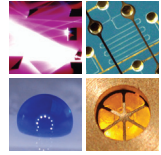


SCHRIFTEN DES INSTITUTS FÜR MIKROSTRUKTURTECHNIK
AM KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)



Band 30

JOCHEN HENKA

Prozessentwicklung eines industrietauglichen
Verfahrens zur Fertigung von vereinzelt
LIGA-Mikrobauteilen

Jochen Heneka

**Prozessentwicklung eines industrietauglichen
Verfahrens zur Fertigung von vereinzelt
LIGA-Mikrobauteilen**

Schriften des Instituts für Mikrostrukturtechnik
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Band 30

Hrsg. Institut für Mikrostrukturtechnik

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe
erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Prozessentwicklung eines industrietauglichen Verfahrens zur Fertigung von vereinzelt LIGA-Mikrobauteilen

von
Jochen Heneka

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Maschinenbau

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Oktober 2014
Hauptreferent: Prof. Dr. Volker Saile
Korreferent: Prof. Dr. Thomas Hanemann

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 1869-5183
ISBN 978-3-7315-0326-2
DOI 10.5445/KSP/1000045013

Prozessentwicklung eines
industrietauglichen Verfahrens zur
Fertigung von vereinzelt LIGA-
Mikrobauteilen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

der Fakultät für Maschinenbau
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Jochen Heneka

Karlsruhe, 2014

Tag der mündlichen Prüfung: 24.10.2014

Hauptreferent: Prof. Dr. Volker Saile

Korreferent: Prof. Dr. Thomas Hanemann

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entstanden. Während der Zeit von Oktober 2010 bis Oktober 2014 wurden die Arbeiten zu gleichen Teilen am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) und am Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik (IAM-WPT) durchgeführt. An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Prof. Dr. Volker Saile und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Haußelt für die Ermöglichung der Durchführung dieser Arbeit bedanken. Herrn Prof. Dr. Saile möchte ich darüber hinaus für die Diskussionsbereitschaft, die inspirierende wissenschaftliche und persönliche Betreuung sowie die Übernahme des Hauptreferates danken.

Herrn Prof. Dr. Thomas Hanemann möchte ich herzlich danken für die Übernahme des Korreferates, seine Diskussionsbereitschaft, die Durchsicht meiner Dissertationsschrift und für seine stets motivierende Art.

Besonderen Dank gilt meinen Betreuern und ersten Ansprechpartnern Herrn Dr. Markus Guttmann und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Klaus Plewa für deren Engagement und Diskussionsbereitschaft. Im Besonderen möchte ich mich für die hervorragende Betreuung, das große Interesse an meiner Arbeit und die vielen Gespräche (auch ohne Termin) bedanken. Darüber hinaus danke ich Beiden für deren Bereitschaft, mich bei neuen Ideen zu unterstützen und die Arbeit zu fördern.

Herzlicher Dank gilt den Kollegen am KIT. Insbesondere Heinz Walter, Jürgen Moch, Dipl.-Min. Tobias Müller, Alexandra Karbacher, Julia Wolf, Marie-Kristin Nees, Christin Straus, Dipl.-Ing. (FH) Marc Schneider, Alexandra Moritz, Heike Fornasier, Herbert Kleiber, Rolf Ehnes, Nina Giraud, B.Eng. Christian Benkel, Dipl.-Ing. (FH) Barbara Matthis, PD Dr. Matthias Worgull, Andreas Bacher, Birgitt Hübner, Peter

Holzer, B.Eng. Alexander Klein, Sascha Enke, Marko Klotz, Dipl.-Ing. Elvira Honza, Susanne Manegold und Dr.-Ing. Steffen Antusch. Ohne diese Kollegen wäre die vorliegende Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Bei Herrn Dr. Pascal Meyer möchte ich mich besonders für die Mithilfe bei Fragen der Metrologie, seine Diskussionsbereitschaft und die kritische Durchsicht meiner Dissertationsschrift bedanken.

Herrn Dr. Martin Börner danke ich für seine Unterstützung in der Röntgenlithographie, die Durchsicht meiner Dissertationsschrift und sein Interesse an meiner Arbeit.

Herrn Dr. Jürgen Mohr möchte ich herzlich danken für sein offenes Ohr in verschiedenen Besprechungen, den Willen meine Arbeit zu fördern, neue Denkanstöße zu geben und die Arbeit kritisch zu hinterfragen.

Herrn Dr.-Ing. Jürgen Prokop möchte ich für seine tatkräftige Unterstützung, sein offenes Ohr auch bei schwierigen Fragen und die kritische Durchsicht meiner Dissertationsschrift danken.

Weiterhin möchte ich mich herzlich für die gute Zusammenarbeit bei den Studenten Markus Engel, Volker Maurer, Andreas Runck, Yannik Krieger, Martin Dreher, Raphael Kruchem, Stefan Borens, Andreas Erb und Valerie Siller bedanken.

Für die Arbeit im Hintergrund danke ich Karin Seitz, Jana Herzog, Marie Nowotny, Dr.-Ing. Michael Schulz und Dr. Holger Moritz.

Von Beginn an konnte ich auf den wichtigen und notwendigen Rückhalt meiner Familie und meines Freundeskreises zählen. Dafür möchte ich mich allen voran bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium ermöglicht und mich nach besten Kräften unterstützt haben.

Für die Unterstützung von Seiten der Industrie möchte ich mich herzlich bei der Fa. Rodinger Kunststoff-Technik GmbH und hier speziell bei den Herren Werner Schneider, Lothar Maier, Wolfgang Fuchs und Gerhard Kerscher für deren Unterstützung im Spritzgießwerkzeugbau und die konstruktiven Gespräche auf diversen Projekt-treffen bedanken. Besonders möchte ich mich bei der Firma Otto

Männer GmbH für ihr Interesse an meiner Arbeit, für die Bereitstellung eines Spritzgießwerkzeuges, die Maschinenzeiten an der micro-män 50 im Technikum der Firma Otto-Männer GmbH, diverse Teilnahmen an Projekttreffen sowie die Ausrichtung von Projekttreffen und vielen konstruktiven Gesprächen bedanken. Hier sind in erster Linie die Kollegen Dipl.-Ing. (FH) Raimund Friderich, Marco Herdel, Ulrich Kacmarek und Michael Gehring zu nennen. Bei der Firma Arburg GmbH + Co KG möchte ich mich für die Möglichkeit Abformversuche im betriebseigenen Technikum durchzuführen, die Ausrichtung von Projekttreffen und die konstruktive Zusammenarbeit bedanken. Hier sind die Herren Dipl.-Min. Hartmut Walcher, Dipl.-Ing. Marco Maetzig, Dr.-Ing. Thomas Walther und Jürgen Schray als Mitarbeiter zu nennen. Besonderen Dank gilt der Firma Bergmaier GmbH, die bei der mechanischen Bearbeitung der Nickelformeinsätze hervorragende Arbeit geleistet hat. Hier möchte ich mich besonders bei Herrn Markus Bergmaier bedanken. Bei der Firma Horst Scholz GmbH & Co. KG sowie der Firma ETA SA möchte ich mich für die Diskussionen und Gespräche in den ersten Projekttreffen bedanken.

Herrn Dr.-Ing. Marco Thornagel sowie dem ganzen Support Team der Firma Sigma Engineering GmbH danke ich für die Unterstützung in Fragen zum Thema Spritzgussimulation.

Bei der Firma Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG möchte ich mich herzlich bedanken für die kostenfreien Bereitstellungen eines Elektrokleinstmotors. Darüber hinaus möchte ich mich bei der Firma Ticono GmbH für die zur Verfügung gestellten thermoplastischen Formmassen bedanken. Bei der Firma CRGraph bedanke ich mich für die kostenfrei zur Verfügung gestellte Software *Xsel*, die zur Durchführung der statistischen Versuchsplanung verwendet wurde.

Besonderer Dank gilt Frau Sylvia Halder, die mich in schwierigen Zeiten motiviert, aufgebaut und wenn nötig für die notwendige Ablenkung gesorgt hat.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines industrietauglichen Verfahrens, mit dem Ziel endkonturnahe, vereinzelte Mikrobauteile auf Basis der LIGA-Technik herzustellen. Diese Mikrobauteile sollen dazu beitragen neue innovative Ideen in erfolgreiche Produkte umzusetzen und auf dem Markt zu platzieren. Bestehende Einschränkungen der LIGA-Technik bei der Herstellung einzelner polymerer Bauteile, werden mit Hilfe neuartiger Konzepte in der Werkzeugtechnik für die Mikroreplikation, dem Einsatz von mikromechanischen Fertigungsverfahren zur Erzeugung der Außenstruktur der LIGA-Formeinsätze und der Einführung einer messmittelgestützten Prozesskontrolle überwunden.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt darauf, die Möglichkeit zu schaffen, einzelne polymere Mikrobauteile mit hohen Aspektverhältnissen, Strukturdetails im einstelligen Mikrometerbereich, Bauteilgewichten kleiner als 1 mg und einer hohen Formtreue endkonturnah und nachbearbeitungsfrei über ein für die Massenproduktion einsetzbares Replikationsverfahren der Mikrosystemtechnik herzustellen. Für die Umsetzung mussten die Anforderungen bestimmt und verschiedene Herausforderungen gelöst werden:

Die Herstellung einzelner Mikrobauteile bedarf LIGA-Formeinsätzen, die auf die Anforderungen des Replikationsprozesses abgestimmt sind. Hierzu war es notwendig, die Bauteilfüllung während der Replikation über Simulationsprogramme schon innerhalb der Bauteilkonstruktion durchzuführen, die genaue Erzeugung der Kavitätsslage im Abformwerkzeug über Referenzstrukturen zu ermöglichen, die Richtlinien für das Design und die Konstruktion der Bauteile festzulegen sowie die Layouterstellung neu zu gestalten.

Für die nachbearbeitungsfreie und dadurch direkte Replikation der Bauteile über das Mikrospritzgießen musste ein neuartiges Werkzeug-

konzept entwickelt und realisiert werden. Dieses Konzept ermöglicht die präzise Aufnahme der zuvor hergestellten LIGA-Formeinsätze sowie deren Replikation in großen Stückzahlen.

Die Eignung des Verfahrens konnte mittels der Herstellung von Demonstratoren nachgewiesen werden. Dabei handelt es sich um technische Bauteile wie Zahnradstrukturen eines Planetengetriebes, Puzzles, die aus einzelnen Mikrobauteilen zusammengesetzt sind oder komplexen lateralen Formen, die das Potential des Verfahrens aufzeigen. Darüber hinaus konnte in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen das Verfahren auf verschiedenen Mikrospritzgießsystemen qualifiziert werden.

Durch die durchgeführte Entwicklung des „LIGA2.X-Verfahrens“ konnte der Weg für eine breite Anwendung der LIGA-Technik zur Herstellung von endkonturnahen, nachbearbeitungsfreien und einzelnen polymeren Mikrobauteilen in der kunststoffverarbeitenden Industrie geebnet werden.

Abstract

The present work deals with the development of an industry suited process aiming on the fabrication (based on the LIGA technique) of near net shape, single microparts. Those microparts should lead to new innovative ideas and thus to successful products on the market. Existing constraints of the LIGA technique during the fabrication of single polymeric parts are solved with novel concepts of the mold technology for micro replication, use of micro mechanical manufacturing methods in the machining of the outer LIGA mold insert shape and metrology based process control.

The focus of the work is to create the ability to fabricate single polymeric microparts with high aspect ratios, structure details in a single-digit micrometer range, part weights less than 1 mg, high contour accuracy near net shape and without any rework. For the implementation the requirements need to be determined and different challenges need to be solved:

The fabrication of single microparts requires LIGA mold inserts which fulfill the requirements of the replication process. For this purpose, it was necessary to simulate the cavity filling process using commercial simulation software as early in the part design, to enable an exact fabrication of the cavity position on the mold insert, to set a guideline for the part design and to implement a new layout.

The development and realization of a novel mold concept was necessary to reach rework free and thus parts directly replicated via micro injection molding. This new concept enables the precise integration of the previously fabricated LIGA mold inserts as well as their replication in large numbers.

The suitability of the new developed process was demonstrated with the help of different sample parts. Those are technical parts like gear wheel structures of a planetary gear, jigsaw puzzles consisting of

single microparts or parts with a complex lateral shape which can show the potential of the process. Moreover it was possible to qualify the process in cooperation with different partners from industry on different types of micro injection molding machines.

By means of the performed process development of the LIGA2.X process the application area of the existing LIGA technique could be significant extended to produce near net shape microparts in large numbers.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis.....	v
1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
2 Grundlagen der Formeinsatzherstellung und der Replikation ...	5
2.1 Verfahren für die Herstellung von metallischen mini- und μ -Formeinsatzkavitäten	5
2.1.1 μ -Fräsen	7
2.1.2 μ -Funkenerodieren.....	7
2.1.3 Galvanoformung.....	9
2.2 Replikationsverfahren von metallischen 2,5D und 3D μ -Formeinsatzkavitäten	14
2.2.1 Mikro-Spritzgießen	15
2.2.2 Mikro-Spritzprägen.....	25
3 LIGA-Verfahren zur Herstellung von endkonturnahen, polymeren Mikrobauteilen	27
3.1 Stand der Arbeiten zur Herstellung einzelner LIGA-Mikrobauteile	27
3.2 LIGA2.X-Verfahren.....	33
3.3 Bauteil- und Formeinsatzdesign - LIGA2.X	35
3.4 Layouterstellung Nickelstrukturplatte (NISP) - LIGA2.X.....	40
3.5 Maskenherstellung.....	44
3.5.1 Zwischenmaske (ZM).....	45
3.5.2 Arbeitsmaske	46
3.6 Formeinsatzherstellung	49

3.6.1	Resiststrukturierung	50
3.6.2	Nickelstrukturplatte (NISP) - LIGA2.X.....	52
3.6.3	Formeinsatzherstellung - LIGA2.X (mechanische Bearbeitung).....	53
3.7	Mikrospritzgießwerkzeuge - LIGA2.X	58
3.7.1	Werkzeug Microsystem 50 - LIGA2.X.....	59
3.7.2	Werkzeug micro-män 50 - LIGA2.X	61
3.8	Mikrospritzgießprozess - LIGA2.X.....	63
3.8.1	Microsystem 50 (MS 50).....	64
3.8.2	micro-män 50.....	68
3.9	Fazit der Prozessanalyse und Weiterentwicklung des LIGA-Prozesses	72
4	Einführung einer quantitativen Prozesskontrolle im LIGA2.X -Prozess	77
4.1	Messmethode	77
4.2	Maßkontrolle innerhalb der Fertigung der Nickelstrukturplatte (NISP).....	85
4.2.1	Bauteilkonturabhängigkeit in der NISP-Fertigung.....	87
4.2.2	Maßliche Abweichung von kreisrunden galvanisch erzeugten LIGA-Strukturen.....	95
4.3	Maßkontrolle innerhalb der Replikation von LIGA2.X- Mikrobauteilen.....	98
4.3.1	Messtechnische Auswertung von spritzgegossenen Bauteilen und deren Kavitäten.....	99
4.3.2	Abweichungen der replizierten Bauteile von den jeweiligen Formeinsätzen	107
4.4	Zusammenfassung der Prozesskontrolle in der LIGA2.X-Mikrobauteilfertigung	111
5	Prozessoptimierung des LIGA2.X-Prozesses anhand geeigneter Demonstratoren	115
5.1	Statistische Versuchsplanung (DoE).....	115

5.2	Optimierung der Spritzgießparameter am Beispiel des LIGA2.X-Endlospuzzles.....	117
5.2.1	Bestimmung der Einflussgrößen (Mikrospritzgießen)	119
5.2.2	Ergebnisse der statistischen Versuchsplanung (Mikrospritzgießen)	123
5.3	Laterale Designfreiheit in der Konstruktion von LIGA2.X-Bauteilen	127
5.4	Seitenwandqualität von LIGA2.X- Formeinsatzkavitäten	130
5.4.1	Qualitative Auswertung	131
5.4.2	Quantitative Auswertung.....	133
5.5	Galvanoformung von kreisrunden Säulen in kritischen Dimensionen.....	135
5.5.1	Statistische Versuchsplanung (Galvanoformung)	136
5.5.2	Bestimmung der Einflussgrößen (Galvanoformung) ..	138
5.5.3	Ergebnisse der statistischen Versuchsplanung (Galvanoformung)	142
6	Weiterentwicklung der LIGA2.X-Werkzeugtechnik	145
6.1	Konzeptfindung	145
6.2	LIGA2.X-Werkzeugentwurf und Realisierung.....	152
6.3	Abformversuche unter Verwendung des LIGA2.X- Werkzeuges	160
7	Zusammenfassung und Ausblick	165
8	Literaturverzeichnis.....	171
9	Abbildungsverzeichnis	189
10	Tabellenverzeichnis.....	199
11	Abkürzungen und Formelzeichen.....	201
	Anhang.....	207

1 Einleitung und Zielsetzung

Über die Verfahren der Mikrosystemtechnik hergestellte Bauteile sind inzwischen Teil unseres täglichen Lebens geworden: beim Blick auf die Uhr werden vor allem bei qualitativ hochwertigen Armbanduhren eine Vielzahl an Mikrobauteilen für die Anzeige der richtigen Uhrzeit benötigt; beim Genuss von Musik oder Filmen auf dem heimischen Sofa nutzen wir Elemente aus der Mikrosystemtechnik in Form von CDs, DVDs, Blue-rays oder sonstigen Speichermedien; bei jeder Benutzung eines Smartphones, eines Notebooks oder jeder Fahrt mit dem Auto kommen Mikrobauteile zum Einsatz und erfüllen ihre bedeutungsvolle Funktion in einer für das menschliche Auge meist „unsichtbaren“ Umgebung. In Notlagen oder nach Unfällen kommen wir mit Mikrobauteilen und Komponenten in Kontakt, die effektive und schonende Behandlungsmethoden bei zum Beispiel minimalinvasiven Eingriffen in den Bereichen der Endoskopie oder der Mikrochirurgie zulassen [1].

Die Möglichkeit, Bauteile und Baugruppen zu miniaturisieren, erlauben den Produktentwicklern, Designern und Konstrukteuren in Industrie und Forschung neue Denkweisen und Entwicklungen, die zu innovativen Produkten mit neuen komplexen Funktionen führen. Die essentiellen Faktoren für den Markterfolg dieser Produkte sind die zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren und die damit verbundenen Herstellkosten der benötigten Mikrobauteile. Die Verfahren zur Erzeugung von kleinsten hochkomplexen Bauteilstrukturen sind häufig noch teuer und zeitaufwendig. Umso wichtiger ist der Einsatz von „einfachen“ Replikationsverfahren in der Mikrosystemtechnik, wie zum Beispiel dem Mikrospritzgießen, die es ermöglichen, reproduzierbar, energieeffizient und kosteneffizient seriell Mikrobauteile innerhalb kurzer Zykluszeiten und mit geringen Kosten pro Bauteil herzustellen.

