einen erfolgreichen Transfer des Modells auf die Kolben-Zylinder-Geometrie gezeigt. Im Weiteren wurde die Gültigkeit des Verschleißmodells unter variierenden Lastgeschichten verifiziert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Niveau des Kontaktdrucks für das System Kolben-Zylinder etwa zwei Größenordnungen niedriger liegt, als beim Modellexperiment Kugel-Platte. Die Experimente und Modellvorhersagen stimmen auch hier für die beiden gemessenen Schichten A und B bis zu einer Verschleißtiefe von etwa 40% der Schichtdicke sehr gut überein (s. Abb. 7, 8). Danach zeigen die Messdaten ein Plateau, dessen Ursache nicht bekannt ist. Da der Kontaktdruck rapide absinkt, benötigen Messungen für diese Geometrie insgesamt sehr lange. Daher wurden die Proben nach Vermessung der Verschleißtiefe wieder in den Prüfstand eingesetzt, was mit entsprechenden Unsicherheiten in der Positionierung verbunden ist. Messungen mit neuen Proben je Messpunkt waren im Rahmen der verfügbaren Projektlaufzeit nicht durchführbar.

Es konnte hier auf der Grundlage des Modells gezeigt und durch Experimente bestätigt werden, dass es durch die Graphitisierung des DLC deutliche Lastfolgeeffekte gibt, die zum Verschleißschutz genutzt werden können (siehe hierzu [3,4] sowie Abb. 9, 10). Da das Modell die Generierung von Graphit als Entwicklungsgleichung beinhaltet, konnte die stufenartige Herabsetzung bzw. Erhöhung des Reibkoeffizienten in Abhängigkeit von der Lastgeschichte korrekt vorhergesagt werden. Eine kurzzeitige hohe Last zu Beginn des Betriebs setzt höhere Mengen an Graphit frei, die bei anschließender Reduzierung der Belastung das System schützt und die Reibung reduziert (dreieckige Symbole in Abb. 10). Dies ist als ein konkretes Beispiel für das modellgestützte Design von Verschleißexperimenten zu werten.

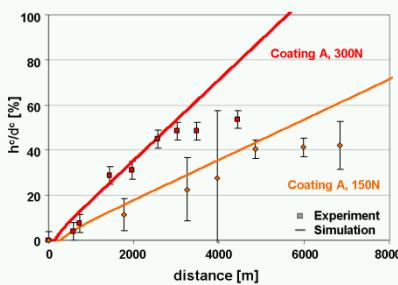


Abb. 7: Verschleißtiefe h^c der Schicht A für 150 N und 300 N Belastung [4].

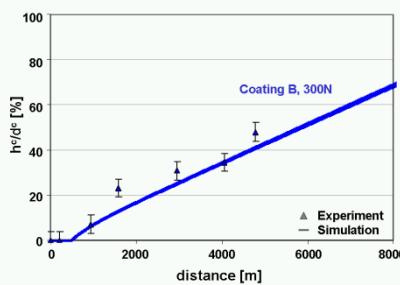
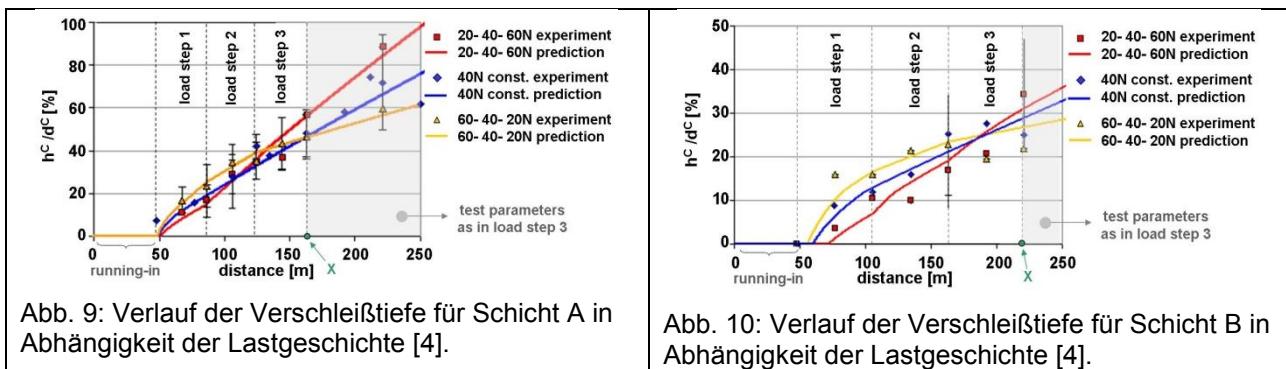


Abb. 8: Verschleißtiefe h^c für Schicht B bei einer Last von 300N [4].



AP3: Modellierung komplexer Tribosysteme

1. Kolben-Zylinder

In diesem Arbeitspaket ursprünglich geplant, zunächst ein einfaches Modul für den 2D-Verschleiß (Linienkontakt) im Verschleißprozessor zu erstellen, mit dem die grundlegende Untersuchung des Einflusses von Toleranzen auf das Verschleißverhalten durchgeführt werden kann. Im nächsten Schritt sollte an einer Strategie gearbeitet werden, mit der eine Simulation des Verschleißverhaltens bei Kippen des Kolbens im Zylinder ermöglicht werden soll. Aufgrund der hohen Komplexität dieses Problems und den damit verbundenen Rechenzeiten war es bereits bei der Beantragung nicht vorgesehen, innerhalb der kurzen Laufzeit des Transferprojekts eine vollständige Lösung zu präsentieren. Die Firma Bosch sollte jedoch in die Lage versetzt werden, diese Fragestellung im direkten Anschluss an das gemeinsame Transferprojekt mit Hilfe des vermittelten Know-Hows und der übertragenen Werkzeuge selbstständig weiter zu verfolgen.