Ein bekanntes Verfahren zur Herstellung von kleinsten hochkomplexen Strukturen mit hohen Aspektverhältnissen bei hohen Oberflächenqualitäten ist die **LIGA**-Technik, die sich seit den 80er Jahren in einer kontinuierlichen Weiterentwicklung befindet. Das Akronym LIGA steht hierbei für **L**ithographie, **G**alvanoformung und **A**bformung [2]. Bei diesem Verfahren wird über eine komplexe, zeitaufwendige und kostenintensive Prozesskette, die eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren der Mikrosystemtechnik einschließt, ein mikrostrukturierter Formeinsatz aus Nickel hergestellt. Dieser Formeinsatz beinhaltet die gewünschten Strukturen in negativer (inverser) Form, die anschließend über Replikationsverfahren der Mikrosystemtechnik vervielfältigt werden.

Eine Umfrage bei Industrieunternehmen hat ergeben, dass ein direkter Bedarf an innovativen Produktionsprozessen für die Herstellung von Mikrobauanteilen über das LIGA-Verfahren besteht.

Die Weiterentwicklung von Verfahren zur Herstellung von polymeren, endkonturnahen, das heißt nachbearbeitungsfreien, dreidimensionalen und alleinstehenden LIGA-Mikrobauanteilen in großen Stückzahlen direkt über Replikationsverfahren, stand zunächst nicht im Fokus der Anwendungen. Erst im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 499 (SFB 499) *Mikrounformen* [3], der sich im Schwerpunkt mit den Prozessketten zur Herstellung von hochbeanspruchten Mikrobauanteilen aus Keramik- und Metalllegierungen beschäftigte, wurde das LIGA-Verfahren für die Herstellung von einzelnen Mikrobauanteilen genutzt. In der Demonstratorfertigung hat sich jedoch gezeigt, dass sowohl in der Formeinsatzherstellung über die LIGA-Technik als auch in der Replikation über das Mikrospritzgießen weitere Entwicklungen notwendig sind. Aus den Arbeiten innerhalb der Laufzeit des SFB 499 wurde klar, dass der dort speziell für Pulverformmassen entwickelte Replikationsprozess um eine Prozessfolge ergänzt werden muss, die es erlaubt einzelne polymere Mikrobauanteile direkt über das Mikrospritzgießen herzustellen. Der Hauptgrund hierfür liegt in der notwendigen

Nacharbeit der Bauteile des im SFB 499 entwickelten Prozesses, die diesen in der kunststoffverarbeitenden Industrie nicht rentabel macht.

Ziel der hier vorliegenden Arbeit war es nun, aufbauend auf den Erfahrungen und Ergebnissen des SFB 499, ein neues Verfahren zu entwickeln, mit dem LIGA-Mikrobauteile endkonturnah, maßhaltig und kosteneffizient in großen Stückzahlen hergestellt werden können.

Grundlagen dieser institutsübergreifend realisierten Prozessentwicklung sind die am KIT seit den 80er Jahren durchgeführten Arbeiten zur LIGA-Formeinsatzherstellung sowie die am KIT vorhandenen Erfahrungen und Ergebnisse bei der Replikation von kleinsten Strukturen und Bauteilen über das Mikrospritzgießen und Heißprägen. Der Fokus dieser Arbeit liegt nicht auf den verwendeten Lithographie-Verfahren in der LIGA-Formeinsatzherstellung, sondern vielmehr in der konsequenten Weiterentwicklung der LIGA-Technik mit Zielrichtung auf das Mikrospritzgießen.

Aus den genannten Zielen ergaben sich verschiedene Arbeiten, deren Ergebnisse in den nachfolgenden Kapiteln wie folgt wiedergegeben werden:

- Kapitel 2 stellt die Grundlagen zur Formeinsatzherstellung mit Mikrokavitäten aus Metall, die hohe Aspektverhältnisse beinhalten, vor. Darüber hinaus wird auf die wichtigsten Replikationsverfahren in der Mikrosystemtechnik eingegangen.
- In Kapitel 3 wird der Stand der Arbeiten zur Replikation von endkonturnahen vereinzelt LIGA-Mikrobauteilen beschrieben, ein neues Verfahren zur Herstellung vereinzelter, endkonturnaher Mikrobauteile vorgestellt und es werden die dafür notwendigen einzelnen Prozessschritte analysiert.
- Kapitel 4 befasst sich mit der notwendigen und ganzheitlichen Qualitätskontrolle von LIGA-Strukturen in Bezug auf deren Maßhaltigkeit.

- Kapitel 5 befasst sich mit verschiedenen Bauteilen und Demonstratoren. Die Arbeiten umfassen zum einen die Machbarkeit der Strukturen und zum anderen die Optimierung bei der Herstellung der LIGA-Formeinsätze und der Replikation unter Verwendung des Mikrospritzgießens.
- Kapitel 6 beschreibt, aufbauend auf die vorherigen Kapitel, die Weiterentwicklung der Werkzeugtechnik im Mikrospritzgießen von endkonturnahen LIGA-Mikrobauteilen.
- Kapitel 7 fasst die Arbeit zusammen, Schlussfolgerungen werden getroffen und ein Ausblick auf ergänzende und weiterführende Arbeiten wird gegeben.

Die hier vorliegende Arbeit stellt zum einen die Alleinstellungsmerkmale der LIGA-Technik heraus und zeigt zum anderen ihre verfahrensbedingten Grenzen auf. Eine Anregung für den Einsatz von LIGA-Mikrobauteilen in Anwendungen aus den verschiedensten Bereichen der Industrie und Forschung wird generiert. Durch die in der Arbeit vorgestellten Demonstratoren werden die Möglichkeiten des neuen Verfahrens zur Replikation von endkonturnahen, polymeren LIGA-Mikrobauteilen aufgezeigt und gleichzeitig dazu animiert, dieses für die Fertigung von Produkten einzusetzen.

2 Grundlagen der Formeinsatzherstellung und der Replikation

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Verfahren zur Herstellung von zweieinhalbdimensionalen (2,5D) und dreidimensionalen (3D) μ -Formeinsatzkavitäten gegeben. Darüber hinaus werden die wichtigsten Replikationsverfahren der Mikrotechnik vorgestellt, mit denen es möglich ist, Bauteile mit kleinsten Dimensionen in großer Stückzahl zu vervielfältigen.

2.1 Verfahren für die Herstellung von metallischen mini- und μ -Formeinsatzkavitäten

Die Verfahren für die Herstellung von 2,5D und 3D mini- und μ -Formeinsatzkavitäten¹ lassen sich, wie in Abb. 2.1 dargestellt, in generative und abtragende Verfahren einteilen. Zudem gibt es noch vorgelagerte Prozesse, die zum Beispiel zur Herstellung von Masterstrukturen eingesetzt werden [4], [5]. Die Herstellverfahren haben aufgrund verfahrensbedingter Randbedingungen unterschiedliche Grenzen bei den minimal erreichbaren Strukturdetails, den dazugehörigen maximal erreichbaren Aspektverhältnissen sowie den erreichbaren Oberflächengüten. Im Folgenden wird auf die, für die vorliegende Arbeit relevante, Herstellverfahren eingegangen [6].

¹ Unter einer Mini- beziehungsweise μ -Formeinsatzkavität wird die Negativform des herzustellenden Mini- oder Mikrobauteils im Formeinsatz verstanden. Die Einteilung in Mini- beziehungsweise Mikrobauteile wird in Tabelle 2.1 gegeben.

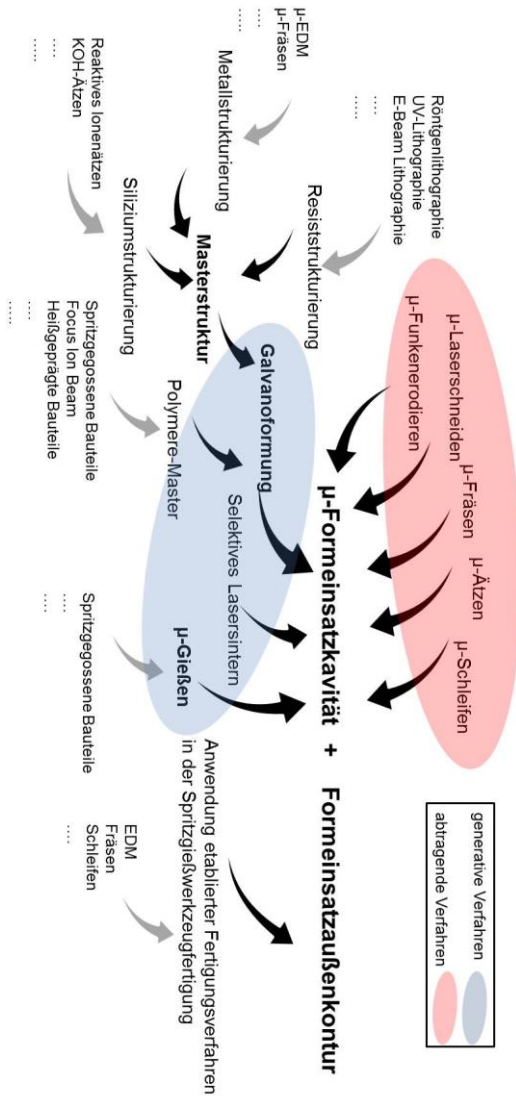


Abb. 2.1: Darstellung der Herstellverfahren für metallische 2,5D und 3D μ -Formeinsatzkavitäten.

2.1.1 μ -Fräsen

Das abtragende Verfahren μ -Fräsen erfolgt unter Verwendung von miniaturisierten Werkzeugen. Die Dimensionen und die Beschaffenheit der zur Verfügung stehenden Werkzeuge bestimmen die minimal erreichbaren Strukturdetails sowie die Strukturqualität [7]. Werkzeuge mit Durchmesser bis zu 10 μm bei 30 μm Schneidenlänge sind kommerziell erhältlich [8]. In [9] wurde eine 4 μm breite, 29 μm lange und 3 μm tiefe Nut in Messing unter Verwendung eines Werkzeuges mit 3 μm Durchmesser erzeugt. Häufig bestehen die Werkzeuge aufgrund der guten Eigenschaften bezüglich der Härte und der Festigkeit bei hohen Temperaturen aus Wolframcarbid (WC). Verwendete Herstellverfahren für solche Werkzeuge sind unter anderem Schleifen, μ -EDM und Focused Ion Beam (FIB) [9], [7], [10].

Die Maschinenteknik für das μ -Fräsen reicht von kommerziell erhältlichen Maschinen mit hochpräzisen xy-Tischen mit Linearachsen und Hochgeschwindigkeitsspindeln [11], [12], [13] bis zu miniaturisierten Maschinen in Forschungseinrichtungen [7], [14], [15], [16].

Das μ -Fräsen wird bei der Herstellung von 2,5D und 3D μ -Formeinsatzkavitäten in Spritzgießwerkzeugen häufig verwendet. Über das μ -Fräsen kann eine breite Materialpalette von Werkstoffen, die für den Formenbau geeignet sind, bearbeitet werden (wie zum Beispiel Messing oder verschiedenste Werkzeugstähle [17]). Limitiert ist das μ -Fräsen in erster Linie in den erreichbaren Aspektverhältnissen der zu erzeugenden Strukturen. Darüber hinaus wirkt sich die geringe Prozesssicherheit durch Werkzeugverschleiß beziehungsweise Werkzeugbruch negativ auf die Qualität der μ -Formeinsatzkavitäten aus.

2.1.2 μ -Funkenerodieren

Das μ -Funkenerodieren (μ -EDM) ist die Anpassung des im Formenbau etablierten Funkenerodierens (EDM) und dessen Maschinenteknik

[18] an die Anforderungen bei der Herstellung von hochpräzisen Mikrostrukturen. Das thermisch abtragende Verfahren basiert auf elektrischen Entladungsvorgängen zwischen einer Werkzeugelektrode und dem zu bearbeitenden Werkstückes in einer elektrisch nicht leitenden Flüssigkeit (Dielektrikum) [18]. Beim Funkenerodieren wird die Form der Werkzeugelektrode (bei gleichzeitigem schichtweisem Materialabtrag an der Werkzeugelektrode und am Werkstück) spiegelbildlich in das Werkstück übertragen. Die einzige Anforderung, die das Verfahren an das zu bearbeitende Material (bis auf wenige Ausnahmen in der Bearbeitung von Keramik [19]) stellt, ist die elektrische Leitfähigkeit. Das Funkenerodieren erlaubt die Bearbeitung von Materialien unabhängig von ihrer Härte. Dies ermöglicht die Strukturierung von Materialien, die über spanabhebende Verfahren nur unter hohem Aufwand möglich wäre.

Für die Mikroformenfertigung kommen in der Regel drei Varianten des μ -EDM zum Einsatz: Das μ -Drahterodieren (μ -WEDM), das μ -Senkerodieren und das μ -EDM-Fräsen [6]. Die drei Verfahren können anhand der Form und der Art der verwendeten Werkzeugelektrode sowie der Bewegung der Werkzeugelektrode relativ zum Werkstück unterschieden werden.

Beim μ -WEDM wird als Elektrode ein dünner Draht verwendet (mit Durchmessern im unteren zweistelligen Mikrometerbereich), der durch das Werkstück geführt und über die Maschinenachsen bewegt wird [6]. Über das μ -WEDM können Schnittbreiten von 40 μm bei Aspektverhältnissen größer 100 erzeugt werden [20]. Das Verfahren, mit dem gerade Strukturen ohne Krümmung in der Richtung, in die der Draht abgewickelt wird, erzeugt werden können, wird im Formenbau vorrangig für die Herstellung von Stanzwerkzeugen oder Elektroden für das μ -Senkerodieren, eingesetzt.

Das μ -Senkerodieren hingegen kommt vorrangig bei der Herstellung von Kavitäten in Spritzgieß- und Heißprägewerkzeugen zum Einsatz [20]. Die in dieser Prozessvariante verwendete Elektrodenform entspricht in etwa der Negativform der geforderten Struktur. Zu den

gängigen Elektrodenmaterialien gehören Kupfer, Graphit sowie Wolfram. Die Werkzeugelektrode beziehungsweise das Werkstück wird mit Hilfe der Senkerodiermaschine präzise bewegt, so dass die Elektrodenform positionsgenau übertragen wird. Begrenzend für dieses Verfahren sind die Möglichkeiten der Elektrodenherstellung. In [21] wurde erstmals die Erzeugung von Löchern mit Durchmesser $0,5\ \mu\text{m}$, unter Verwendung von Silizium-Elektroden mit Durchmessern kleiner $0,15\ \mu\text{m}$, berichtet.

Beim μ -EDM-Fräsen kann auf die Herstellung von komplexen Werkzeugelektroden, wie beim μ -Senkerodieren, verzichtet werden. In dieser Prozessvariante wird eine kreisrunde Elektrode mit Durchmessern bis zu $10\ \mu\text{m}$ rotiert und über μ -Frässtrategien bewegt. Dadurch können komplexe 3D-Strukturen erzeugt werden [22], [23]. In [22] wurden $20\ \mu\text{m}$ breite und $90\ \mu\text{m}$ tiefe Kanäle über μ -EDM-Fräsen in Silizium unter Verwendung einer Wolframcarbidelektrode (Durchmesser $15\ \mu\text{m}$) erzeugt. Beim μ -EDM-Fräsen ist die Erzeugung der minimalen Querschnitte der rotierenden Elektrode als bestimmender Faktor, der das Verfahren in seinen erreichbaren Strukturdetails limitiert, zu sehen [20].

Die Werte der minimal erreichbaren Oberflächenrauheiten, die über das μ -EDM realisiert werden können, sind bedingt durch das Prinzip des Materialabtrages schlechter als die des μ -Fräsens und weit schlechter als jene, die über das LIGA-Verfahren möglich sind. Erreichbare Oberflächenqualitäten für die Verfahren zur Herstellung von Mikrokavitäten sind $R_a \sim 0,1\ \mu\text{m}$ für das μ -Senkerodieren und $R_a \sim 0,2\ \mu\text{m}$ für das μ -EDM-Fräsen [20].

2.1.3 Galvanoformung

Die Galvanoformung ist ein urformendes Verfahren zur Herstellung von häufig mehrere Millimeter dicken, metallischen, selbsttragenden Bauteilen. Bei der weit verbreiteten Galvanostegie (elektrolytisches Beschichten) hingegen werden dünne Schichten im Regelfall mit einer

Dicke kleiner 50 µm galvanisch erzeugt, die als Schutzschicht oder optische Aufwertung des zu beschichteten Bauteils dient [24].

Bei der Galvanoformung gibt die leitfähige Masterstruktur (Kathode) die gewünschte Form vor. Dieser Master wird durch elektrolytisches Abscheiden von Metall exakt repliziert und danach mechanisch oder elektrochemisch entfernt. Diese selbsttragende Kopie kann daraufhin entweder erneut als Master, um die originale (positive) Form zu erzeugen, oder direkt als fertiges metallisches Bauteil verwendet werden. Vorteile der Galvanoformung sind hohe Formtreue und die äußerst geringen maßlichen Abweichungen der erzeugten Kopie im Vergleich zum Master. Darüber hinaus können kleinste Strukturdetails sowie komplexe Formen bis in den Sub-Mikrometer Bereich übertragen werden. Die Galvanoformung ist in ihrer Skalierbarkeit nahezu ausschließlich über die verfügbare Anlagengröße limitiert. Nachteile beziehungsweise maßgebende Einschränkungen der Galvanoformung sind die langen Prozesszeiten, Materialeinschränkungen, die beschädigungsfreie Entfernung des Masters, Dickenunterschiede und eingeschlossene Spannungen im erzeugten Bauteil [24], [25].

Die Anwendung der Galvanoformung in der Industrie sowie der Forschung sind vielfältig. Dünne Folien aus Kupfer, Nickel oder Eisen werden in großen Mengen hergestellt und in verschiedenen Bereichen eingesetzt. Ein weiteres großes Anwendungsgebiet ist die Erzeugung von perforierten Produkten wie Rasiererrosetten, Filter und Siebe [24]. Nicht zuletzt ist die Galvanoformung bestens geeignet, über Verfahren der Mikrotechnik strukturierte Master in Matrizen, in Formeinsätze oder direkt in metallische Mikrobauteile zu verwandeln. Eindrucksvolle Beispiele hierfür sind die Produktionswerkzeuge für CDs, DVDs und Blue-rays, die über das Spritzgießen oder Spritzprägen vervielfältigt werden können [25], [26].