Mit den Fortschritten in den Arbeitspaketen 1 und 2 hat sich schon bald gezeigt, dass dieses Arbeitspaket abgeändert werden sollte. Grund hierfür war eine einfache Modifikation im Prüfstand für das System Kolben-Zylinder bei Bosch, die das Verkippen des Kolbens vollständig eliminiert hat. Als Konsequenz hieraus wurde anstelle einer komplexen und computerintensiven Simulationsstrategie für Kippeffekte ein GIWM für den Kolben-Zylinder-Kontakt entwickelt, das für die Voraussage der Validierungsexperimente mit Kolben-Zylinder wie in AP2 (Abb. 7-10) beschrieben eingesetzt wurde. Auf der vereinfachenden Annahme, dass die beiden Körper durch den Verschleiß weiterhin eine näherungsweise kreisförmige Geometrie behalten, ergibt sich das Schema für die Berechnung der neuen Geometrie für ein Verschleißinkrement, wie in Abb. 11 dargestellt. Da das resultierende GIWM auf analytischen Gleichungen beruht und damit grundsätzlich unabhängig von FEM-Simulationen arbeitet, kann es leicht an veränderte Geometrien angepasst werden. Damit ist die Untersuchung des Einflusses von Toleranzen jederzeit problemlos und schnell möglich.

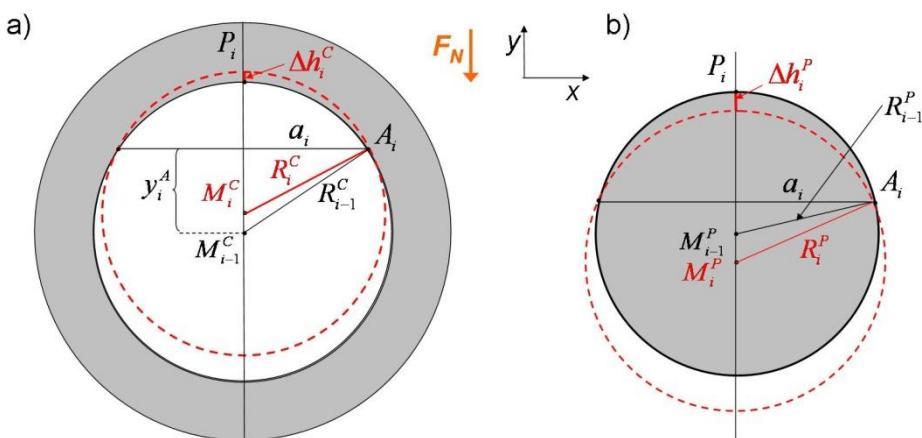


Abb. 11: Schema für das GIWM des Zylinder-Kolben-Kontaktes. Durch den Verschleiß werden simultan Radius und Mittelpunkt von Zylinder und Kolben verändert: (a) Anpassung der Zylinder-Innenseite für einen Verschleißfortschritt Δh_i^C (b) Anpassung des Kolbenradius im Kontaktbereich für einen Verschleißfortschritt Δh_i^P (nach [4]).

2. Mikrozahnringpumpe

AP3 befasste sich gemäß Projektantrag im Weiteren mit der Anwendung des Verschleißprozessors auf komplexe Tribosysteme. Als direkte Anwendung des in AP1 neu programmierten Verschleißprozessors unter Verwendung der Zeitintegration nach Gl. (4) („Ipdsdt“) wurde ein bestehendes Modell eines komplexen Getriebes, eine sogenannte Mikrozahnringpumpe, mit Verschleiß gerechnet. Hier bestand die Anforderung, die Veränderung der Kinematik der Pumpe durch Einwirkung von Verschleiß zu ermitteln. Abbildung 12 zeigt das FEM-Modell der Pumpe, wie es 2003 publiziert wurde [Huber und Aktaa, Microsystem Technol. 9 (2003) 465]. Abbildung 13 zeigt das gleiche Modell nach 70 Verschleißinkrementen des Verschleißprozessors [2,11]. Die entstandenen Lücken zwischen den einzelnen Getriebeteilen sowie die Abflachung an der Front der Zähne des Innenrotors sind deutlich zu erkennen. Wesentlich ist, dass die Ergebnisse innerhalb weniger Tage generiert wurden, was die Leistungsfähigkeit des Verschleißprozessors unter Beweis stellt. Die Simulationen führten zu der Erkenntnis, dass Toleranzen der Originalteile keinen merklichen Einfluss auf den eigentlichen Verschleißfortschritt haben (s. exemplarisch dazu Abb. 14). Dies ist dadurch zu erklären, dass sich geringe Formabweichungen nach wenigen Umdrehungen durch den Verschleiß rasch aneinander annähern.

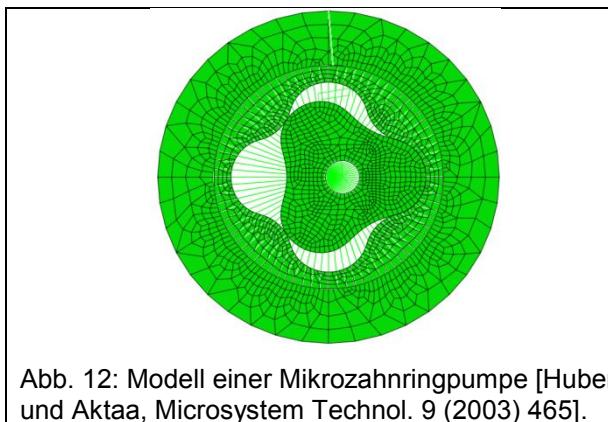


Abb. 12: Modell einer Mikrozahnringpumpe [Huber und Aktaa, Microsystem Technol. 9 (2003) 465].