Bei der Herstellung von Formeinsätzen für das Mikrospritzgießen mittels Galvanoformung kommen verschiedenste Master zum Einsatz. Beispiele hierfür sind:

- Siliziumwafer mit geätzten Strukturen (Beispiele: anisotropes reaktives Ionenätzen, oder anisotropes Ätzen mit Kaliumhydroxid (KOH)) [27], [28]
- Siliziumwafer mit strukturiertem Resist (Beispiele: Resiststrukturierung über Elektronenstrahlolithographie, Laserlithographie, UV-oder Röntgenlithographie (LIGA)) [29], [30]
- Metallische Substrate (Stahl, Kupfer) mit strukturiertem Resist (Beispiele: Resiststrukturierung über Elektronenstrahlolithographie, Laserlithographie, UV-oder Röntgenlithographie (LIGA)) [31], [32]
- Polymere Masterbauteile, zum Beispiel hergestellt über Protonenlithographie [33]; [34]
- Polymere spritzgegossene Masterbauteile aus leitfähigem Thermoplast [35].

Im Folgenden werden zwei wichtige Verfahren zur Herstellung von Formeinsätzen mit μ -Formeinsatzkavitäten, welche die Galvanoformung als wesentlichen Prozessschritt beinhalten, vorgestellt

LIGA-Verfahren

Die Entwicklung des LIGA-Verfahrens hat seinen Anfang in den 80er Jahren im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KFK) genommen. Im Rahmen der Entwicklung des Trenndüsenverfahrens zur Anreicherung von Uran-235 wurden Trenndüsen benötigt, die mit den damaligen Möglichkeiten zur Strukturierung (wie zum Beispiel dem Diamantfräsen oder Ätzen) nicht herstellbar waren. Die benötigte Düsengeometrie hatte Spaltmaße im einstelligen Mikrometerbereich und erforderte hohe Aspektverhältnisse. Die Entwicklung des LIGA-Verfahrens, erstmals veröffentlicht in [2], ermöglichte die Herstellung von Trenndüsen mit den geforderten Dimensionen.

Im ersten Schritt des LIGA-Verfahrens, der Röntgentiefenlithographie, wird das auf der Maske befindliche Absorbermuster in einen röntgenempfindlichen Resist mittels Synchrotronstrahlung übertragen. Als Resist wird häufig PMMA (Polymethylmetacrylat) eingesetzt, das auf

ein Kupfersubstrat mit röntgenempfindlichem Klebstoff aufgebracht wurde. In der darauffolgenden Entwicklung werden (bei der Verwendung von PMMA als Resist) die mittels Synchrotronstrahlung bestrahlten Bereiche selektiv zu den unbestrahlten Bereichen mit einer geeigneten Entwicklerlösung nasschemisch entfernt. Im zweiten Schritt des LIGA-Verfahrens, der Galvanoformung, kann nun Metall (häufig Nickel) in die freientwickelten Bereiche zwischen den Resiststrukturen abgeschieden werden. Die Metallabscheidung beginnt hierbei auf dem leitfähigen Substrat und wird durchgeführt, bis eine geschlossene Metallstruktur vorliegt. Diese Metallstruktur wird im dritten und letzten Schritt des LIGA-Verfahrens als Formeinsatz in Replikationsverfahren, wie dem Spritzgießen oder Heißprägen eingesetzt [36]. In Kapitel 3 wird das LIGA-Verfahren sowie dessen Prozessablauf detailliert beschrieben.

In den 90er Jahren hat sich das LIGA-Verfahren zu einer vielversprechenden Technologie für die Herstellung von Mikrostrukturen mit hohen Aspektverhältnissen und freien lateralen Formen entwickelt [37], [38], [39]. Beispiele für damals hergestellte LIGA-Strukturen sind Beschleunigungssensoren [40] und Mikroturbinen [41]. Das LIGA-Verfahren hat in den 90er Jahren mit der Implementierung von LIGA-Beamlines in Nordamerika, Australien, Asien und Europa den Weg in die Welt gefunden [42].

Zusätzlich wurden in den 90er Jahren Anstrengungen zur Erstellung von Gestaltungsrichtlinien für die Konstruktion von LIGA-Produkten unternommen [43]. Weitere Arbeiten waren ausgerichtet auf Maßkontrolle, Konstruktionsrichtlinien sowie Standardisierung des Verfahrens [44], [45], [46]. Diese sollten das LIGA Verfahren für die industrielle Anwendung attraktiver machen [47], [48].

UV-LIGA-Verfahren

Das UV-LIGA-Verfahren ist eine Modifikation des LIGA-Verfahrens zur Herstellung von metallischen Mikrobauteilen und Formeinsätzen. Der Prozessablauf entspricht dem des LIGA-Verfahrens, jedoch unter-

scheiden sich die Belichtungsquelle, die Maskentechnik sowie die Art des Resists.

Der am häufigsten verwendete Fotoresist ist der auf Epoxy basierende SU-8, [49]. Der Resist wird über Spincoating auf einen Siliziumwafer aufgeschleudert. In [49] konnten SU-8 Resistdicken bis 1.200 μm gezeigt werden. Als Belichtungsquellen kommen meist Quecksilberdampflampen im Maskalinger mit Wellenlängen von 365 nm (i-Linie), 404 nm (h-Linie) und 435 nm (g-Linie) zum Einsatz. Die bei der Belichtung am häufigsten verwendeten Masken sind kommerziell erhältliche Chrom-On-Glass (COG) Masken [50]. Nach der Entwicklung des belichteten Resists erfolgt die Galvanoformung zu Formeinsätzen oder einzelnen metallischen Bauteilen. Die am häufigsten verwendeten Metalle für UV-LIGA-Produkte sind Nickel und Nickelphosphor.

Das UV-LIGA-Verfahren hat seinen Weg in die industrielle Produktion Ende der 90er Jahren gefunden. Der Marktführer Mimotec SA, gegründet 1998 in der Schweiz, hat mit der Produktion von Formeinsätzen begonnen und sein Kerngeschäft in der Herstellung von metallischen Mikrobauteilen, vorrangig für die Uhrenindustrie, gefunden [51].

Die Fa. Mimotec SA bietet derzeit Formeinsätze mit mehrstufigen Kavitäten, hergestellt aus Nickel oder Nickelphosphor, an. Bei einer geforderten Strukturtiefe von 400 $\mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ ist das maximal mögliche Aspektverhältnis 10. Die erreichbare Seitenwandqualität liegt bei $R_a \leq 20\text{nm}$ und die maximale Formeinsatzdicke bei 1.000 $\mu\text{m} \pm 10\mu\text{m}$. Weitere Hersteller von UV-LIGA-Formeinsätzen sind diverse Forschungseinrichtungen, von denen keine belastbaren Spezifikationen der Strukturen verfügbar sind sowie weitere Firmen, die sich auf die Herstellung von mikro- und nanostrukturierten Produkten spezialisiert haben, wie zum Beispiel die Fa. Temicon GmbH in Dortmund oder die MiniFAB Ltd in Victoria; Australien [52], [53], [54], [55].

2.2 Replikationsverfahren von metallischen 2,5D und 3D μ -Formeinsatzkavitäten

Replizierende Verfahren sind in der Massenfertigung von makroskopischen Produkten sehr verbreitet. Vor allem in der kunststoffverarbeitenden Industrie kommt das hochautomatisierte Verfahren Spritzgießen vielfach zum Einsatz. Die Bandbreite von Kunststoffbauteilen, hergestellt über das Spritzgießen, erstreckt sich von Formteilen mit einem Gewicht von wenigen Milligramm bis zu 150 kg [56], wobei sich die Zykluszeit zwischen Sekunden und einigen Minuten bewegt. Viele Sonderverfahren der Spritzgießtechnologie existieren, wie zum Beispiel das Mehrkomponentenspritzgießen (bei dem mehrere Komponenten während des Spritzgießprozesses verbunden werden), das Pulverspritzgießen (PIM) (bei dem Metall oder Keramikbauteile hergestellt werden), das Spritzprägen (welches größere Fließweg-Wanddickenverhältnisse zulässt), um nur die wichtigsten zu nennen [56]. Auch für die Herstellung von mikrostrukturierten Bauteilen oder Bauteilen mit Dimensionen im Mikrometerbereich wurden spezielle Verfahren entwickelt. Zu den in diesem Bereich etablierten Verfahren gehören die folgenden Mikroreplikationsverfahren [57], [58]:

- Mikro-Reaktionsgießen (RIM)
- Mikro-Spritzgießen (Sonderverfahren der Spritzgießtechnologie)
- Mikro-Spritzprägen (Sonderverfahren der Spritzgießtechnologie)
- Mikro-Heißprägen
- Mikro-Thermoformen

Eine Einteilung der Mikroreplikationsverfahren kann über die in den jeweiligen Prozessen charakteristischen Bereiche der Verarbeitungstemperatur der polymeren Formmasse gemacht werden (siehe Abb. 2.2) [57].

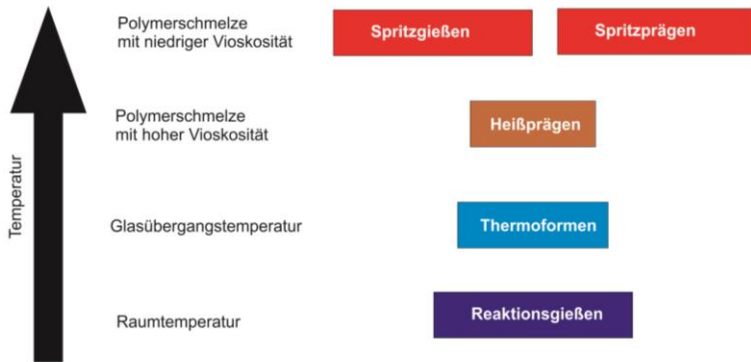


Abb. 2.2: Aufteilung der Mikroreplikationsverfahren nach deren charakteristischen Temperaturbereichen bei der Verarbeitung von polymerer Formmasse

Darüber hinaus unterscheiden sich die Verfahren in ihren derzeitigen Entwicklungsstadien, wobei die Verfahren Mikro-Spritzgießen und Mikro-Spritzprägen einen hohen Automatisierungs- und Entwicklungsgrad aufweisen. Mehrere kommerzielle Mikrospritzgießsysteme sind auf dem Markt erhältlich. Für die Prozesse Heißprägen, Mikro-Reaktionsgießen sowie das Mikro-Thermoformen hingegen sind derzeit nur Maschinen mit einem niedrigen Automatisierungsgrad verfügbar, die hauptsächlich in Laboratorien und Instituten verwendet werden [57].

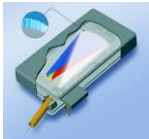
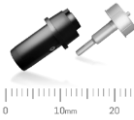
Für die industrielle Herstellung von LIGA-Mikrobauteilen aus thermoplastischen Formmassen kommt derzeit nur das Mikro-Spritzgießen oder das Mikro-Spritzprägen in Frage. Auf diese Verfahren wird im Folgenden näher eingegangen.

2.2.1 Mikro-Spritzgießen

Die Anwendung der Spritzgießtechnologie für mikrostrukturierte Bauteile oder Mikrobauteile mit Abmaßen im Mikrometerbereich ermöglicht den wirtschaftlichen Durchbruch dieser Art von Bauteilen und den damit realisierbaren Produkten durch die Herstellung in

großen Stückzahlen bei geringen Kosten pro Bauteil. Der Übergang zwischen makroskopischem und mikroskopischem Spritzgießen ist fließend [1]. Im Rahmen dieser Arbeit zählt unter das Mikrospritzgießen die Herstellung von mikrostrukturierten Bauteilen, von Minibauteilen und von Mikrobauteilen. Eine Einteilung anhand der charakteristischen Merkmale der jeweiligen Art von Bauteilen ist in Tabelle 2.1 gegeben.

Tabelle 2.1: Einteilung des Mikrospritzgießens anhand der charakteristischen Merkmale der hergestellten Bauteile

	Mikrobauteil	Mikrostrukturiertes Bauteil	Minibauteil
Bauteilbeschreibung	Sehr kleines Bauteil mit lateralen Abmaßen im μ -Bereich.	Makroskopisches Bauteil, das viele Strukturen im μ - oder Sub- μ -Bereich auf der Oberfläche beinhaltet.	Kleines Bauteil mit lateralen Abmaßen im einstelligen Millimeterbereich.
Charakteristisches Bauteilgewicht (Thermoplast)	≤ 1 mg	$\gg 1$ g	≤ 1 g
Beispiele		Mikrospektrometer [59]	Mikropumpe (5 μ l) [60]
			

Um Bauteile mit Strukturen im Mikrometerbereich mit zusätzlich hohen Aspektverhältnissen über das Spritzgießen herstellen zu können, sind Anpassungen der Werkzeugtechnik sowie des Prozessablaufs notwendig [61], [62]. Im Folgenden werden der Spritzgießprozess allgemein sowie die Besonderheiten beim Mikrospritzgießen beschrieben.

Prozessablauf

In Abb. 2.3 sind die drei zentralen Phasen des Standardspritzgießprozesses dargestellt. Im Wesentlichen wird thermoplastisches Material aufgeschmolzen, homogenisiert und in ein temperiertes Werkzeug eingespritzt.

Im ersten Schritt des Spritzgießprozesses, dem Einspritzvorgang, wird ein Teil der aufgeschmolzenen Formmasse über eine Vorwärtsbewegung der Schnecke in das temperierte Werkzeug eingespritzt (Abb. 2.3). Die Bewegung der Schnecke wird dabei in der Regel über deren Geschwindigkeit kontrolliert und gesteuert. Nach der volumetrischen Füllung der Werkzeugkavität wird zeit- oder wegabhängig auf einen druckgesteuerten Prozess umgeschaltet.

Im zweiten Schritt befindet sich die Schnecke in vorderster Stellung und drückt dabei auf ein, vor der Schneckenspitze befindliches Restmassopolster. Über diesen sogenannten Nachdruck wird Formmasse in die Werkzeugkavität nachgedrückt, um die Volumenschwindung, resultierend aus der Abkühlung der Formmasse im Werkzeug, auszugleichen. Der Nachdruck wird idealerweise solange aufrechterhalten, bis die Siegelzeit² des Angusses erreicht ist. Nach der Druckentlastung der Formmasse ist die Einspritz- und Nachdruckphase abgeschlossen. Die Schnecke kann nun zurückgezogen und neue Formmasse für den nächsten Zyklus aufdosiert werden (Abb. 2.3).

² Unter der Siegelzeit wird der Zeitpunkt verstanden, an dem die Formmasse erstarrt und keine Formmasse mehr fließen kann. Bei dünnwandigen oder sehr kleinen Bauteilen kann es vorkommen, dass Formteilbereiche vor dem Anschnitt, die Siegelzeit erreichen und erstarren [63].

In der dritten und letzten Phase des Spritzgießprozesses, dem Auswerfen, steht die Schnecke nach vollständigem Aufdosieren der Formmasse in einer, über den Schneckenweg vorgegebenen, hinteren Position. Das Werkzeug wird nach Ablauf der vorgegebenen Kühlzeit um einen definierten Weg geöffnet und das erstarrte Bauteil aus der Kavität gestoßen. In der Regel werden für das Ausstoßen des Formteils hydraulisch, pneumatisch oder elektrisch angetriebene Auswerfervorrichtungen (zum Beispiel Auswerferstifte) verwendet (Abb. 2.3). Die Bauteile werden entweder über ein Handlingsystem vollautomatisch beziehungsweise manuell entnommen oder fallen in einen Auffangbehälter. Nachdem das Werkzeug unter Aufbringen der Schließkraft geschlossen wurde, kann der Prozessablauf in einem neuen Zyklus beginnen [56], [57], [63], [64].

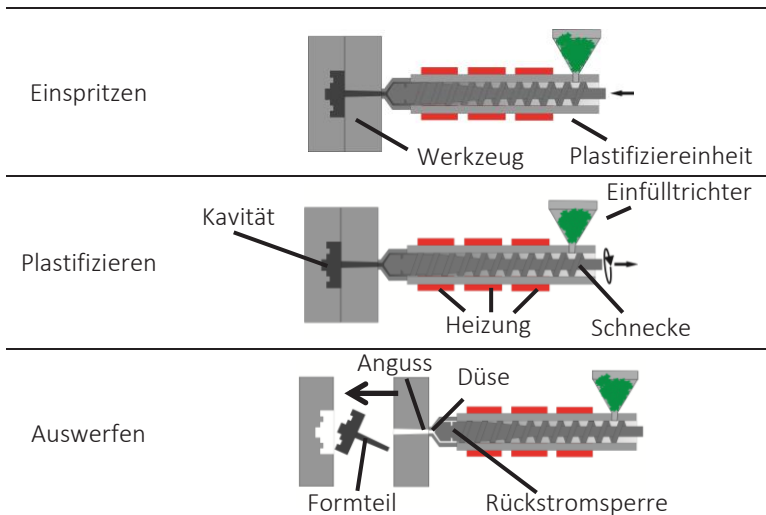


Abb. 2.3: Schematische Darstellung der drei wesentlichen Prozessschritte im Standardspritzgießprozess

In Abb. 2.4 ist der charakteristische Verlauf des Werkzeuginnendrucks während eines Spritzgießzykluses gezeigt. In der Einspritzphase steigt der Druck aufgrund des Einspritzvorganges. In dieser frühen Phase

wird die Oberfläche der späteren Formteile beeinflusst. Die darauffolgende Kompressionsphase hat Einfluss auf die Formteileigenschaften, wie zum Beispiel die vollständige volumetrische Füllung, und die Gratbildung. Nach der Umschaltung des Drucks können in der Nachdruckphase die Maßhaltigkeit, das Gewicht sowie der Verzug über die Nachdruckhöhe und Länge beeinflusst werden [56], [57], [63].

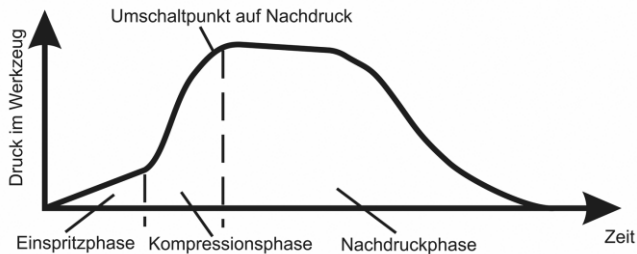


Abb. 2.4: Charakteristischer Verlauf des Werkzeuginnendrucks während eines Spritzgießzyklus

Besonderheiten des Mikrospritzgießens

Die Mikrospritzgießtechnologie benötigt eine Anpassung der Werkzeugtechnologie. Es werden besondere Anforderungen an das Temperaturmanagement, die Abdichtung der einzelnen Werkzeugplatten untereinander sowie an die Präzision der Kavität und die Werkzeugführungen gestellt.

Bauteile mit dünnen Wandungen und langen Fließwegen, wie sie charakteristisch in der Mikrotechnik sind, benötigen für eine vollständige Formfüllung vielfach eine variotherme Prozessführung. Dies bedeutet, dass vor dem Einspritzvorgang die Werkzeugwandtemperatur möglichst nahe an die Schmelztemperatur des zu verarbeitenden Kunststoffes gebracht, die Formmasse bei dieser Temperatur eingespritzt und die Werkzeugwand danach auf die Entformungstemperatur gekühlt werden muss (siehe Abb. 2.5). Durch diese Prozessführung können weitaus längere Fließwege sowie eine bessere Ausheilung von Bindenähten erreicht werden. Eine variotherme Prozessführung kann im Spritzgießwerkzeug über einen zweiten Öl- oder Wasserkreislauf,

eine elektrische Beheizung, einen Wärmeeintrag über Laser [65] oder über induktive Beheizung [66] in Kombination mit Temperaturfühlern realisiert werden. Um die Zykluszeiten, die sich durch das zyklische Temperieren des Werkzeuges erhöhen, kurz zu halten, muss die zu temperierende Masse im Werkzeug so gering wie möglich ausgelegt werden. Eine intelligente Trennung der zyklisch zu temperierenden Werkzeugbereiche über Luftspalte oder Isolierplatten ist für eine wirtschaftliche Anwendung des variothermen Temperaturmanagements unabdingbar [56], [67], [68], [69].

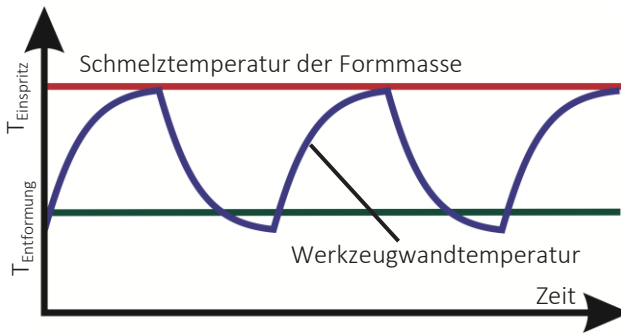


Abb. 2.5: Schematische Darstellung des Werkzeugtemperaturverlaufs bei variothermer Prozessführung

Eine weitere Besonderheit des Mikrospritzgießens ist die Evakuierung der Kavitäten und des Angussystems. Dies ist im makroskopischen Standardspritzgießprozess nicht notwendig, da hier Platz ist, Entlüftungsspalte oder -bohrungen einzubringen. Beim Mikrospritzgießen ist dies meist nicht realisierbar, da die Dimensionen der Spalte oftmals die Kavität oder große Teile davon unbrauchbar machen würden. Die Evakuierung erfolgt über eine Vakuumpumpe und setzt voraus, dass die Werkzeugplatten, welche das Angussystem und die Kavität ausbilden, gegeneinander abgedichtet sind und dadurch den zu evakuierenden Bereich eingrenzen. Die Evakuierung der Kavität erfolgt im Prozess direkt nach dem das Werkzeug auf den Evakuierungsspalt zugefahren wurde. Nach der Evakuierung auf einen vorge-

gebenen Druck wird das Werkzeug vollständig geschlossen und die Schließkraft aufgebracht. Die Entlüftung der Kavität und des Angussystems ist notwendig, da sonst Luft beim Einspritzen in die Kavität geschoben und komprimiert wird, die entweder zu einer Beschädigung des Bauteils durch den „Diseleffekt³“ führt oder keine vollständige Formfüllung zulässt [56], [70], [71].

Die Entformung der Bauteile beim Mikrospritzgießen stellt auf Grund der Bauteilgröße und des Verhältnisses Bauteilwand zu Bauteilvolumen, das bei Mikrobauteilen häufig sehr groß ist, eine besondere Herausforderung dar. Bei der Fertigung der Kavität werden deshalb hohe Anforderungen an die Qualität der Seitenwände bezüglich Oberflächengüte und Form gestellt. In Abb. 2.6 sind Beispiele für günstige und ungünstige Kavitätsformen bezüglich ihrer Entformbarkeit gezeigt. Vor allem bei mikrostrukturierten Bauteilen ist die Qualität der Seitenwände ein großes Problem, da eine hohe Anzahl an der Entformung beteiligt ist. Selbst bei idealer Seitenwandqualität aller Strukturen resultiert allein durch die Anzahl der Seitenwände eine hohe Entformungskraft. Haben einzelne dieser Seitenwände schlechte Entformungseigenschaften, führt dies schnell dazu, dass der Formeinsatz nicht für die Replikation verwendet werden kann, [72], [73].

³ Der Diseleffekt äußert sich in Brandstellen am Fließwegende (sichtbare schwarze Stellen). Der Diseleffekt entsteht, wenn Luft in der Kavität eingeschlossen und stark komprimiert wird, so dass der Kunststoff durch die damit verbundene lokale Temperaturerhöhung einen thermischen Schaden erleidet. [56]

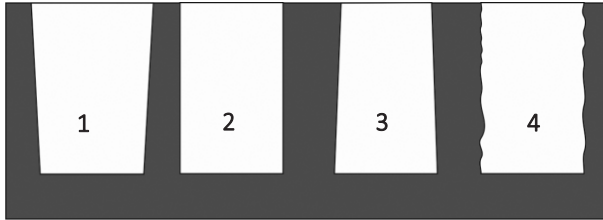


Abb. 2.6: Schematische Darstellung unterschiedlicher Kavitätsqualitäten hinsichtlich ihrer Entformungseigenschaften (1 Kavität mit glatten Seitenwänden und Entformungsschrägen ► sehr gute Entformungseigenschaften; 2 glatte und lotrechte Seitenwände ► gute Entformungseigenschaften; 3 glatte Seitenwände und Hinterschnitt der Seitenwände ► schlechte Entformungseigenschaften (bei zu großer Abweichung von der Lotrechten keine Entformung möglich); 4 Hinterschnitte durch Riefen oder Beschädigungen ► schlechte bis sehr schlechte Entformungseigenschaften abhängig von der Tiefe und Häufigkeit der Hinterschnitte)

Weitere wichtige Faktoren, die bei der Entformung zum Tragen kommen, sind die Erhöhung der Entformungskraft resultierend aus der thermischen Schwindung der Formmasse sowie die elastische Verformung der Formeinsätze bei Beaufschlagung der Schließkraft während des Spritzgießvorganges. Die Auswirkung der thermischen Schwindung auf die Entformungseigenschaften ist stark von der Formmasse, der Bauteilgeometrie, der Art des Angusses und der Position des Anschnittes abhängig. Bei mikrostrukturierten Bauteilen ist der Einfluss der thermischen Schwindung besonders kritisch zu betrachten. Die Trägerplatte oder Restschicht zeigt andere Schwindungseigenschaften auf wie die darauf befindlichen Mikrostrukturen, was zu einer signifikanten Erhöhung der Entformungskraft führt. Folgend können während des Entformungsvorganges einzelne Mikrostrukturen oder im Extremfall ganze Mikrostrukturbereiche abreißen und im Formeinsatz verbleiben [72], [73], [74].

In der Werkzeugtechnik für das Mikrospritzgießen müssen die Führung und die Zentrierung der Werkzeugplatten zueinander in engen Toleranzen ausgelegt sein. Ohne genaue Zentrierung der Werkzeugteile können die hohen Anforderungen an die abgeformten Bauteile

bezüglich ihrer Maßhaltigkeit und Formtreue nicht gehalten werden. Bei komplexen Bauteilen kommt es häufig vor, dass verschiedene Kavitätsbereiche durch bewegliche Kerne abgebildet werden, die ihre Position reproduzierbar in jedem Spritzgießzyklus anfahren. Häufig können auf Grund von Einbaugrößen die in Standardspritzgießwerkzeugen verbauten Normalien zur Zentrierung nicht verwendet werden. Aus diesem Grund werden zum Beispiel für die Realisierung der Lagerungen hochpräzise individuelle Zentrierkonturen eingesetzt.

Bei der Herstellung von Mini- beziehungsweise Mikrobauteilen werden, auf Grund der geringen Bauteil- beziehungsweise Einspritzvolumen an die Maschinenteknik, hohe Anforderungen gestellt [1]. Die kleinen Materialmengen erlauben es nicht, Standardplastifiziereinheiten mit vergleichsweise großen Schneckendurchmessern zu verwenden. Die für einen Abformzyklus in Standardplastifiziereinheiten aufdosierte Materialmenge übersteigt häufig bei weitem das benötigte Materialvolumen für einen Abformzyklus in der Mikrotechnik. Dies führt dazu, dass die Plastifiziereinheit nicht in ihrem optimalen Bereich arbeiten kann. Es kommt zu hohen Verweilzeiten⁴ des Materials, das zu einer thermischen Schädigung und dadurch zu verminderter Bauteilqualität führen kann. Darüber hinaus ist es nicht möglich, kleinste Mengen von Material über die Einspritzbewegung von Standardschnecken zu steuern, da ein Vielfaches des typischen Mikroteilvolumens einen Bruchteil eines Millimeters Einspritzbewegung bedeutet. Eine reproduzierbare Steuerung des Spritzgießprozesses wird dadurch nahezu unmöglich.

Mehrere namhafte Spritzgießmaschinenhersteller haben auf die Besonderheiten, welche die Herstellung von Mini- und Mikrobauteile mit sich bringen, reagiert und spezielle Mikrospritzgießsysteme auf den Markt gebracht. Einer der Vorreiter auf diesem Gebiet ist die Fa. Wittmann Battenfeld GmbH & Co.KG, die bereits auf der Kunststoffmesse K 1998 ihr Mikrospritzgießsystem *Microsystem 50* (MS 50)

⁴ Unter der Verweilzeit versteht man die Zeit, die die Formmasse vom Einfülltrichter bis in die Kavität benötigt.

vorge stellt hat [75]. Diese vollelektrische Maschine wurde für polymere Präzisionsbauteile mit einem Gewicht kleiner 1 g konzipiert. Die in diesem Maschinenkonzept verbaute Spritzeinheit trennt im Gegensatz zu einer Standardeinspritzeinheit die Funktionen Plastifizieren, Dosieren und Einspritzen voneinander. Eine für Standardgranulat geeignete Extruderschnecke plastifiziert die Formmasse in den dafür vorgesehenen Bereich. Ein Dosierkolben schiebt die aufdosierte Formmasse vor den Einspritzkolben, der daraufhin das Material mit definierter Geschwindigkeit in die Kavität einspritzt. Durch diesen Aufbau wird für jeden Abformzyklus neues Material aufdosiert sowie eine reproduzierbare Regelung kleinster Materialmengen erzielt. Im Jahr 2010 hat die Firma Wittmann Battenfeld GmbH & Co. KG eine neue Generation des Mikrospritzgießsystems, die *MicroPower* [76], auf den Markt gebracht.

Weitere Spritzgießsysteme speziell für die Herstellung von Mini- und Mikrobau teilen sind die *micro-män 50* der Fa. Otto Männer GmbH [77] und das Mikrospritzmodul in Verbindung mit einer vollelektrischen Spritzgießmaschine der Fa. Arburg GmbH + Co KG [78]. Beide Systeme wurden auf der Kunststoffmesse K 2010 als Antwort auf die wachsende Nachfrage nach Maschinen speziell für die Herstellung von Kleinstbauteilen vorgestellt. Die *micro-män 50* arbeitet mit einer Schnecken vorplastifizierung und einer Kolbeneinspritzung. Darüber hinaus verfügt diese Maschine über das Transportsystem *träck-män*, das es erlaubt, mehrere Formhälften zu verwenden und somit Funktionen wie die Bauteilentnahme, das Aufheizen und das Abkühlen aus der Hauptarbeitsebene zu verschieben.

Das Mikrospritzmodul hingegen kombiniert eine Schnecken vorplastifizierung mit einer Einspritzschnecke mit geringerem Durchmesser, die eine Regelung kleinster Materialmengen über die Einspritzbewegung zulässt. Das Mikromodul der Fa. Arburg GmbH + Co KG wird als Zusatzoption für die elektrischen Spritzgießmaschinen des *Allrounder Typ A* der Fa. Arburg GmbH + Co KG angeboten. Diese Zusatzoption erlaubt die Handhabung von kleinsten Materialmengen auf diesen

Maschinen und befähigt diese damit für die Herstellung von Mini- und Mikrobauteilen.

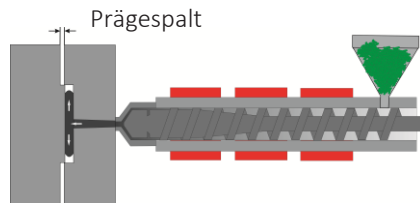
2.2.2 *Mikro-Spritzprägen*

Das Mikro-Spritzprägen vereint das Mikro-Spritzgießen mit allen seinen Besonderheiten mit einem Prägeschritt. Die dafür verwendeten Maschinen sind Mikrospritzgießsysteme mit hochauflösender Messtechnik zur Maschinenregelung und einer Steuerung, die den Prägeschritt vorsieht. Der Prägeschritt kann werkzeug- oder maschinentechnisch ausgeführt werden. Das maschineninduzierte Spritzprägen wird über die Werkzeugbewegung mittels Schließeinheit, den Einspritzdruck und den Nachdruck gesteuert. Beim werkzeuginduzierten Spritzprägen hingegen wird über elastische Deformation der Werkzeugkavität oder über einzelne bewegliche Werkzeugteile der Prägevorgang ausgeführt. In Abb. 2.7 ist das Spritzprägen mittels Tauchkantenwerkzeug abgebildet. Hier wird die Formmasse in ein bis auf den Prägespalt geschlossenes Werkzeug eingespritzt und danach mittels Werkzeugbewegung vollständig geschlossen.

Durch die Kombination eines Einspritzvorgangs mit einem anschließenden Prägevorgang ist es möglich, längere Fließwege und somit eine bessere Formfüllung zu erreichen. Weiterhin ermöglicht das Spritzprägen eine Reduktion der thermischen Schwindung und weit aus spannungsärmere Bauteile. Das Spritzprägen wird bevorzugt bei der Herstellung von optischen Bauteilen, Bauteilen mit dünnen Wandungen und Bauteilen, bei denen enge Formtoleranzen eingehalten werden müssen, eingesetzt. Speziell in der Mikrotechnik wird das Spritzprägen vorwiegend für mikrostrukturierte Bauteile verwendet. Dabei erfolgt die Formfüllung der einzelnen Mikrokavitäten näherungsweise ausschließlich über den Prägevorgang. Die eingespritzte Formmasse verteilt sich gleichmäßig in der Kavität und wird über den Prägehub homogen in die einzelnen Mikrokavitäten gedrückt. Dies bewirkt eine Verkürzung der Fließweglänge und dass der Füllvorgang

der einzelnen Mikrokavitäten positionsunabhängig nahezu gleiche Bedingungen aufweist. Ein eindrucksvolles Beispiel für die Anwendung des Spritzprägeverfahrens für mikrostrukturierte Bauteile ist die DVD- und Blueray-Herstellung [56], [79], [80].

Einspritzvorgang in das, bis auf den Prägespalt geschlossene, Werkzeug



Prägevorgang durch vollständiges Schließen des Werkzeuges

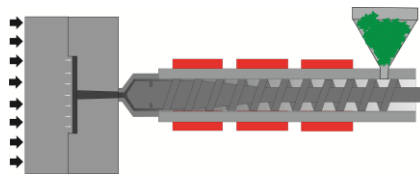


Abb. 2.7: Schematische Darstellung der charakteristischen Prozessschritte des Spritzprägezyklus unter Verwendung eines Tauchkantenwerkzeuges

3 LIGA-Verfahren zur Herstellung von endkonturnahen, polymeren Mikrobauteilen

Im Folgenden wird der Stand der Arbeiten zur Replikation von endkonturnahen vereinzelt LIGA-Mikrobauteilen beschrieben, eine neue Prozessfolge LIGA2.X zur Herstellung vereinzelter endkonturnaher Mikrobauteile über das Mikrospritzgießen vorgestellt und die dafür notwendigen einzelnen Prozessschritte analysiert.

3.1 Stand der Arbeiten zur Herstellung vereinzelter LIGA-Mikrobauteile

Mehrere Arbeitsgruppen beschäftigen sich mit der Replikation von LIGA-Formeinsätzen mittels Mikrospritzgießen. Die Formeinsätze wurden zum Beispiel für die Weiterentwicklung des Mikrospritzgießprozesses [81], [82] zur Herstellung von Konnektoren [83], [84] und Produkten wie dem Mikrospektrometer [85] verwendet. Die Fa. Horst Scholz GmbH und Rodinger Kunststoff-Technik GmbH haben das Mikrospritzgießen mittels LIGA-Formeinsätzen in ihrem Portfolio [86] [87]. In den genannten Arbeiten handelt es sich jedoch ausschließlich um polymere Bauteile mit einem charakteristischen Bauteilgewicht größer ein Gramm. Beispiele für Synchrotronstrahlungsquellen, an denen Arbeiten zur Herstellung von LIGA-Formeinsätzen durchgeführt wurden, sind: Bessy (Berlin) [88], SSLS (Singapur) [89], ALS (Berkeley) [90], CAMD (Baton Rouge) [91] und ANKA (Karlsruhe) [92].

Die einzigen Arbeiten zu vereinzelt LIGA-Mikrobauteilen wurden zwischen den Jahren 2000 und 2011 im Rahmen des Sonderforschungsbereich 499 *Mikrouformen* (SFB 499) [3] am KIT durchge-

führt. Jedoch haben diese gezeigt, dass die Anforderungen an den Prozess für die Herstellung von einzelnen endkonturnahen LIGA-Mikrobauteilen nicht erfüllt werden konnten.

Im Folgenden wird näher auf die Probleme im SFB 499 und den dort hergestellten LIGA-Formeinsätzen (siehe Abb. 3.1) eingegangen.

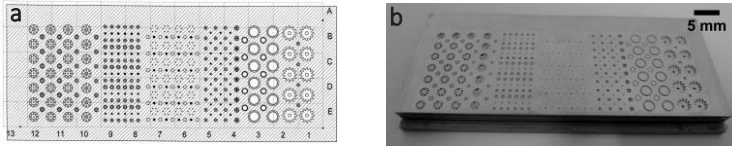


Abb. 3.1: **a** Drittes und letztes Formeinsatz-Layout im SFB 499 mit 593 Strukturelementen auf der strukturierbaren Fläche von 60 mm x 20 mm; **b** Verwendbarer LIGA-Formeinsatz im SFB 499

In der zwölfjährigen Laufzeit des SFB wurden insgesamt drei LIGA-Formeinsatz-Layouts erstellt (siehe Tabelle 3.1). Der Unterschied der einzelnen Layouts war die Anzahl der Strukturen auf der strukturierbaren Fläche (60 mm x 20 mm) und deren laterale Dimensionen.