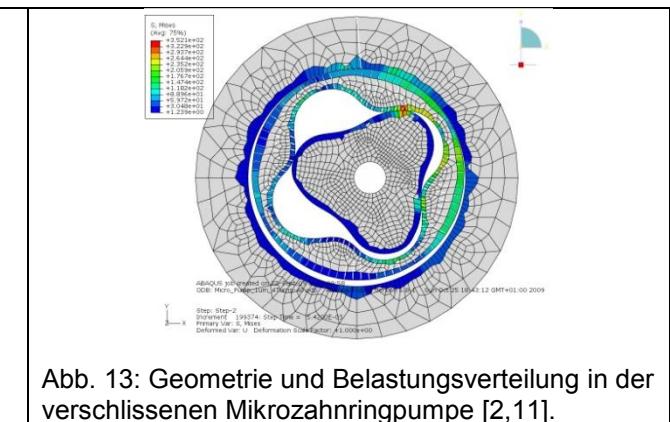


Abb. 13: Geometrie und Belastungsverteilung in der verschlissenen Mikrozahnringpumpe [2,11].

Abbildung 15 zeigt die berechnete Bewegung der Achse für den Innenrotor in Abhängigkeit vom Verschleißfortschritt. Die anfängliche rechts-links-Bewegung um den Nullpunkt verändert sich in eine leicht geneigte Hysterese mit Zentrum im ersten Quadranten. Die Größe der Hysterese deutet das Spiel an, das durch den Verschleiß in das System eingebracht wird. Das Spiel beträgt zum Ende bis zum 40-fachen der ursprünglich angenommen Toleranz als Spiel zwischen Außenrotor und Gehäuse. Die Lage der Hysterese ist bedingt durch den Pumpendruck, der den Innenrotor nach oben zum Pumpeneinlass hin drückt. Aus den Simulationsergebnissen am Ende des Verschleißvorgangs konnte interessanter Weise gezeigt werden, dass auch dann die Pumpe immer noch dicht ist. Es sind, wie in Abb. 13 gezeigt, immer zwei geschlossene Kontakte in jeder Winkelstellung vorhanden. Als Folge des Verschleißes ist jedoch mit einer deutlichen Wirkungsgradverringerung zu rechnen, da zwischen zwei der vier Kammern eine Leckage entsteht (vgl. Abb. 12, 13 im unteren Bereich).

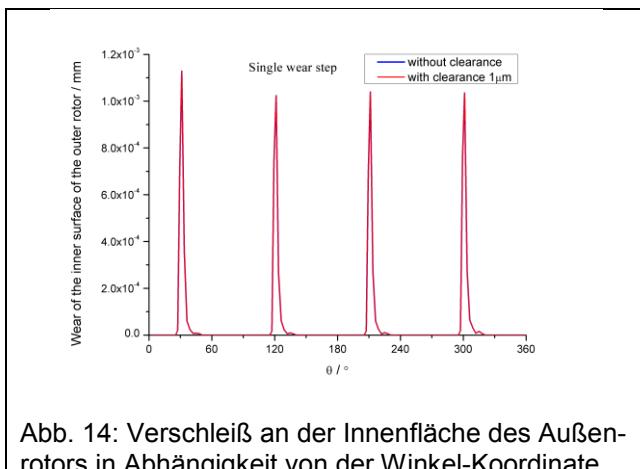


Abb. 14: Verschleiß an der Innenfläche des Außenrotors in Abhängigkeit von der Winkel-Koordinate.

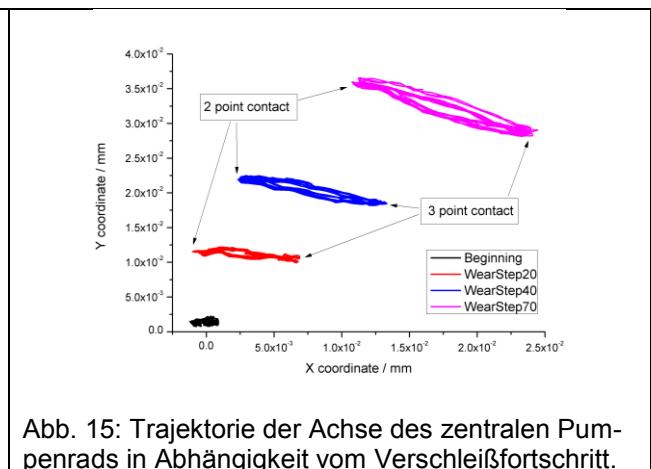


Abb. 15: Trajektorie der Achse des zentralen Pumpenrads in Abhängigkeit vom Verschleißfortschritt.

3. Nockentrieb

Die weiteren Arbeiten in AP3 dienten der Anwendung der CForce-Methode aus AP1 auf komplexe Systeme. Hier ist zunächst der vereinfachte Nockentrieb zu nennen [1]. Die vereinfachte Geometrie sowie die Variablen für die Beschreibung der Kinematik sind in Abb. 16 dargestellt. Abbildung 17 zeigt exemplarisch den Verschleißfortschritt für die oszillierend überfahrene Platte. Sie repräsentiert den Stößel, der dem Nocken aufgrund der vertikal von unten aufgebrachten Federkraft folgt. Die Kurven in Abb. 17 belegen die Übereinstimmung der beiden Integrationsroutinen CForce und Ipdsdt, die im verwendeten Verschleißprozessor implementiert sind.

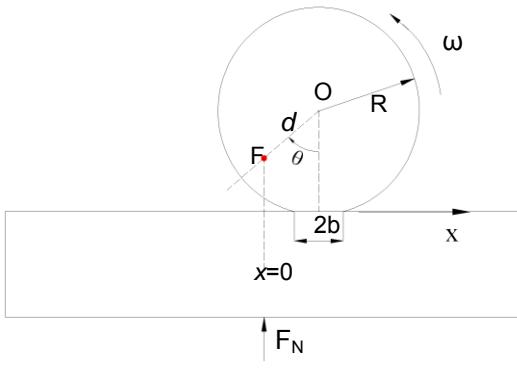


Abb. 16: Schemazeichnung des vereinfachten Nockentriebes.