Tabelle 3.1: Auflistung der im SFB 499 erstellten LIGA-Formeinsatz-Layouts

	Layout Version 1	Layout Version 2	Layout Version 3
Anzahl Kavitäten	195	398	593
Kleinste Abmessung (Sollmaß [µm])	20	10	5
Größte Abmessung (Sollmaß [µm])	4000	2418	2934

Ein im SFB 499 verfolgtes Ziel war die Herstellung von Demonstratoren, wie zum Beispiel ein Planetengetriebe mit Außendurchmesser 0,95 mm und einer dazugehörigen Turbine. Die Einzelteile wurden über das Pulverspritzgießen und einer nachfolgenden mechanischen Bearbeitung hergestellt und danach zu einer Baugruppe zusammengesetzt [3].

Tabelle 3.2: Beispiele der bei der Formeinsatzfertigung innerhalb des SFB 499 aufgetretenen Defekte [93]

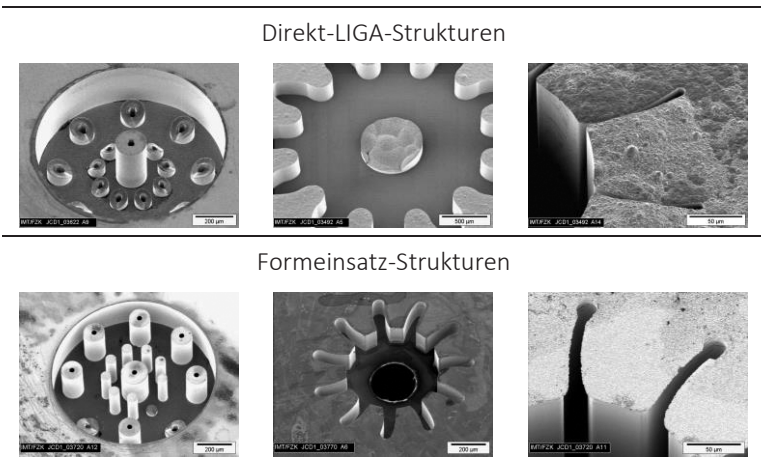


Abb. 3.1 zeigt einen SFB 499 LIGA-Formeinsatz, der später zur Herstellung von Demonstratorbauteilen verwendet wurde. Die Herstellung konnte nicht defektfrei erfolgen. Es trat eine Gratbildung an den einzelnen Kavitätsrändern auf, die sich als Hinterschnitt in der Replikation negativ ausgewirkt hat (siehe Tabelle 3.2). Die Lage der strukturierten Fläche bezüglich der Außenkonturen des Formeinsatzes war undefiniert (siehe Abb. 3.1). Darüber hinaus fehlten Teile von Strukturen gänzlich oder waren nicht in der geforderten Höhe vorhanden. Besonders schwerwiegend war dieses Problem bei kreisrunden Säulenstrukturen (siehe Tabelle 3.2).

Bei diesen Strukturelementen traten sehr hohe Ausfallraten auf, die auch bei Wiederholfertigungen oder durch das Einbringen von Hilfsstrukturen (hexagonale Strukturen im Inneren der kreisrunden Säulen) nicht verbessert werden konnten. Im Abschlussbericht zur SFB 499 Formeinsatzfertigung am KIT-IMT steht, dass sich die große Anzahl unterschiedlicher Strukturtypen (mit sehr unterschiedlichen Abmessungen) sowie die hohe Strukturdichte als nachteilig für die Fertigung der Formeinsätze herausgestellt hatte [93]. Es wird angenommen, dass bei einem Layoutfeld mit weniger und besser angeordneten Strukturen eine deutlich bessere Strukturqualität erreicht worden wäre. Die Fertigung der Formeinsätze unter Verwendung des in Abb. 3.1 gezeigten Layouts wurde aufgrund der oben genannten Defekte im SFB 499 eingestellt [93].

Die Abformung der im SFB 499 hergestellten Formeinsätze wurde auf einer elektrischen Spritzgießmaschine (*Elektra 50S* der Fa. Ferromatik Milacron GmbH) mit 500 kN maximaler Schließkraft durchgeführt. Die Formfüllung der 593 Strukturen auf dem Formeinsatz erfolgte mit Hilfe einer, mit einem Filmguss angespritzten, Trägerplatte, mit zuvor evakuierten Kavitäten und variothermer Prozessführung. Die Trägerplatte, die auf der Rückseite mit einer Gitterstruktur versehen war, sorgte dafür, dass die Mikrostrukturen im Verbund aus den Kavitäten gezogen werden konnten. Nach der Entformung der Mikrostrukturen wurde die Trägerplatte, auf der sich die Mikrobauteile befanden, über Auswerferstifte ausgeworfen. Danach wurden die einzelnen Strukturen über ein mechanisches Bearbeitungsverfahren aufwendig von der Trägerplatte getrennt. Dabei sind einige Probleme, bedingt durch das Formeinsatz-Layout und die Prozessführung, aufgetreten. Auf diese Probleme wird im Folgenden näher eingegangen:

- Als Hauptproblem wurde die aufwendige und kostenintensive Vereinzelung der Bauteile identifiziert. Um die Trägerplatte über mechanische Verfahren abarbeiten zu können und damit die gewünschten einzelnen Mikrobauteile zu fertigen, musste das mikrostrukturierte Bauteil aufgespannt wer-

den. Dies kann nicht über herkömmliche Spannvorrichtungen geschehen, da die Bauteile mit den Mikrostrukturen (den späteren Mikrobauteilen) in Richtung Spannvorrichtung aufgespannt werden mussten. Das Spannen der Bauteile wurde im Rahmen des SFB 499 mithilfe einer Gefrierspannvorrichtung [94] realisiert. Eine automatisierte Handhabung der einzelnen Bauteile bei der Entnahme aus der Gefrierspannvorrichtung sowie eine darauffolgende Qualitätskontrolle ist auch heute noch eine technische Herausforderung. Ein weiterer Punkt ist die Oberflächenqualität der Mikrobauteile auf der mechanisch bearbeitenden Fläche, da diese weit unter der über das LIGA Verfahren erzeugten Oberflächenqualität lag. Allgemein stellt die nachträgliche mechanische Bearbeitung von spritzgegossenen Bauteilen einen weiteren, zeitaufwendigen und kostenintensiven Prozessschritt dar. Im Hinblick auf einen wirtschaftlichen Einsatz in der Massenproduktion von Kunststoffmikrobauteilen ist dieses Verfahren zur Vereinzelung nicht anwendbar.

- Ein gleichermaßen schwerwiegendes Problem war die große Anzahl der Kavitäten auf einem Formeinsatz. Einzelne Kavitäten können bei Beschädigung nicht ausgetauscht werden. Dies bedeutet, dass bei einer kritischen Anzahl beschädigter, verschlissener oder schon im Formeinsatzherstellungsprozess defekter Kavitäten der ganze Formeinsatz ausgetauscht werden muss. Dies bedeutet einerseits, dass viele Kavitäten, mit denen eigentlich spezifikationsgerechte Bauteile hergestellt werden können, ausgetauscht werden müssen und dass andererseits viele Bauteile, die den Spezifikationen nicht entsprechen, repliziert werden und über ein geeignetes Qualitätsmanagement aussortiert werden müssen. Diese verfahrenstypischen Eigenschaften schlagen sich negativ in einer ökonomischen Betrachtung des Verfahrens nieder.

- Im Spritzgießprozess selbst führte die Formfüllung der Mikrokavitäten unter Verwendung einer rechteckigen, mit einem Filmanguss angespritzten Trägerplatte zu Problemen. Je nach Position der Mikrostrukturen auf der Trägerplatte (angussnah/angussfern) treten unterschiedliche Bedingungen hinsichtlich des Drucks, der Temperatur oder der Geschwindigkeit der eingespritzten Formmasse auf. Dies führt zu sehr unterschiedlichen Bedingungen im Hinblick auf die Formfüllung der Kavitäten (Abb. 3.2). Die Verwendung von Formeinsätzen mit unterschiedlich großen Strukturkavitäten, wie zum Beispiel im SFB 499, verstärkt die Varianz der Formfüllungsbedingungen. Deshalb war es im SFB 499 nicht möglich, die Spritzgießparameter für alle auf dem LIGA-Formeinsatz befindlichen Kavitäten zu optimieren und somit war es unmöglich, alle Kavitäten spezifikationsgerecht zu replizieren.

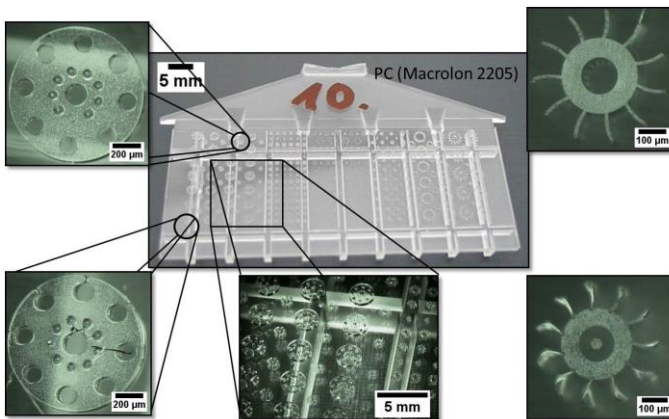


Abb. 3.2: Abbildung eines SFB 499 Abformteils aus Polycarbonat (PC) sowie Darstellung der Strukturqualität abhängig von der Position auf der Trägerplatte

In der Literatur ist die Anwendung des im SFB 499 entwickelten Verfahrens zur Herstellung von einzelnen Mikrobauteilen aus Keramik in [95] beschrieben. Darüber hinaus wurde in [96] und in [97] das Verfahren zur wissenschaftlichen Untersuchung für Bauteile aus Keramik und Kunststoff herangezogen. Die Arbeiten mit dem im Rahmen des SFB 499 entwickelten Prozess haben gezeigt, dass dieser die Anforderungen für eine kosteneffiziente Serienherstellung von polymeren Mikrobauteilen in den folgenden Punkten nicht erfüllt:

- Endkonturnahe Bauteile nach der Replikation
- Genau definierte Lage der Kavitäten auf dem Formeinsatz
- Spezifikationsgerechte Bauteile in engen Maßtoleranzen
- Defektfreie Bauteile
- Kurze Zykluszeit bei der Replikation

Diese hier vorgestellten Probleme, sowohl in der Formeinsatzfertigung als auch beim Mikrospritzgießen, führten letztlich zur Entwicklung des Verfahrens LIGA2.X.

3.2 LIGA2.X-Verfahren

Im LIGA2.X-Verfahren (siehe Abb. 3.3) wird zuerst das Design der zu fertigenden Bauteile und daraus resultierend ein Formeinsatz-Layout, auf dem die Bauteile intelligent angeordnet sind, im 3D-CAD erstellt. Dieses Layout, das in ein E-Beam-kompatibles 2D File umgewandelt wird, dient als Grundlage zur Herstellung der Röntgenmasken.

Unter Verwendung der Röntgen-Arbeitsmaske und dem auf ein Kupfersubstrat aufgeklebten Resist, erfolgt die Röntgentiefenlithographie an der Synchrotronstrahlungsquelle. In der darauffolgenden nasschemischen Entwicklung werden die bestrahlten Bereiche selektiv zu den unbestrahlten Bereichen mit einer geeigneten Entwicklerlösung entfernt. Danach wird in die freientwickelten Bereiche mittels Galvanoformung Metall zur Herstellung einer 4,5 mm dicken struktu-

rierten Nickelstrukturplatte (NISP) abgeschieden. Zur Erzeugung der späteren Formeinsatzgesamthöhe und der Trennung der NISP vom Substrat, werden das Drahterodieren und das nasschemische Ätzen eingesetzt. Die Außenkontur der Formeinsätze wird über mechanische Fertigungsverfahren erzeugt.

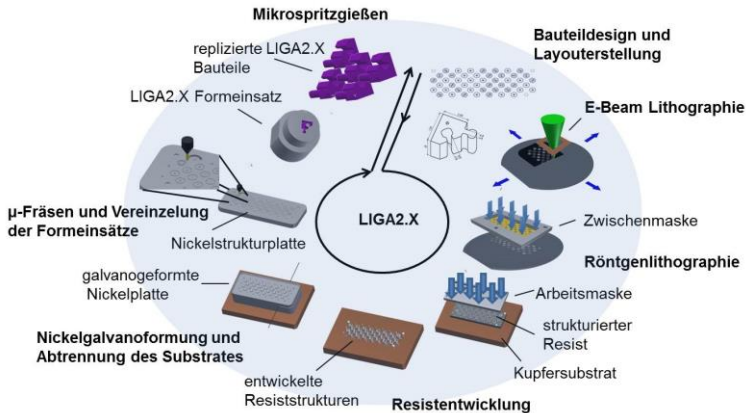


Abb. 3.3: Schematischer Ablauf des LIGA2.X-Prozesses

Die so hergestellten Formeinsätze können nach der Entfernung des in den Kavitäten befindlichen Polymers und einer Reinigung mit Lösungsmittel in das Mikrospritzgießwerkzeug eingebaut und zur Produktion von LIGA-Mikrobauteilen mittels Mikrospritzgießen verwendet werden [98].

Die für eine industrielle Anwendung des Verfahrens unabdingbaren Voraussetzungen werden in den folgenden Punkten vom LIGA2.X-Prozess erfüllt:

- Endkonturnahe Bauteile (ohne weitere Nachbearbeitungsschritte nach der Replikation)
- Hohe Reproduzierbarkeit
- Kurze Zykluszeiten (während der Replikation)
- Genau definierte Lage der Kavität auf dem Formeinsatz

- Spezifikationsgerechte Bauteile
- Automatisierbarkeit

Der in der Arbeit entwickelte und nachfolgend beschriebene LIGA2.X-Prozess wird in sechs Prozessschritte eingeteilt:

- Bauteil- und Formeinsatzdesign
- Layouterstellung Nickelstrukturplatte (NISP)
- Herstellung der Röntgenmasken
- Herstellung des Formeinsatzes
- Konstruktion und Realisierung des Mikrospritzgießwerkzeuges
- Mikrospritzgießen

In den Kapiteln 3.3 bis 3.8 folgt eine ausführliche Beschreibung des LIGA2.X-Prozesses. In den einzelnen Kapiteln wird detailliert auf die verwendeten Materialien, Maschinen und Parameter eingegangen.

3.3 Bauteil- und Formeinsatzdesign – LIGA2.X

Bei der Konstruktion von Bauteilen bzw. Strukturen, die über das LIGA-Verfahren hergestellt werden, sind prozessbedingt einige grundlegende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Alle Kanten müssen mit einem Radius von einem Mikrometer verrundet werden. Dies verhindert eine Rissbildung im Resist durch innere Spannungen [43], [85].
- Alle Bauteile müssen 2,5D sein. Wahre 3D Strukturen können derzeit mit den an den Beamlines *LIGA 1* und *LIGA 2* [99] befindlichen Belichtungssystemen⁵ nicht erzeugt werden, da die

⁵ *JenOptik Dex02* (Rotationsmöglichkeit 360°; Neigungsoption 60°) und *JenOptik DexKfK* (Neigungsoption $\pm 60^\circ$) hergestellt von der Firma Jenoptik GmbH. Die hochpräzisen Scanner bewegen den Verbund von Maske und Substrat mit bis zu 50 mm/s vertikal während der Belichtung durch den Strahl [99].

zur Steuerung der Systeme verwendete Software die Bewegung der Maske/Resist-Kombination während der Bestrahlung ausschließlich vertikal zum Strahl erlaubt. Belichtungssysteme für die Herstellung von 3D Strukturen benötigen eine weitaus höhere Zahl an Freiheitsgraden während der Belichtung (in [100] wurde ein Belichtungssystem mit acht Freiheitsgraden zur Herstellung von 3D Strukturen entwickelt).

- Das maximal erreichbare Aspektverhältnis von LIGA2.X-Bauteilen ist durch das Mikrospritzgießen eingeschränkt. Es können LIGA-Strukturen hergestellt werden, die weitaus höhere Aspektverhältnisse aufweisen als im Mikrospritzgießprozess entformbar sind, wie zum Beispiel Gitterstrukturen mit Aspektverhältnis 100 [101]. Im LIGA2.X-Verfahren konnte derzeit ein Aspektverhältnis von 10 an spritzgegossenen Bauteilen gezeigt werden.
- Die maximale Strukturhöhe, die im LIGA2.X-Prozess gezeigt werden sollte, war ein Millimeter. Strukturhöhen von mehreren Millimetern sind derzeit unter der Verwendung der *LIGA 3* Beamline erreichbar [99].
- Strukturdetails bis in den einstelligen Mikrometerbereich sind im LIGA2.X- sowie LIGA-Verfahren gleichermaßen möglich [99].
- Kreisrunde Strukturen, wie zum Beispiel Nabenbohrungen von Zahnrädern, führen zu Problemen bei der Nickelgalvanoformung und können nur mit erheblichen Ausfallraten erzeugt werden. Wenn möglich, sollte auf diese Art von Strukturen im Bauteildesign verzichtet werden (siehe Kapitel 5.5).

Bei der Erstellung des 3D-CAD Modells der einzelnen Bauteile darf für die Extrusion der vollständigen Umrisskontur nur **eine** 2D Skizze verwendet werden (Abb. 3.4a). In dieser Skizze ist es wichtig, die

gesamte Außenkontur geschlossen⁶ zu konstruieren. Nach der Extrusion in der gewünschten Höhe, können alle alleinstehenden Strukturelemente innerhalb der Umrisskontur erstellt und von der Extrusion der Außenkontur abgezogen werden (Abb. 3.4c). Für jedes Strukturelement muss eine weitere 2D Skizze erstellt werden, in der diese geschlossen und mit der Angabe der Position relativ zur Außenkontur konstruiert wird (Abb. 3.4b). Es dürfen keinesfalls für eine Kontur mehrere Skizzen übereinander oder nebeneinander erstellt werden. Bei Missachtung dieser Konstruktionsregeln ist es später nicht möglich, das Modell in eine E-Beam-kompatible Datei umzuwandeln.