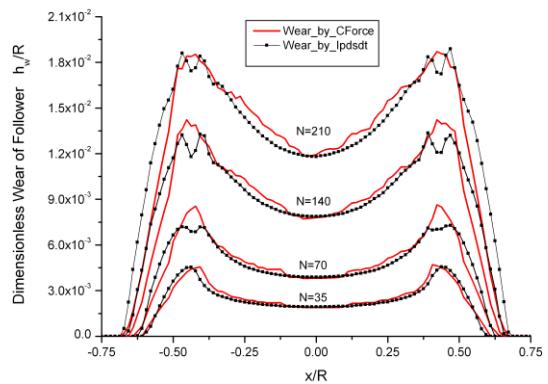


Abb. 17: Verschleißfortschritt an der Oberfläche des Stößels über 210 Umdrehungen des Nockens.

4. Zahnräder und Planetengetriebe

Der Verschleißprozessor mit der implementierten CForce-Methode wurde im nächsten Schritt auf das Planetengetriebe angewendet. Abbildung 18 zeigt den Kontaktbereich eines Zahns des Sonnenrades im Eingriff mit einem Zahn eines Planetenrades. Der rote Punkt markiert den Wälzpunkt, der im gezeigten Moment in etwa im Kontakt ist. In diesem Bereich geht die Abgleitung ds/dt gegen Null, womit der berechnete Verschleiß ebenfalls verschwindet. Dies wird durch die berechnete Verteilung des Verschleißes für einen Wälzvorgang in Abb. 19 bestätigt. Mit dem gezeigten Bild wird zusätzlich noch einmal die CForce-Methode mit der Zeitintegration (Ipdsdt-Methode) gemäß GI (4) für beide im Eingriff befindlichen Zähne validiert. Die für die CForce-Methode fehlenden abfallenden Äste nach Außen röhren aus der Natur der Integrationsmethode. Der Kontakt wird bei der CForce-Methode nicht mehr lateral über die Kontaktfläche aufgelöst, sondern der Verschleiß wird aus der Kontaktkraft ermittelt und dem Kontaktmittelpunkt zugewiesen. Aus dem lateralen Abstand der vorliegenden Daten beider Methoden an den Außenseiten kann auf die beträchtliche Ausdehnung der Kontaktfläche zu Beginn und zum Ende des Wälzvorgangs geschlossen werden. Die Ergebnisse bestätigen, dass für die Verschleißberechnung zweidimensionaler Körper die Kenntnis der Kontaktkraft, des Schlupfes und der Geschwindigkeit des Kontaktpunktes ausreichen. Diese Daten können aus vergleichsweise grob vernetzten FEM Modellen verbunden mit einer Auswertung der Kinematik gewonnen werden. Damit reduziert sich der notwendige Vernetzungs- und Rechenaufwand erheblich.

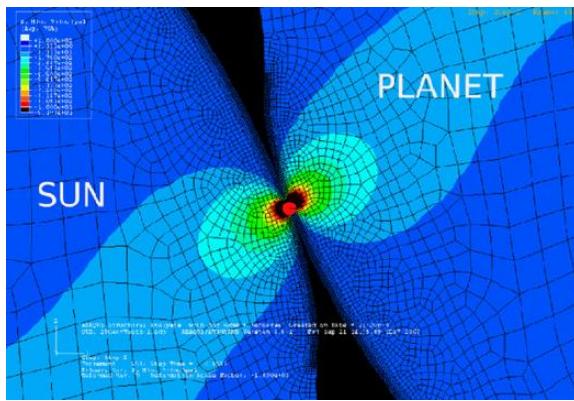


Abb. 18: Spannungsverteilung für den Kontakt zwischen Sonnenrad und Planetenrad des SFB Demonstrators Planetengetriebe.

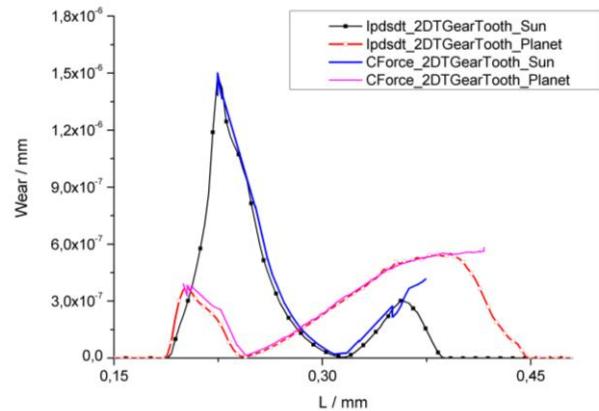


Abb. 19: Verschleiß auf den Kontaktfächeln des Sonnen- und Planetenrades. Im Wälzpunkt geht der Verschleiß durch ein Minimum.

Als Ergebnis der vorigen Diskussion kann ein größerer Teil des Planetengetriebes mit deutlich größerer Vernetzung gerechnet werden. Das FEM Modell hierzu ist in Abb. 20 dargestellt. Mit dieser Betrachtung kommt ein neuer Aspekt hinzu: die Übertragung der Kontaktkraft von einem Zahn auf den nächsten. In diesem Zeitraum sind gleichzeitig zwei Zähne im Eingriff, wobei die resultierenden Kontaktkräfte des Einzelkontaktes von den elastischen Deformationen des Gesamtgetriebes abhängig sind.

Für eine robuste Analyse wurde gemäß Projektantrag das „Master-Zahn“-Konzept implementiert. Durch Ausnutzen der Symmetrien im Modell kann angenommen werden, dass alle Zähne gleichmäßig belastet werden und ebenso gleichmäßig verschleifen. Aus einer Umdrehung des Modells können daher die Daten aus mehreren Zähnen auf einen Master-Zahn projiziert und – sofern notwendig – statistisch aufbereitet werden. In dem in Abb. 20 gezeigten Beispiel wurde nur ein Ausschnitt jedes Zahnrads modelliert. Um vergleichbare Steifigkeitsverhältnisse zu gewährleisten, wurden die Daten der jeweils am Rand befindlichen Zähne nicht mit ausgewertet. Nach Ermittlung des Master-Zahn Verschleißes wurde dieser auf alle Zähne identisch aufgeprägt. Die Verschleißdaten für das Sonnenrad sind in Abb. 21 und für das Planetenrad in Abb. 22 dargestellt. Die Abszisse L in diesen Graphen ist der Abstand vom Zahnfuß (tiefster Punkt) aus gemessen entlang der Oberfläche des Zahns.

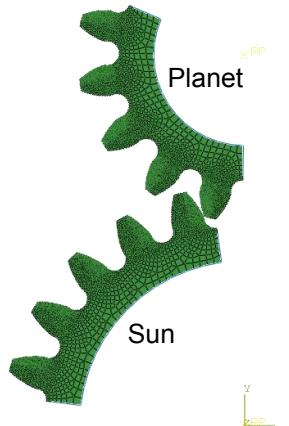


Abb. 18: Vernetzte Ausschnitte des Planetengetriebes

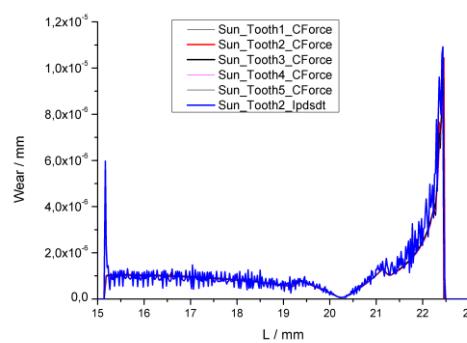


Abb. 19: Verschleißentwicklung auf der oberfläche des Sonnenrad-Zahns

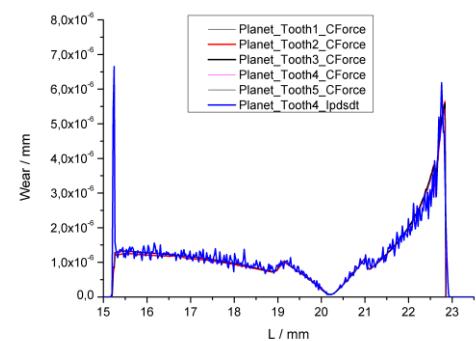


Abb. 20: Verschleißentwicklung auf der Oberfläche des Planetenrad-Zahns

Die Kurvenverläufe für beide Zahnräder zeigen bei einem bestimmten Abstand zu beiden Seiten des Wälzpunktes einen charakteristischen Knick. Ab diesem Punkt befindet sich der vorige bzw. nächste Nachbarzahn im Eingriff und reduziert die Kontaktkraft sowie die Verschleißrate des betrachteten Zahns bis bzw. solange der Kontakt des Nachbarzahns offen ist.

Der Vergleich mit der Zeitingegration (lpdsdt) für eine Zahnabwälzung am Beispiel des Zahnes 2 zeigt nochmals abschließend die Qualität und Robustheit der CForce-Methode in Verbindung mit dem Master-Zahn Konzept. Während die Verläufe für die CForce-Methode völlig glatt sind, zeigt die lpdsdt-Methode deutliche Oszillationen, die aus dem groben FEM-Modell und den großen Zeitschritten herrühren.

AP4: Publikationstätigkeit

Wie im Förderantrag vorgegeben und im Kooperationsvertrag vereinbart, wurden die Ergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen sowie in ISI-gelisteten Zeitschriften und Büchern mit einem Peer-review Verfahren publiziert (s. folgender Abschnitt). Es ist für die kurze Projektlaufzeit von zwei Jahren eine beachtliche Zahl von Publikationen in hochrangigen Zeitschriften hervorgegangen.

7.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

- a) Arbeiten, die in Publikationsorganen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung zum Zeitpunkt der Antragstellung erschienen oder endgültig angenommen sind, und Buchveröffentlichungen;

- [1] Y. Chen, N. Huber: Contact pressure–force transformation for accelerated wear simulation in sliding contacts, *CMC - Computers Materials & Continua*, Vol. 16, pp. 1-23, 2010.
- [2] Y. Chen, N. Huber: Transient simulation of wear in a lobe pump using the wear processor, *Tribology and Design*, Eds: M. Hadfield, C.A. Brebbia, J. Seabra, WIT Press, Vol. 66, 2010, ISBN: 978-1-84564-440-6, pp. 49 – 60.
- [3] L. Steiner: Modellierung und Simulation von diamantähnlichen Kohlenstoffschichten unter oszillierendem Schwingverschleiß, Dissertationsschrift, TU Hamburg Harburg, 2010.
- [4] L. Steiner, V. Bouvier, U. May, N. Huber: Simulation of friction and wear in DLC/steel contacts for different loading histories and geometries: ball-on-plate configuration and piston-cylinder-contacts, *Tribology International*, Vol. 43, pp. 1410-1416, 2010.
- [5] L. Steiner, V. Bouvier, U. May, V. Hegadekatte, N. Huber: Modelling of unlubricated oscillating sliding wear of DLC-coatings considering surface topography, oxidation and graphitisation, *Wear*, Vol. 268, pp. 1184-1194, 2010.
- [6] V. Hegadekatte, J. Hilgert, O. Kraft, N. Huber: Multi time scale simulations for wear prediction in micro-gears, *Wear*, Vol. 268, pp. 316-324, 10.1016/j.wear.2009.08.017, 2010.
- [7] L. Steiner, V. Bouvier, S. Grosse, N. Huber, V. Hegadekatte, C.P.O. Treutler, Modeling and simulation of unlubricated oscillating sliding wear of DLC-coatings, Proceedings DGM Symposium, Aachen, April. 4 - 7, 2008, ISBN: 978-3-527-32366-1, S. 347-354.
- [8] V. Hegadekatte, O. Kraft, N. Huber, Modelling and Simulation of Wear in Micro-machines, Proceedings DGM Symposium, Aachen, April. 4 - 7, 2008, ISBN: 978-3-527-32366-1, S. 347-354.
- [9] S. Kurzenhäuser, V. Hegadekatte, J. Schneider, N. Huber, O. Kraft, K.-H. Zum Gahr: Tribological characterization and numerical wear simulation of microcomponents under sliding and rolling conditions, *Microsystem Technologies*, Vol. 14, pp. 1839-1846, 2008.
- [10] V. Hegadekatte, S. Kurzenhäuser, N. Huber, O. Kraft: A predictive modeling scheme for wear in tribometers, *Tribology International*, Vol. 41, pp.1020-1031, 2008.