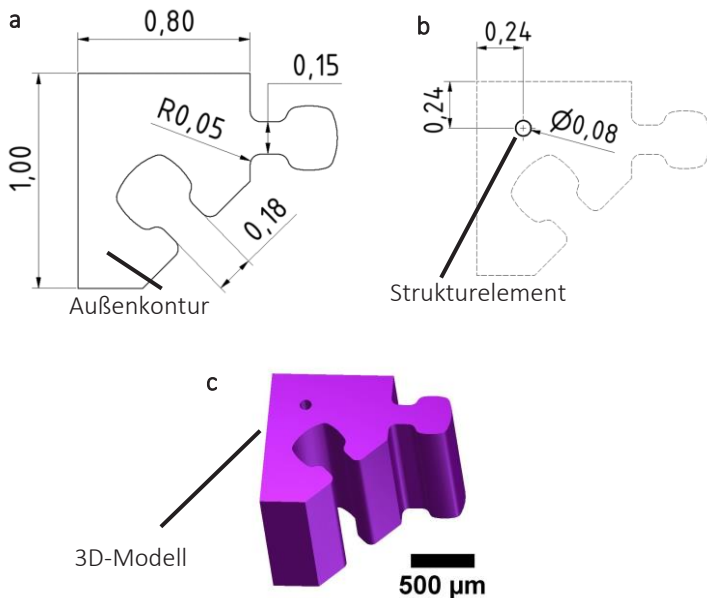


Abb. 3.4: **a** 2D Skizze der Außenkontur einer Puzzle-Struktur; **b** 2D Skizze eines zylindrischen Strukturelements innerhalb der Außenkontur; **c** Fertiges Bauteil im 3D-CAD

⁶ Unter einer geschlossenen Kontur wird ein Strichpfad verstanden, der die gewünschte Geometrie mit allen Details darstellt und keine Unterbrechungen aufweist.

Auf jeder Struktur muss die spätere Einspritzposition bei der Replikation mit der Erstellung eines Arbeitspunktes festgelegt werden (Abb. 3.5b). Bei der Definition der Position muss darauf geachtet werden, dass die Formfüllung homogen verläuft, Bindenähte günstig positioniert werden und die Formmasse gleichzeitig an den verschiedenen fließenden ankommt. Bei der Betrachtung und Festlegung des Einspritzpunktes sind kommerzielle Spritzgießsimulationsprogramme eine große Hilfe. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Software *SIGMASOFT*[®] der Fa. SIGMA Engineering GmbH verwendet (Abb. 3.5a).

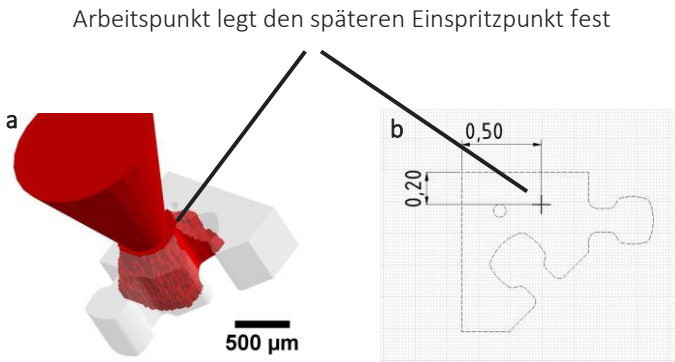


Abb. 3.5: **a** Füllstudie mit dem Spritzgießsimulationsprogramm *Sigmasoft*[®] zur Optimierung der Einspritzpunktlage auf dem Bauteil; **b** Festlegung des späteren Einspritzpunktes in der 2D Skizze des Bauteils

Auf Grundlage des 3D Modells der Struktur wird virtuell im 3D-CAD der Formeinsatz erzeugt (siehe Abb. 3.6). Die Größe der beiden Stufendurchmesser der LIGA2.X-Formeinsätze hängt direkt von der Strukturgröße der zu erzeugenden Bauteile ab. Die Formeinsätze haben eine Gesamthöhe von 4 mm mit zwei Stufen. Die erste Stufe hat eine Höhe von 2,5 mm und ist an einer Seite abgeflacht. Diese Fläche dient später als Verdrehsicherung im Spritzgusswerkzeug. Der zweite Durchmesser hat eine Stufenhöhe von 1,5 mm und beinhaltet

auf der Stirnseite die Kavität. Die Mantelfläche dieses Durchmessers dient als Führungsfläche und Zentrierung beim Einbau in das Spritzgießwerkzeug. Ein metrisches Gewinde M1,6 mm mit einer Tiefe von 2,5 mm in der Rückseite der LIGA2.X-Formeinsätze, dient der leichteren Handhabung der Formeinsätze beim Ein- und Ausbau in die Formeinsatzhalteplatte.

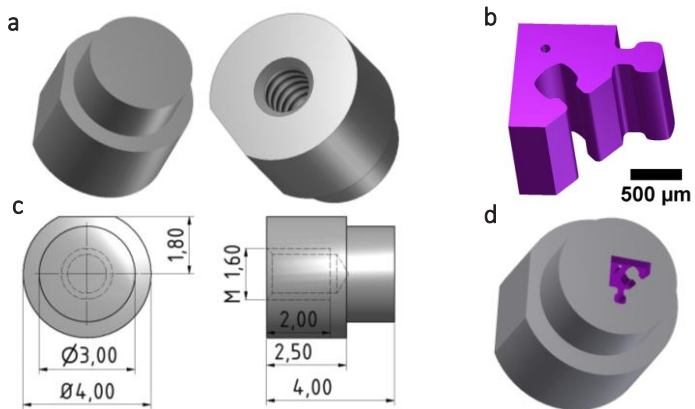


Abb. 3.6: **a** Formeinsatz-Dummy, dient als Grundlage zur Erstellung der virtuellen LIGA2.X-Formeinsätze; **b** 3D Modell des zu erzeugenden Bauteils; **c** Bemaßung des Formeinsatzdummys für Bauteile mit maximalen lateralen Dimensionen kleiner 2,5 mm; **d** Kombination aus a und c zum fertigen, virtuellen Formeinsatz

Das Erstellen der einzelnen Formeinsätze im 3D-CAD führt zu einer hohen Transparenz, hilft Fehler bei der Konstruktion zu vermeiden und lässt eine Kontrolle der Lage der Kavität relativ zu den Außenabmaßen des Formeinsatzes vor der eigentlichen Fertigung zu.

3.4 Layouterstellung Nickelstrukturplatte (NISP) – LIGA2.X

Das LIGA2.X-Layout für die Fertigung der Nickelstrukturplatte (NISP) mit einer strukturierbaren Fläche von 60 mm x 20 mm beinhaltet abhängig von der Größe unterschiedlich viele Kavitäten. Jeder LIGA2.X-Formeinsatz enthält später nur eine Kavität. Bei Kavitäten mit einem maximalen Außendurchmesser von 2,5 mm können 48 LIGA2.X-Formeinsätze im Batch gefertigt werden.

Das Layout beinhaltet unabhängig von der Kavitätsgröße bzw. -anzahl immer drei kreisrunde Referenzstrukturen mit einer festen lateralen Dimension (Durchmesser 2 mm). Über diese Referenzstrukturen kann im späteren Prozess die Lage der einzelnen Kavitäten bestimmt werden, ohne hierzu zusätzlichen Messaufwand betreiben zu müssen. Die Erstellung des Layouts erfolgt im 3D-CAD mit Hilfe eines Positionsgitters. Dieses Gitter gibt die Plätze vor, auf denen die einzelnen Bauteile (3D Modell Kapitel 3.3) positioniert werden und ist so konstruiert, dass der verfügbare Platz auf der strukturierbaren Fläche optimal ausgenutzt wird. Dabei muss genügend Abstand zwischen den Strukturen vorhanden sein, um diese später über μ -Fräsen ohne Beschädigung bearbeiten zu können.

Das Positionsgitter wird auf das im CAD zuvor erstellte Modell des Kupfersubstrats angeordnet, so dass der Mittelpunkt des Substrates mit dem des Gitters in x- und y-Richtung übereinstimmt. In z-Richtung wird das Gitter mit Hilfe einer Arbeitsebene in dem Abstand angeordnet, welcher der gewünschten späteren Bauteilhöhe beziehungsweise Formeinsatzkavitätstiefe entspricht. Nach Anordnung der drei Referenzstrukturen auf dem Gitter können nun die 3D Modelle der zu erzeugenden Bauteile platziert werden. Die Lage der Plätze, die das Gitter auf dem Layout vorgibt, wird später zum Mittelpunkt der jeweiligen Formeinsätze. Die in Kapitel 3.3 definierten Arbeitspunkte der Bauteile, welche die spätere Einspritzposition der Formmasse in die Kavitäten festlegen, werden mit den Plätzen auf dem Positionsgit-

ter in Deckung gebracht. Das bedeutet, dass die Mittelpunkte der LIGA2.X-Formeinsätze mit den zuvor definierten Einspritzpositionen der einzelnen Kavitäten übereinstimmen. Bei der Anordnung der Strukturen muss darauf geachtet werden, dass eine homogene Verteilung der zu galvanisierenden Fläche über die strukturierbare Fläche entsteht. Dies ist von äußerster Wichtigkeit in Bezug auf eine homogene Feldlinienverteilung bei der Galvanoformung. Hierzu wurde ein Programm entworfen, das die Anordnung der Kavitäten in Bezug auf ihre Fläche auf den Quadranten der NISP im Betrag anzunähern erlaubt.

Nachdem alle Bauteile auf dem Substrat auf deren vorbestimmten Plätzen positioniert wurden, erfolgt die Anordnung der Hilfsstrukturen. Diese sind Kreisringe mit einem Innendurchmesser 0,5 mm größer als die strukturierbare Fläche der LIGA2.X-Formeinsätze, einer Ringbreite von 1 mm und einer Höhe äquivalent der zu erzeugenden Strukturhöhe (siehe Abb. 3.7). Um jede auf dem Layout angeordnete Struktur wird eine Hilfsstruktur angeordnet. Die Hilfsstrukturen trennen die einzelnen Strukturen bei der Herstellung voneinander ab. Das heißt, eventuelle Defekte wie zum Beispiel eine Rissbildung im Resist bei der Röntgentiefenlithographie [43], [85] können auf eine Kavität begrenzt werden, da die Hilfsstruktur die Rissausbildung stoppt. Darüber hinaus wird eine homogene Galvanikfläche über die gesamte strukturierbare Fläche erzeugt. Die Hilfsstrukturen sind verlorene Strukturen. Sie werden in der späteren mechanischen Bearbeitung der LIGA2.X-Formeinsätze entfernt und haben keinerlei Einfluss auf die Replikation.

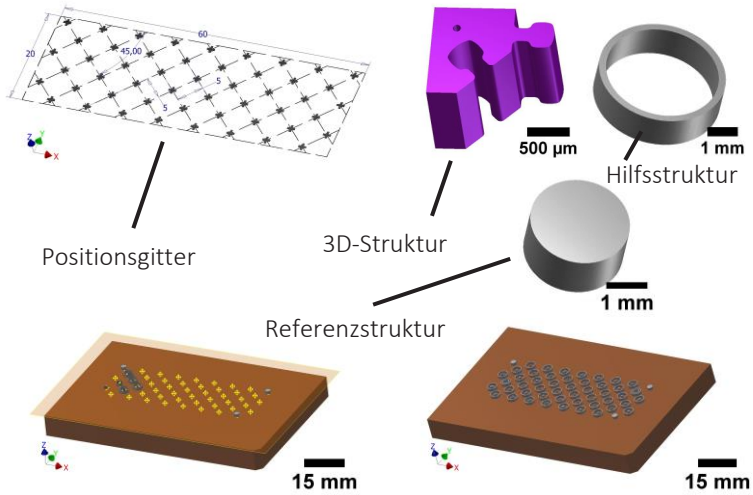


Abb. 3.7: Skizze zum Vorgehen bei der virtuellen Anordnung der Bauteile, Hilfsstrukturen und Referenzstrukturen auf dem Substrat mit Hilfe eines Positionsgitters

Im nächsten Schritt wird die NISP mit allen Stufen und Details virtuell im 3D-CAD erstellt (siehe Abb. 3.8). Die Positionen der einzelnen Kavitäten sowie die Anordnung zueinander können nochmals geprüft und gegebenenfalls Korrekturmaßnahmen getroffen werden.

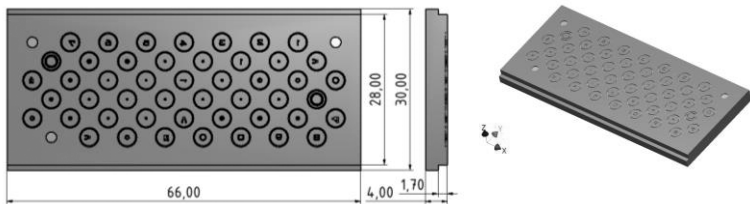


Abb. 3.8: 3D-CAD-Modell der virtuell erstellten NISP vor der Formeinsatzherstellung

Bei der beschriebenen Vorgehensweise zur Layouterstellung ist es möglich, die einzelnen Schritte bei der NISP Fertigung virtuell zu simulieren. Dies führt zu einer hohen Transparenz in der LIGA-Fertigung und der Möglichkeit, die einzelnen Stadien der Fertigung schon in der Layoutphase darzustellen.

Das so erzeugte 3D Layout wird nun in ein 2D Format (.dxf Format) umgewandelt (siehe Abb. 3.9). Anschließend wird das 2D-CAD-Format in ein für den Elektronenstrahlschreiber kompatibles Dateiformat, das alle benötigten Informationen wie die Schreibstrategie enthält, umgewandelt.

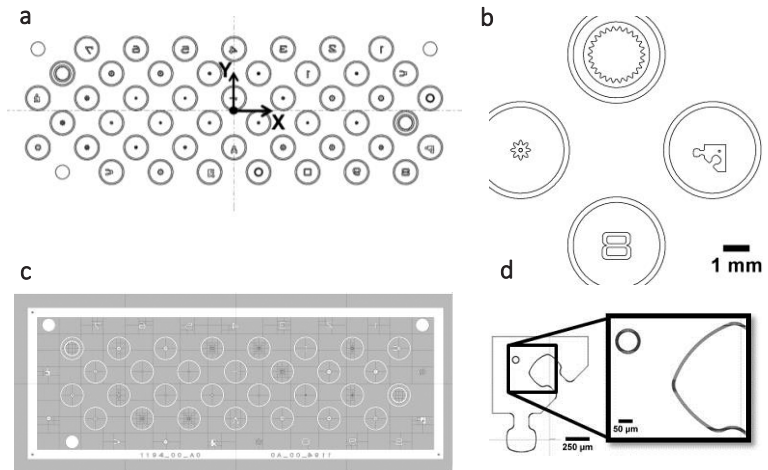


Abb. 3.9: **a** 2D-CAD-Layout im .dxf-Format als Grundlage für die Umwandlung in ein E-Beam-kompatibles-Format; **b** Detailansicht in der .dxf-Datei; **c** 2D Layout umgewandelt in ein .gds-Format (hier werden die im .dxf-Format definierten Strukturen in Flächen umgewandelt), **d** Detailansicht einer Struktur im E-Beam-Format in denen Flächenbereiche in verschiedenen Bereichen mit unterschiedlicher Schreibstrategie (Grob- bzw. Feinlayer) eingeteilt werden

3.5 Maskenherstellung

An die im LIGA-Verfahren verwendeten Röntgenmasken werden folgende Anforderungen gestellt:

- Hoher Transmissionsgrad der Maskenmembran im betreffenden Wellenlängenbereich der verwendeten Röntgenstrahlung
- Ausreichende Formstabilität und Festigkeit des Membranmaterials bei der Handhabung und Nutzung der Röntgenmasken
- Beständigkeit der verwendeten Materialien gegen Röntgenstrahlung.
- Hoher Absorptionsgrad der Absorberstrukturen im betreffenden Wellenlängenbereich der verwendeten Röntgenstrahlung
- Hohe Qualität der Absorberstrukturen als Voraussetzung für eine verlustarme Übertragung der Strukturen

Die am KIT-IMT hergestellten und verwendeten Röntgenmasken sind 1:1 Schattenmasken [102]. Da es für Strukturhöhen $> 10 \mu\text{m}$, abgesehen von der Röntgenlithographie, derzeit keine Verfahren zur Strukturierung von Submikrometerstrukturen gibt, muss im LIGA-Prozess auf zwei Masken mit unterschiedlich hohen Absorberstrukturen zurückgegriffen werden [36]. Zuerst wird eine sogenannte Zwischenmaske mit einer Absorberhöhe von $2,3 \mu\text{m}$ hergestellt, mit der Resisthöhen kleiner $60 \mu\text{m}$ strukturiert werden können [102]. Mit Hilfe der Zwischenmaske kann dann eine Arbeitsmaske mit Absorberhöhe von $25 \mu\text{m}$ hergestellt werden, welche für Strukturierungen von Resisthöhen bis zu $3.000 \mu\text{m}$ geeignet sind [102]. Im Folgenden wird auf die genaue Herstellung der in dieser Arbeit verwendeten Maskentypen eingegangen.

3.5.1 Zwischenmaske (ZM)

Die Zwischenmaske wird mit Hilfe der Elektronenstrahlolithographie erzeugt (siehe Abb. 3.10c). Der verwendete Elektronenstrahlschreiber ist der *Vistec VB6* der Fa. Vistec Electron Beam GmbH mit einer Beschleunigungsspannung von 100 KV und einer gewählten Auflösung von 1 nm (Mainfieldgröße 1 mm x 1 mm). Als Resist wird ein auf PMMA-basierender Positivresist (AR-P 672.11, 950K, 11%) der Fa. Allresist GmbH verwendet. Der Resist wird auf einen 4"-Si-Wafer mit C/Ti/Cr/Au-Schicht (Schichtdicken: C = 50 nm, Ti = 2,7 μm , Cr = 5 nm, Au = 15 nm) mit einer Dicke zwischen 3,0 μm und 3,2 μm aufgeschleudert. Die Aushärtung des Resists erfolgt auf einer Hotplate bei 180 °C über fünf Minuten. Die Entwicklung des strukturierten Resists erfolgt über einen nasschemischen Sprühentwicklungsprozess (*Spin WET-OPTIwet ST 30* der Fa. ATMvisionAG) mit Isopropanol und Methylisobutylketon (MIBK) in einem Verhältnis 1:1 als Entwicklerlösung. In die freientwickelten Bereiche werden auf den Startgrund die Goldabsorberstrukturen galvanisch abgeschieden. Die Goldgalvanik (KIT-IMT-eigener Natriumgoldsulfit-Elektrolyt, T = 55 °C, pH = 8, $i = 0.2 \text{ A/dm}^2$) erfolgt bis auf eine Höhe von 2,3 μm . Das verbleibende Resistmaterial wird über ein Sauerstoff-Plasma entfernt. Hierzu wird die Probe in den *4-TEC* Plasmaätzer (Parameter: 30 sccm O₂ Gasfluss, 100 Watt Sendeleistung, Dauer 2 h) eingebaut. Nach Erzeugung der Absorberstrukturen auf dem Siliziumwafer (siehe Abb. 3.10a) müssen diese nun zusammen mit der Titanschicht, welche später die Trägermembran ausbildet, getrennt werden. Dies erfolgt mit Hilfe eines Invarrahmens, der mit Zweikomponenten-Epoxydklebstoff auf das Substrat aufgeklebt wird (siehe Abb. 3.10b) und so die Absorberstrukturen einrahmt. Nach Aushärtung des Klebstoffes (12 h) wird mit einem Skalpell die Außenkontur des Rahmens nachgeschnitten. Dabei wird die C/Ti/Cr/Au-Schicht aufgetrennt. Nun wird der Rahmen mit der aufgespannten Titanmembran und den Goldabsorberstrukturen (siehe Abb. 3.10d) vom Siliziumwafer an der Kohlenstofftrennschicht abgehoben.