- b) Andere Veröffentlichungen;

- [11] Y. Chen, N. Huber: Transient simulation of wear in a lobe pump using the wear processor, Proceedings of the Tribology and Design, 3rd. Int. Conf. on Tribology and Design, Algavre, Portugal, 11.- 13.05.2010, Vol. 66, pp. 49 – 60.
- [12] V. Hegadekatte, N. Huber: Verschleissimulation tribologisch beanspruchter Systeme, Wear Simulation of Tribosystems, Proceedings ABAQUS Regional User Conference, 2007.

- c) Patente, gegliedert nach angemeldet und erteilt.

- entfällt -

7.2.3 Dokumentation weiterer Aktivitäten

Für die Betreuung der Arbeiten durch den fachnahmen Experten wurde der Arbeitsplatz von Dr. Hegadekatte und Dr. Chen mit freundlicher Genehmigung des Teilprojektleiters Prof. Kraft für die Laufzeit des Projekts an die TUHH zu Prof. Huber verlegt. Die dort von Prof. Huber betreute Gruppe bekam ein Büro und Mobilier sowie den Zugang zu Bibliothek und Parallelrechner (inkl. ABAQUS-Lizenzen) als Grundauststattung von der TUHH zur Verfügung gestellt. Auf diesem Wege sind die meisten der genannten Publikationen unter zusätzlicher Angabe der Adresse der TUHH erschienen.

Nach erfolgreicher Bewerbung von Dr. Hegadekatte um eine Post Doc-Position an der Brown University (Providence, USA) konnte über eine internationale Ausschreibung der offenen Stelle in iMechanica Herr Dr. Chen für die Weiterbearbeitung des Projektes aus China gewonnen werden. Dr. Chen hat sich in akribischer Detailarbeit mit der Programmierung des Verschleißprozessors auseinandergesetzt und in diesem Zuge gleich wesentliche Teile neu programmiert.

Von Seiten der TUHH konnten mehrere Studenten für Studienarbeiten gewonnen werden. Besonders sind hier Herr Jakob Hilgert (Modellierung des Planetengetriebes) und Herr Henning Eils (Verschleißsimulationen eines realistischen Nockengetriebes) zu nennen.

Von Seiten des Kooperationspartners wurde eine Doktorandenstelle besetzt mit Frau Dipl.-Phys. Leni Steiner in das Projekt eingebracht. Frau Steiner hielt sich während der Projektlaufzeit mehrfach (mindestens einmal pro Jahr) für 1-2 Wochen bei Prof. Huber an der TUHH auf, um dort direkt betreut zu werden und die an der TUHH entwickelten Methoden zu erlernen. Zusätzlich zu diesen Treffen gab es weitere 1-tägige Treffen zusammen mit den Fachbetreuern von Bosch im Wechsel an der TUHH und bei Bosch.

Im Rahmen des letzten Treffens am 18.01.2010 wurde die Verschleißprozessor-Software bei Bosch im Rahmen eines Seminars vorgestellt und im Anschluss von den Mitarbeitern des Teilprojekts gemeinsam auf dem LINUX-Parallelrechner von Bosch installiert. Die Software konnte unmittelbar ohne weitere Anpassungen erfolgreich in Betrieb genommen werden.

Frau Steiner konnte ihr Promotionsverfahren an der TU Hamburg Harburg am 1. März 2010 mit der Note „mit Auszeichnung“ abschließen. Sie wurde für den Karl H. Ditze-Preis nominiert, den sie schließlich zum 15. Juli 2010 für die beste Dissertation der TU Hamburg-Harburg verliehen bekam.

Das Kooperationsprojekt mit Bosch, ermöglicht durch die Förderung der DFG, wurde bei der Verleihung des Karl H. Ditze-Preises der TUHH im Rahmen der Festveranstaltung durch Prof. Huber angemessen gewürdigt. Frau Steiner's herausragende Leistung wurde in einer Pressemeldung der TUHH veröffentlicht und als Nachricht auf der Webseite der TUHH platziert.

Die Aktivitäten und Beteiligung an internationalen Konferenzen ist im Wesentlichen aus der Publikationstätigkeit des vorangegangenen Abschnitts zu entnehmen. Zu ergänzen ist das Engagement von Prof. Huber als Co-Organisator der DGM Tagung "International Symposium on Friction, Wear and Wear Protection" April 9 - 11, 2008 in Aachen. Im Rahmen dieser Veranstaltung gelang es Prof. Huber, Prof. Sören Andersson als den Pionier der Verschleißsimulation mit FEM für einen Plenarvortrag nach Aachen einzuladen und die Arbeiten des TP T3 mit ihm zu diskutieren. Prof. Andersson lud in 2009 Prof. Huber als Opponent für die Promotionsprüfung seines letzten Doktoranden Anders Söderberg an die KTH Stockholm ein, bevor er wenige Monate später in Ruhestand ging. Die fruchtbaren Diskussionen mit Prof. Andersson wurden im Acknowledgement der Publikation in CMC [1] gewürdigt.

SFB 499 T3 – Alumni:

Dr. Hegadekatte ist nach seiner Post Doc Tätigkeit in den USA zu Novelis Canada gewechselt und dort Verantwortlich für den Aufbau der Prozesssimulation für Aluminium-Produkte von Novelis in seinem Heimatland Indien.

Dr. Chen ist nach Ablauf des Projekts an das Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) gewechselt, wo er sich inzwischen mit Parallelisierung von FEM Codes und dem Aufbau eines Parallelrechner-Clusters befasst. Gleichzeitig leistet er Vorarbeiten für den derzeit in Beantragung befindlichen SFB 986 TPe A5 und B3. Nach aktueller Planung soll Herrn Chen in 2012 eine Festanstellung erhalten mit dem Ziel, ihm als Nachwuchswissenschaftler eine Perspektive für eine akademische Karriere zu eröffnen.

Frau Dr. Onuseit (geb. Steiner) hat mit Abschluss ihrer Promotion eine unbefristete Anstellung bei Bosch in einer Entwicklungsabteilung von Diesel-Systemen erhalten. Nach 9 Monaten Elternzeit kehrte sie inzwischen zum 12. Mai 2011 auf diese Stelle zurück und arbeitet nun unter anderem an einer neuen Publikation zum Thema Verschleißsimulation.

Dipl.-Ing. Jakob Hilgert (Studienarbeit zur Multiskalensimulation des Planetengetriebes) hat nach Abschluss seines Diploms an der TUHH eine Promotionsstelle am Helmholtz-Zentrum Geesthacht angenommen und im Rahmen seiner Dissertation die Prozesssimulation für FSW Fügetechnologien in der Abteilung Festphasenfugeprozesse aufgebaut.

Dipl.-Ing. Henning Eils (Studienarbeit zur Simulation des Nockentriebs), ehem. FH-Absolvent, hat sein Studium vor kurzem mit einer Diplomarbeit zur rechnergestützten Modellierung und Evaluation einer Aktorreihe aus dielektrischen Elastomeren bei Prof. Schulte mit der Note 1,0 an der TUHH abgeschlossen. Er möchte eine Stelle in der Industrie annehmen.

7.3 Rückblick auf die Förderung

Das Teilprojekt wurde seit Oktober 2007 im Sonderforschungsbereich für zwei Jahre gefördert. Es wurde davor von Oktober 2003 bis September 2007 als wissenschaftliches Teilprojekt TP D3 des SFB 499 gefördert.

7.3.1 Personal im Transferprojekt während der zu Ende gehenden Förderperiode

	lau-fende Num-mer	Na-me,akademische r Grad,Dienststelle ng	engere Fachzu-gehörigkeit	Institut der Hochschule oder der au-ßeruniversitä-ren Einrichtung	Mitarbeit im Projektin Wochen-stunden	Katego-rie
Grundausstattung						
Wissenschaftle-rinnen und Wis-senschaftler	1	Kraft, O., Prof. Dr. rer. nat.	Zuverlässigkeit Eindruckmetho-den	IZBS, KIT	2B	
	2	Huber, N., Prof. Dr.-Ing.	Modellierung Finite-Elemente	Institut für Werkstoffphy-sik, TUHH	4B	
nichtwissen-schaft-liche Mitarbeite-rinnen und Mitar-beiter						
Kooperationspartner						
Wissenschaftle-rinnen und Wis-senschaftler	3	Grosse, Stefan, Dr. rer. nat.		Bosch CR/ART	2B	
	4	May, Ulrich, Dr.-rer. nat..		Bosch DS/ETD	2B	
	5	Bouvier, Valérie, Dr.-Ing.		Bosch CR/ART	8	
	6	Steiner, Leni, Dipl.-Phys.		Bosch CR/ART	35	
nichtwissen-schaft-liche Mitarbeite-rinnen und Mitar-beiter						
Ergänzungsausstattung						
Wissenschaftle-rinnen und Wis-senschaftler	7	Hegadekatte, V., Dr.-Ing.	Verschleißsimula-tion, Finite-Elemente Modellierung, Programmierung	IZBS, KIT	8B	
	8	Chen, Y., Dr., MSc.	Verschleißsimula-tion, Finite-Elemente Modellierung, Programmierung	IZBS, KIT	38,5	
nichtwissen-schaft-liche Mitarbeite-rinnen und Mitar-beiter						

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die beantragte Förderperiode (Grundausstattung):

1) Prof. Dr. rer. nat O. Kraft:

Sprecher des SFB 499 und Leiter des Instituts für Zuverlässigkeit von Bauteilen und Systemen an dem die Nachwuchsgruppe des SFB 499 angesiedelt ist, Leiter des TP D4 und wissenschaftliche Betreuung zu Problemstellungen der Werkstoffwissenschaften und Zuverlässigkeit von Mikrosystemen

2) Prof. Dr.-Ing. N. Huber:

Assoziiertes Mitglied des SFB 499, bis März 2006 Abteilungsleiter am Institut für Materialforschung II des Forschungszentrums Karlsruhe, seither Professor an der Technischen Universität Hamburg-Harburg und Institutsleiter am Helmholtz-Zentrum Geesthacht. Prof. Huber leistet weiterhin die enge wissenschaftliche Betreuung des TP D4/T3 in den Bereichen Kontaktmechanik, numerische Simulation und Modellierung von Verschleißverhalten in enger Kooperation mit den damit verknüpften Teilprojekten des SFB 499.