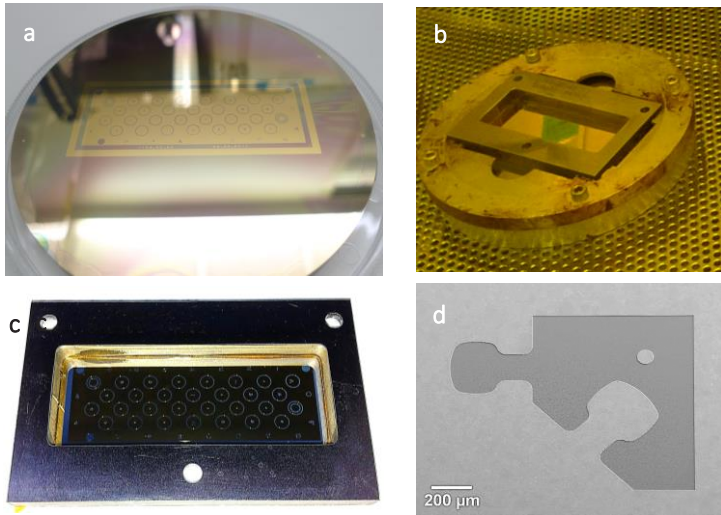


Abb. 3.10: **a** Siliziumwafer mit Goldabsorberstrukturen; **b** Zwischenmaske während des Aushärtens des Klebstoffes zum Aufkleben des Maskenrahmens, **c** Fertige Zwischenmaske, **d** REM-Aufnahme einer Struktur auf der Maskenmembran

3.5.2 Arbeitsmaske

Bei der Arbeitsmaskenherstellung werden zwei unterschiedlichen Arten von Arbeitsmasken unterschieden:

- Abhebewafer mit innenliegenden Absorberstrukturen (siehe Abb. 3.11)
- Invarsubstrat mit außenliegenden Absorberstrukturen (siehe Abb. 3.12)

Im Folgenden wird auf die Fertigung der beiden unterschiedlichen Typen eingegangen:

Arbeitsmaske auf Abhebewafer (AM Si)

Die Herstellung startet mit einem 4“-Siliziumwafer mit einer C/Ti/TiO_x-Beschichtung (Schichtdicken: C = 50 nm, Ti = 2,7 µm) und einem in drei Schritten aufgeschleuderten PMMA-Positivresist (MicroChem 950k PMMA A11). Die resultierende Gesamtdicke des Resists beträgt ca. 50 µm. Zwischen den einzelnen Belackungsschritten wird der Resist auf einer Heizplatte bei 95 °C für 3 h ausgebacken. Nach erfolgreicher Vorbereitung erfolgt die Röntgenlithographie an der Synchrotronstrahlungsquelle (ANKA) [103]. ANKA arbeitet mit Elektronen, die bei einer Energie von 2,5 GeV im Ring gespeichert und nahezu auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden [104]. Die bei ANKA verwendete Beamline *LIGA 1* für die Arbeitsmaskenfertigung (installiert in einem Reinraum) verfügt über einen Energiebereich von 2,2 keV bis 3,3 keV und einem *JenOptik Dex02* Röntgenscanner [105]. Die Belichtung des Resists erfolgt unter 100 mbar Heliumatmosphäre. Der Proximityabstand⁷ beträgt zwischen der Zwischenmaske und dem PMMA-Resist 100 µm. Nach erfolgreicher Belichtung erfolgt die Entwicklung unter Verwendung von GG-Entwickler (60 Vol.-% Diethylenglykolmonobutylether, 20 Vol.-% Morpholin, 5 Vol.-% Ethanolamin und 15 Vol.-% H₂O), gefolgt von 20 min in der Spüllösung BDG (80 Vol.-% Diethylenglykolmonobutylether und 20 Vol.-% H₂O) und 10 min Spülen mit DI-Wasser. In die freientwickelten Bereiche wird nun analog zur Zwischenmaskenherstellung (Kapitel 3.5.1) der galvanische Aufbau der Goldabsorber bis zur Höhe von 25 µm (siehe Abb. 3.11b) durchgeführt. Das Strippen des verbliebenen Resistmaterials wird mittels Anisol durchgeführt. Die abschließenden Prozessschritte zur Fertigstellung der Arbeitsmaske sind äquivalent zur Zwischenmaskenfertigung: Aufkleben des Invarträgerrahmens und Abheben der fertigen Arbeitsmaske (siehe Abb. 3.11a).

⁷ Der Proximity-Abstand wird zwischen Maske und Resist eingestellt und sorgt dafür, dass sich diese nicht berühren. Der Abstand verhindert eine Beschädigung durch gegenseitige Berührung der Maske und des Resists [36].

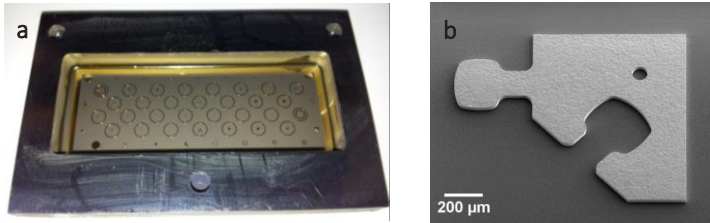


Abb. 3.11: **a** Arbeitsmaske, hergestellt, mit 4"-Siliziumwafer als Substrat (AM Si);
b REM-Aufnahme einer Goldabsorberstruktur auf der Maskenmembran

Arbeitsmaske auf Invarsubstrat (AM IN)

Bei der Herstellung von Arbeitsmasken mit Invarsubstrat (Materialdicke 6 mm) dient das Invar nicht nur als späterer Rahmen, der die Titanmembran aufspannt, sondern auch als Ausgangssubstrat, auf das der Resist aufgebracht wird. Auf das Invarsubstrat, welches mit einer Ti/TiO_x-Schicht (Schichtdicke Ti = 2,3 μm) versehen ist, wird eine 55 μm dicke Resistschicht aufgegossen. Bei dem Resist handelt es sich um einen Positivresist mit der Zusammensetzung 10 g Plexidon, 0.15 g Benzoylperoxid (BPO), 0.10 g Methacryloxypropyltrimethoxysilan (MEMO) und 0.10 g Dimethylanilin (DMA). Zur Vorbereitung des Resists auf die folgende Röntgenlithographie (äquivalent zu AM Si) wird der Resist einem Temperschnitt (1. Aufheizrate: 15 °C/h, Dauer: 6 h, 2. Haltetemperatur: 110 °C, Dauer: 1 h; 3. Abkühlrate 8 °C/h, Dauer 10 h) unterzogen. Nach der Entwicklung des Resists, der Goldgalvanik (äquivalent zu AM Si) und der Entfernung des verbliebenen Resists wird ein nasschemischer Ätzschritt durchgeführt (siehe Abb. 3.12c), um die Titanmembran mit den darauf befindlichen Goldabsorberstrukturen (siehe Abb. 3.12b) freizulegen (siehe Abb. 3.12d). Das Ätzen der Rechtecktasche in das Invarsubstrat unter der Titanmembran erfolgt mit 65 Vol.-% Salpetersäure (HNO₃). Nach dem Ätzen der Rechtecktasche ist die Arbeitsmaske einsatzbereit (siehe Abb. 3.12a).

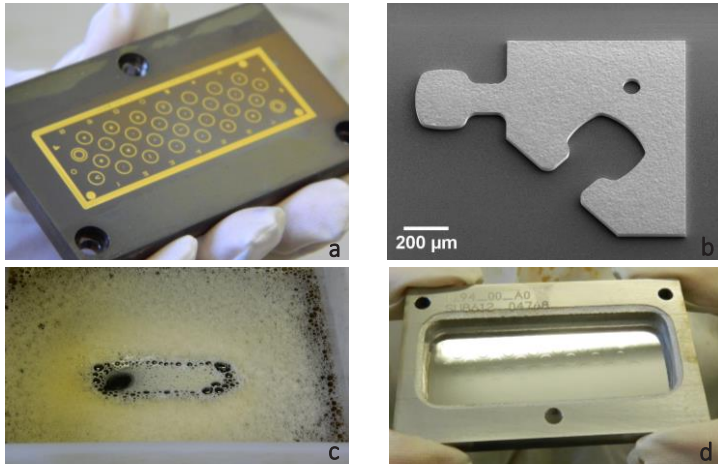


Abb. 3.12: **a** Arbeitsmaske hergestellt mit Invarsubstrat (AM IN); **b** REM-Aufnahme einer Goldabsorberstruktur auf der Maskenmembran, **c** Nasschemisches Ätzen des Invar zur Freilegung der Maskenmembran, **d** Fertig geätzte Arbeitsmaske mit freiliegender Maskenmembran

3.6 Formeinsatzherstellung

Formeinsätze, die für die Replikation von hochpräzisen Mikrobauteilen verwendet werden, stellen nachfolgende Anforderungen an die Formeinsatzqualität beziehungsweise den Herstellungsprozess:

- Hohe Lebensdauer sowie Verschleißbeständigkeit gegen ungefüllte thermoplastische Formmassen
- Maßhaltigkeit in engen Toleranzen
- Hohe Oberflächengüte der Kavitätsflächen ohne Hinterschnitte
- Entformungsschrägen, alternativ nahezu senkrechte Seitenwände
- Präzise Position der Kavität auf dem Formeinsatz
- Leichte Handhabung

- Minimale Kantenverrundung
- Hoher Freiheitsgrad in der Formgebung der Kavität

Die am KIT-IMT aus galvanisch abgeschiedenem Nickel hergestellten LIGA-Formeinsätze, erfüllen die in der Mikrosystemtechnik an Strukturen gestellten hohen Ansprüchen in vielen Punkten. Die Fähigkeit des Verfahrens, kleinste Strukturdetails mit großen Aspektverhältnissen und gleichzeitig hoher Oberflächengüte zu realisieren, ist ein Alleinstellungsmerkmal, das derzeit von keinem anderen Verfahren annähernd erreicht wird. Im Folgenden wird im Detail auf die einzelnen Fertigungsschritte in der Herstellung von LIGA2.X-Formeinsätzen eingegangen.

3.6.1 Resiststrukturierung

Als Substrat zur Herstellung der Nickelstrukturplatte wird eine 8 mm dicke Kupferplatte verwendet. Die Vorbehandlung der Kupferplatte schließt das Diamantfräsen der Oberfläche sowie eine Goldbeschichtung der Unterseite und Seitenflächen ein. Die Goldbeschichtung dient dazu, inerte Flächen für die weitere Prozessabfolge zu erhalten. Die nicht beschichtete Oberseite des Substrates wird mit einer Ti/TiO_x-Schicht (Schichtdicke Ti = 3 µm) versehen, bevor der Resist aufgebracht wird. Als Resist werden PMMA-Halbzeuge (Plättchen, GS 233 der Fa. Röhm) mit einer Dicke von bis zu 2.000 µm verwendet, die maschinell mit einem Kleberoboter (siehe Abb. 3.13a) auf das Substrat geklebt werden (Klebstoff: 10 g Plexidon, 0,15 g BPO, 0,30 g MEMO, 0,10 g DMA). Nach Aushärtung des Klebstoffes unter Druck und einem anschließenden Tempersschritt (Starttemperatur 25°C, aufheizen in 6 h auf 60 °C, danach in 10 h auf 70 °C, halten 32 h und abkühlen in 10 h auf 36 °C), kann die Röntgentiefenlithographie an der Synchrotronstrahlungsquelle (ANKA) [55] starten. Die Bestrahlung erfolgt an der Beamline *LIGA 2*, die sich in einem Reinraum befindet und einen Energiebereich von 2,5 bis 12,4 keV abdeckt [106]. *LIGA 2* verfügt

über ein *JenOptik DexKFK* Röntgenscanner. Die Bestrahlung erfolgt unter Heliumatmosphäre bei einem Druck von 100 mbar. In Abb. 3.13b ist die Halterung des *JenOptik DexKFK* Röntgenscanners mit eingebauter Arbeitsmaske und Substrat dargestellt. Bei der darauffolgenden Entwicklung wird, äquivalent zur Arbeitsmaskenherstellung (Kapitel 3.5.2), eine GG-Entwicklerlösung, gefolgt von 20 min in BDG und 10 min spülen unter DI-Wasser, verwendet. Die Dauer, welche die Probe in der GG-Entwicklerlösung verbleibt, hängt von der Resisthöhe ab und kann von einigen Stunden bis zu mehreren Tagen betragen. So ist zum Beispiel für 400 μm Resisthöhe eine Entwicklungszeit in GG von 16 bis 24 h erforderlich.

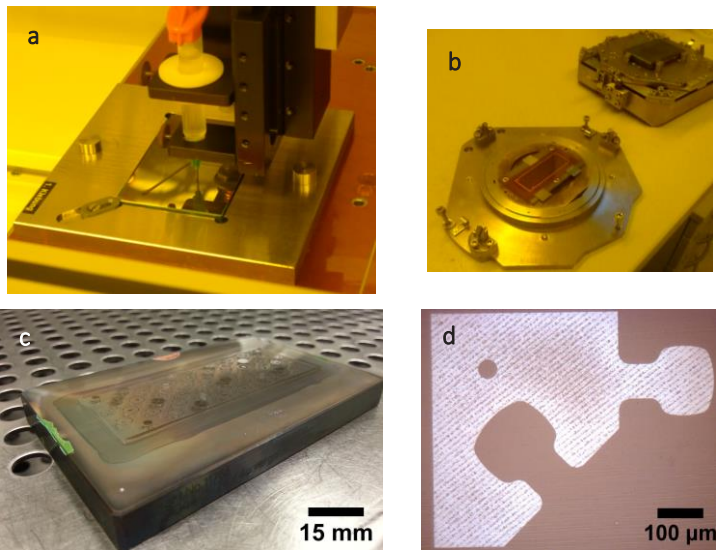


Abb. 3.13: **a** Kleberoboter für das reproduzierbare Aufkleben der PMMA-Resistplättchen auf das Kupfer-Substrat; **b** Halterungen des *JenOptik DexKFK* Röntgenscanners mit eingebauter Arbeitsmaske und Substrat; **c** Entwickelte Resiststrukturen; **d** Puzzlestruktur nach der Freientwicklung

3.6.2 Nickelstrukturplatte (NISP) – LIGA2.X

In die freientwickelten Resistbereiche erfolgt nun das Abscheiden von Nickel mit Hilfe der Galvanoformung. Als Elektrolyt wird ein borsäurehaltiger Nickelsulfamatelektrolyt ($T = 52\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{pH } 3,4 \dots 3,7$, $i = 1,0 \dots 1,8\text{ A/dm}^2$, 78 g/l Nickel , 40 g/l Borsäure) verwendet. Für die später 4 mm hohen Formeinsätze ist eine Höhe der NISP von $4,5\text{ mm}$ notwendig, welche eine 5 mm galvanisch abgeschiedene Nickelschicht voraussetzt. Dies erfordert einen Zeitraum von zweieinhalb Wochen. Nach der Galvanoformung wird über Drahterodieren die Außenkontur der NISP erzeugt ($4,5\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 66\text{ mm}$), zwei Spannstufen eingebracht und das Kupfersubstrat bis auf eine $500\text{ }\mu\text{m} \pm 50\text{ }\mu\text{m}$ dicke Restschicht entfernt. Die verbliebene Kupferrestschicht wird mit Hilfe einer Kupferätzlösung ($122\text{ g/l Ammoniumcarbaminat}$, $30\text{ g/l Natriumchlorid}$, 100 ml/l Ammoniak und Wasser) nasschemisch entfernt. Um die mit Resist gefüllten Strukturen auf der NISP freizulegen, wird die Ti/TiO_x -Schicht mithilfe von 5 Vol.-% HF -Lösung entfernt (siehe Abb. 3.14a). Als letzter Schritt in der NISP-Herstellung (siehe Abb. 3.14b) folgt das Strippen des Resists unter Verwendung von Ethylacetat ($T = 78\text{ }^{\circ}\text{C}$, mit zusätzlicher Ultraschallunterstützung, $\text{Zeit} = 24\text{ h}$).

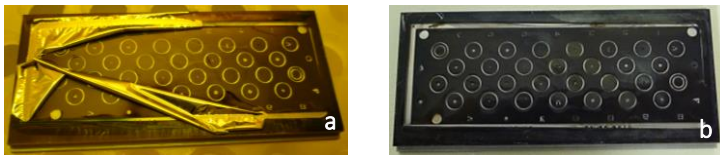


Abb. 3.14: **a** NISP bei der Entfernung der Ti/TiO_x Galvanikstartschicht über nasschemisches Ätzen; **b** NISP nach der Entfernung des Resists

3.6.3 *Formeinsatzherstellung – LIGA2.X* (*mechanische Bearbeitung*)

Nach der Reinigung der Kavitäten auf der NISP werden diese einzeln (bis auf die drei kreisrunden Referenzstrukturen (siehe Abb. 3.15a) mit Vergussmasse (Zusammensetzung: 10 g Plexidon, 0,15 g BPO, 0,10 g DMA) gefüllt. Nach dem Aushärten der Vergussmasse, wird diese über Flycutting (*Leica Ultrafräse*, Spindeldrehzahl 3.000 U/min, Vorschub 2 bis 5 mm/min, Zustellung 20 μm) zu einer parallel zur Rückseite der NISP einheitlichen Höhe von 150 $\mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$ abgearbeitet. Die Ebenheit der Vergusschicht ist für die Vereinzelung der Formeinsätze von hoher Bedeutung, da Unebenheiten bei der Fräsbearbeitung zu Ausschuss führen können. Das Vergießen der Strukturen erfolgt zum Schutz vor eventuellen Beschädigungen beziehungsweise Verschmutzungen in den nachfolgenden mechanischen Bearbeitungsschritten.