Die unter 1) und 2) aufgeführten Mitarbeiter sind werden über die Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren finanziert. Ihre Tätigkeit umfasste vor allem die Koordination des Projektes bzw. technische Unterstützung bei der Durchführung.

Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die beantragte Förderperiode (Kooperationspartner):

3) Dr. rer. nat S. Grosse:

Gruppenleiter Plasmaoberflächentechnik in der Abteilung CR/ART „Physikalische Technologien“ im Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung der Robert Bosch GmbH. Herr Grosse beschäftigt sich bereits seit mehreren Jahren mit der Entwicklung von Verschleißschutzschichten sowie tribologischer und physikalischer Schichtprüfung. Im Rahmen dieses Projektes umfasst seine Tätigkeit die Beratung der Doktorandin (siehe Punkt 5) sowie die strategische Orientierung der Zusammenarbeit.

4) Dr. rer. nat. U. May:

Teamleiter „Oberflächentechnik“ in der Abteilung DS/ETD bei der Robert Bosch GmbH. Seit vielen Jahren beschäftigt sich Harr May mit dem Thema verschleißschützender Schichten, insbesondere DLC-Schichten unter verschiedensten Belastungen. Herr May übernahm die Betreuung der Doktorandin (siehe Punkt 6) gegen Mitte der Projektlaufzeit.

5) Dr.-Ing. V. Bouvier:

Leiterin des Projekts „Modellierung und Simulation von Verschleißschutzschichten im tribologischen Kontakt“ in der Abteilung CR/ART „Physikalische Technologien“ im Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung der Robert Bosch GmbH. Seit einigen Jahren beschäftigt sich Frau Bouvier mit der Modellierung und Simulation von verschiedenen verschleißreduzierenden Schichten, insbesondere DLC-Schichten unter Schlag- bzw. Schwingbelastung. Im Rahmen des Transferprojekts besteht Ihre Aufgabe in der Betreuung der Doktorandin (siehe Punkt 6)

6) Dipl.-Phys. L. Steiner:

Mitarbeiterin in der Abteilung CR/ART „Physikalische Technologien“ im Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung der Robert Bosch GmbH und Doktorandin der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Sie ist verantwortlich für die Realisierung der im Transferprojekt seitens der Firma Bosch geplanten Arbeiten. Hierzu gehören die Simulation und Modellierung des Verschleißes mit Hilfe der Python-Routine, des GIW-Modells und des Verschleißprozessors sowie die Lebensdauerprognosen mittels der genannten Simulationsverfahren.

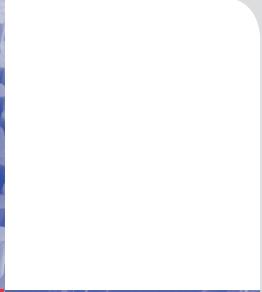
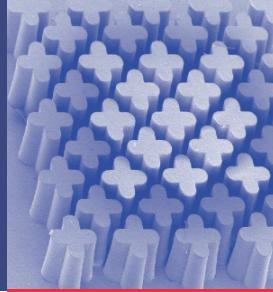
Aufgaben der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die beantragte Förderperiode (Ergänzungsausstattung):

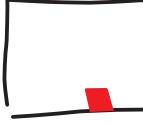
7) Dr.-Ing. V. Hegadekatte (wissenschaftlicher Mitarbeiter, BAT IIa):

Der wissenschaftliche Mitarbeiter war verantwortlich für die im Teilprojekt D4 durchzuführenden Modellierungs- und Simulationsaufgaben sowie die wissenschaftliche Aufarbeitung der Ergebnisse. Im Rahmen seiner Doktorarbeit entwickelte er den Verschleißprozessor sowie das GIWM-Modell. Neben der weiteren Bearbeitung dieses Teilprojektes koordinierte der wissenschaftliche Mitarbeiter im ersten Jahr des Transferprojekts die Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner. Er arbeitete zusammen mit 2) und 5) den für die Umsetzung des Transfer-Projekts einzustellenden Mitarbeiter 7) in das Thema und die Programmierung des Verschleißprozessors ein.

8) Dr. MSc Y. Chen (wissenschaftlicher Mitarbeiter, BAT IIa):

Der wissenschaftliche Mitarbeiter war verantwortlich für die Durchführung der im Transferprojekt T3 geplanten Arbeiten, die Übertragung der angepassten Module und Methoden in enger Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner (insbes. 5)) sowie die Anfertigung des SFB-Anteils der gemeinsamen Publikationen. Er übernahm die Arbeiten von 6) nach dessen Annahme einer Post-Doktoranden-Stelle an der Brown University, USA.



mikro  urformen
sfb 499



Im Sonderforschungsbereich 499 wird die gesamte Prozesskette für die urformenden Fertigungsverfahren Pulverspritzgießen und Mikrogießen von mechanisch hoch beanspruchbaren Mikrobauteilen aus Keramik und Metalllegierungen entwickelt. Um die Umsetzung der Forschungsergebnisse in die industrielle Anwendung gewährleisten zu können, wird die Produktentstehungskette von der Konstruktion und Simulation über die Prozessvorbereitung, die Produktionsverfahren einschließlich der Qualitätssicherung bis zur Ermittlung geometrischer, mechanischer und tribologischer Bauteileigenschaften durchdrungen.

Dieser Band beinhaltet den Abschlussbericht für die gesamte Förderperiode von 2000-2011, den Berichtsband für die letzte Förderperiode von 2009-2011 und Abschlussberichte der Transferprojekte.

Gefördert von der
Deutschen Forschungsgemeinschaft



ISSN 1869-9669
ISBN 978-3-86644-812-4