Für die Vereinzelung der LIGA2.X-Formeinsätze aus der NISP sind zwei aufeinanderfolgende mechanische Fertigungsschritte erforderlich. Das Vorgehen wurde zusammen mit der Fa. Bergmaier GmbH erarbeitet. Zuerst wird die NISP über μ -Fräsen bearbeitet und danach über Drahtschneiden in die einzelnen Formeinsätze zerteilt.

Die Fräsbearbeitung startet mit der Erfassung der Lage der Strukturen auf der NISP. Hierfür wurde eine präzise Antasthilfe mit drei exakt in die Referenzstruktur passenden Pins und zwei kreisrunden Antaststrukturen hergestellt (siehe Abb. 3.15b). Die NISP wird mit Hilfe der Referenzstrukturen und der Pins exakt auf der Antasthilfe, die im Maschinenschraubstock gespannt ist, positioniert und mit Parallelschraubzwingen fixiert. Nun können mit einem 3D-Taster die Strukturen der Antasthilfe angefahren und ein x-y-Nullpunkt erfasst werden, von dem aus die Lage des Mittelpunkts der Strukturen und somit der späteren Formeinsätze bekannt ist. Die z-Koordinate wird ebenfalls über den 3D-Taster ermittelt, indem mehrere Punkte auf der Rückseite der NISP in der z-Achse aufgenommen werden (siehe Abb. 3.15c). Hierbei wird die Lage der NISP über die Verfahrensbewegungen der

Maschinenachsen der 5-Achs-Fräsmaschine genau ausgerichtet. Nach Erfassung der Strukturpositionen wird eine Rechtecktasche in die Rückseite der NISP gefräst. Über die Tiefe der Tasche und die zuvor ermittelte Materialdicke der NISP wird die Gesamthöhe der späteren Formeinsätze von 4 mm $\pm 10 \mu\text{m}$ erzeugt. Das μ -Fräsen wurde mit einer 5-Achs-Fräsmaschine des Typs C42 der Fa. Maschinenfabrik Berthold Hermle AG durchgeführt. Für das Einbringen der Rechtecktasche wird ein dreischneidiger Vollhartmetall-Schaftfräser (Durchmesser 3 mm mit Drehzahl 2.000 min^{-1} und einem Vorschub von 100 mm/min) verwendet. In diese Rechtecktasche, welche die Unterseite der späteren Formeinsätze darstellt, werden jeweils in die Mitte der späteren LIGA2.X-Formeinsätze Kernlöcher mit Durchmesser von 1,2 mm gebohrt und danach ein M1,6 Gewinde gefräst (siehe Abb. 3.15d). Diese Gewinde in der Rückseite der LIGA2.X-Formeinsätze ermöglichen eine einfachere Handhabung beim Ein- und Ausbau in die Formeinsatzhalteplatte sowie bei der Charakterisierung. Mit der Fertigstellung der Gewinde ist die Bearbeitung der Rückseite der NISP abgeschlossen.

Für die folgende Bearbeitung der Vorderseite (beinhaltet die geschützten LIGA-Kavitäten) wird eine speziell gefertigte Spannvorrichtung (siehe Abb. 3.15e) in den Maschinenschraubstock gespannt. Diese Vorrichtung ermöglicht das Spannen der NISP über die zuvor mittels Drahterodieren eingebrachten Spannstufen. Nun wird ein weiteres Mal die Antasthilfe auf die Referenzstrukturen aufgesetzt und über die Antaststrukturen mit Hilfe des 3D Tasters der xy-Nullpunkt bestimmt (siehe Abb. 3.15f). Nach der Erfassung der z-Koordinate wird die erste Stufe mit einem Durchmesser 3 mm und einer Tiefe von 1,5 mm erzeugt. Hierfür wird ein dreischneidiger Vollhartmetall-Schaftfräser (Durchmesser 1,5 mm mit einer Drehzahl von 6.000 min^{-1} und einem Vorschub von 100 mm/min) verwendet (siehe Abb. 3.15g). Die z-Koordinate wird für jede einzelne Struktur neu angetastet, um die durch die Galvanoformung entstandene Unebenheit der NISP auszugleichen. Nachdem die einzelnen Stufen

erzeugt wurden, werden zwischen den Kavitäten Startlöcher mit einem Durchmesser von 2 mm für das Erodieren eingebracht (siehe Abb. 3.15h). Diese Startlöcher ermöglichen es im Folgeprozess, dem Drahterodieren, immer eine neue Referenz aufzunehmen und dadurch Korrekturen vorzunehmen. Dies ist notwendig, da sich die NISP bei der Entfernung der einzelnen LIGA2.X-Formeinsätze durch freiwerdende innere Spannungen verformt.

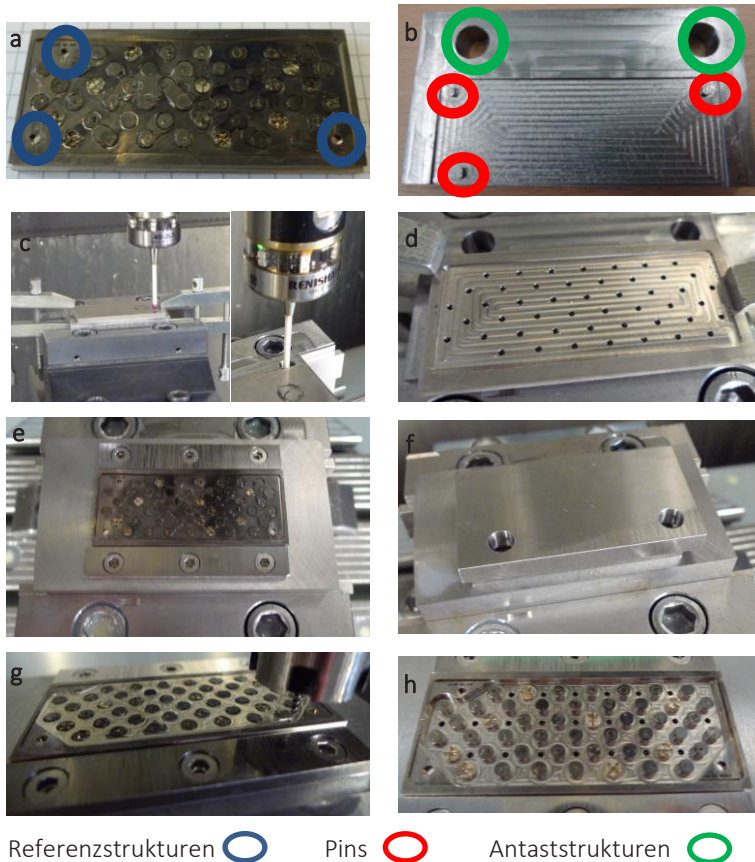


Abb. 3.15: Darstellung des für die Vereinzelung von LIGA2.X-Formeinsätzen entwickelten Prozesses: **a** NISP mit geschützten Strukturen; **b** Antasthilfe; **c** Erfassen der Position der Strukturen in x-, y- und z-Richtung; **d** Hinterseite der aufgespannten Nickelstrukturplatte mit eingebrachten M1,6 Gewinden; **e** Umgespannte NISP (Vorderseite) in eine speziell gefertigte Spannvorrichtung; **f** Eingespannte Nickelstrukturplatte mit aufgesetzter Antasthilfe zur Erfassung der Position der Strukturen in x- und y- Richtung; **g** Fräsen der ersten Stufe; **h** Fertig gefräste NISP mit den Stufen \varnothing 3 mm / 1,5 mm tief sowie der Startlöcher für den anschließenden Erodierprozess

Beim Drahterodieren wird die NISP eingespannt und die Lage der ersten Stufe über die zuvor erzeugten Startlöcher aufgenommen, so dass die zweite Stufe koaxial dazu erzeugt wird. Die zweite Stufe der Formeinsätze hat eine abgeflachte Seite, die beim Einbau in das Spritzgusswerkzeug als Verdrehungssicherung dient. Das Erodieren erfolgte auf einer *Agie-cut 100* der Fa. Agie Charmilles GmbH. Der verwendete Draht hatte einen Durchmesser von $250\ \mu\text{m}$ (siehe Abb. 3.16a). Nach der Vereinzelung zweier Formeinsätze wurden diese auf einer 3D Portal Messmaschine der Fa. Johansson GmbH unter Verwendung eines Messtasters der Fa. Renishaw GmbH vermessen und dadurch das Korrekturmaß für die Vereinzelung der nächsten Formeinsätze bestimmt (siehe Abb. 3.16b). Dieses Vorgehen wurde wiederholt, bis alle Formeinsätze einzeln vorlagen.

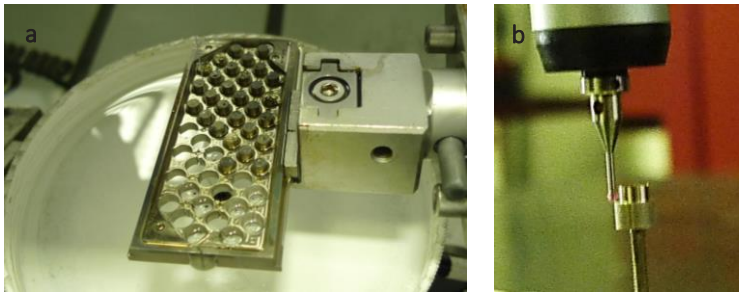


Abb. 3.16: **a** Vereinzelung der NISP über Drahterodieren; **b** Vermessen der erodierten Formeinsätze zur Bestimmung eines Korrekturfaktors für die weitere Vereinzelung

Nach der mechanischen Bearbeitung wurde im letzten Schritt das auf den einzelnen Formeinsätzen befindliche Vergussmaterial entfernt (Ethylacetat, $78\ ^\circ\text{C}$ (siehe Abb. 3.17)). Danach standen die Formeinsätze für die Replikation zur Verfügung.

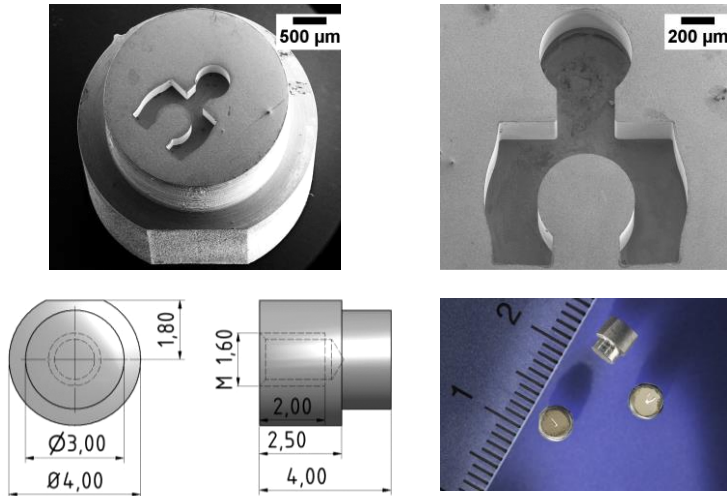


Abb. 3.17: Darstellung der LIGA2.X-Formeinsätze

3.7 Mikrospritzgießwerkzeuge – LIGA2.X

Das folgende Kapitel behandelt die Werkzeugtechnik beim Mikrospritzgießen, die für die Replikation von LIGA2.X-Formeinsätzen benötigt wird. Im Detail wird auf den Aufbau, das Prinzip und die Realisierung für zwei unterschiedliche Maschinenkonzepte angefertigten Werkzeuge eingegangen.

Anforderungen an die LIGA2.X-Werkzeugtechnik für das Mikrospritzgießen sind:

- Entformungskonzept speziell für die sichere Entformung von einzelnen Mikrobauteilen
- Verschleißbeständigkeit für hohe Stückzahlen
- Heiz- und Kühlkonzepte für kurze Zykluszeiten
- Hohe Präzision der einzelnen Werkzeugbestandteile
- Möglichkeit der Evakuierung der Kavitäten und des Angussbereiches

Bei der Entwicklung der Werkzeugkonzepte für die unterschiedlichen Spritzgießmaschinen konnte auf die Erfahrung in der Werkzeugtechnik für die Replikation von Mikrostrukturbauteilen sowie der von Kleinstbauteilen (Kapitel 2.2.1) zurückgegriffen werden. Die Herausforderung in der Werkzeugtechnik, speziell für die Abformung unter der Verwendung von LIGA2.X-Formeinsätzen, ist die sichere, zuverlässige und reproduzierbare Entformung der einzeln angespritzten Kavitäten.

3.7.1 *Werkzeug Microsystem 50 – LIGA2.X*

Um Kosten und Zeit zu sparen, wurde im ersten Schritt ein für die Microsystem 50 (MS 50) Maschinen vorhandenes Dreiplatten-Mikrospritzgießwerkzeug an die Anforderungen des LIGA2.X-Verfahrens angepasst. Nach der Auswahl eines zum Umbau geeigneten Mikrospritzgießwerkzeuges, das die Möglichkeit der Evakuierung der Kavitäten und die variotherme Prozessführung einschließt, wurden verschiedene Konzepte zur Anzahl und Positionierung der LIGA2.X-Formeinsätze sowie zur Entformung unter Berücksichtigung des schon vorgegebenen Werkzeuges und des Kostenrahmens erarbeitet.

Das in dieser Arbeit entwickelte Werkzeugkonzept (siehe Abb. 3.18) mit einem neuen Ansatz für die Bauteilentformung sieht vor, vier LIGA2.X-Formeinsätze gleichzeitig und individuell über ein Angussystem anzuspritzen. Nach dem Schließen des Werkzeuges und dem Einspritzen der Formmasse werden über das Angussystem (das sich innerhalb der mittleren Platte und der Düsenseite befindet) die Kavitäten (befindlich in der Auswerferseite des Werkzeuges) der LIGA2.X-Formeinsätze vollständig ausgeformt. Nach Abschluss des Einspritzvorganges und der Kühlzeit wird das Werkzeug langsam geöffnet und das replizierte Bauteil am Anguss aus dem LIGA2.X-Formeinsatz gezogen. Bei vollständiger Werkzeugöffnung wird über Pneumatikzylinder die mittlere Platte relativ zur Düsenseite verfahren, die Bauteile vom Anguss getrennt und aus dem Werkzeug entnom-

men. Im letzten Schritt fährt der Einspritzkolben, der zuvor die Formmasse eingespritzt und den Nachdruck aufgebracht hat, nach vorne und stößt den Anguss aus der Düsenseite aus. Das Werkzeug ist nun bereit für den nächsten Zyklus.

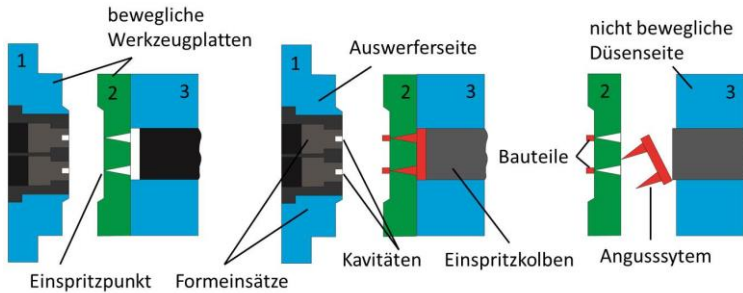


Abb. 3.18: Schematische Skizze des LIGA2.X-Werkzeugkonzept für die MS 50

Die Umsetzung des Werkzeugkonzeptes ist in Abb. 3.19 gezeigt. Der Werkzeugumbau erfolgte in Zusammenarbeit mit der Fa. Bergmaier GmbH und wurde für eine erste Machbarkeitsstudie auf die Auswerferseite beschränkt. Um vier LIGA2.X-Formeinsätze in das Werkzeug einbauen zu können, wurde eine neue Halteplatte sowie Unterlegbleche in verschiedenen Dicken (Federblech) für den passgenauen Einbau der Formeinsätze in die Trennebene des Werkzeuges gefertigt. Kleinere vorhandene Werkzeugdefizite wie eine raue Oberfläche der mittleren Werkzeugplatte, ein festgelegter nicht variierbarer Durchmesser der Einspritzpunkte bzw. Aschnittdurchmesser ($300 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$) und eine nicht ideale Geometrie des Angussverteilers wurden aus Zeit- und Kostengründen akzeptiert.

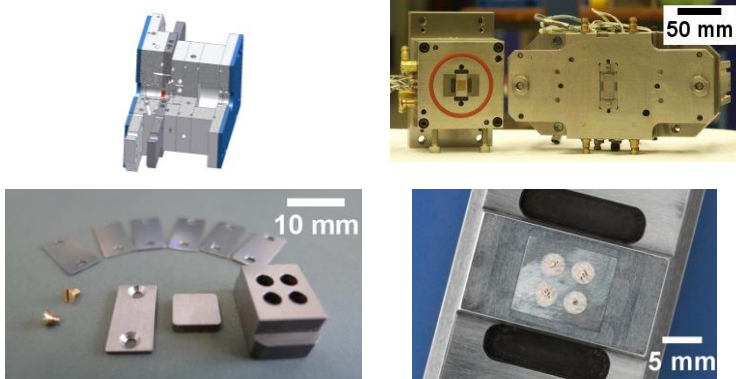


Abb. 3.19: Darstellung des Werkzeugkonzeptes für die MS 50

3.7.2 Werkzeug *micro-män 50* – LIGA2.X

Parallel zum Umbau des Mikrospritzgießwerkzeuges für die MS 50 wurde zusammen mit der Fa. Otto Männer GmbH ein weiterer Werkzeugumbau geplant und umgesetzt. Dieser Umbau eines bei der Fa. Otto Männer GmbH vorhandenen Werkzeuges hat zum Ziel LIGA2.X-Formeinsätze auf dem seit 2010 gebauten Mikrospritzgießsystem, *micro-män 50*, in einer ersten Machbarkeitsstudie zu replizieren.

Das Werkzeugkonzept (siehe Abb. 3.20) sieht vor, die eingespritzte Formmasse von der nicht beweglichen Düsenseite durch die bewegliche mittlere Platte in der beweglichen Auswerferseite zu verteilen. Dazu wird die Formmasse über einen Angussverteiler, ebenfalls in der mittleren Platte, in die LIGA2.X-Formeinsätze, welche in die Düsenseite eingebaut sind, eingespritzt. Das Entformungskonzept beruht auf dem gleichen Prinzip wie bei der MS 50. Das Formteil wird, noch am Anguss befindlich, langsam aus der Kavität gezogen. Nach vollständiger Werkzeugöffnung und Positionierung der Werkzeughälfte wird durch eine Relativbewegung der mittleren Platte zur Auswerferseite das Bauteil vom Anguss getrennt. Die Bauteile werden nach der Trennung aus dem Werkzeug entnommen [77].

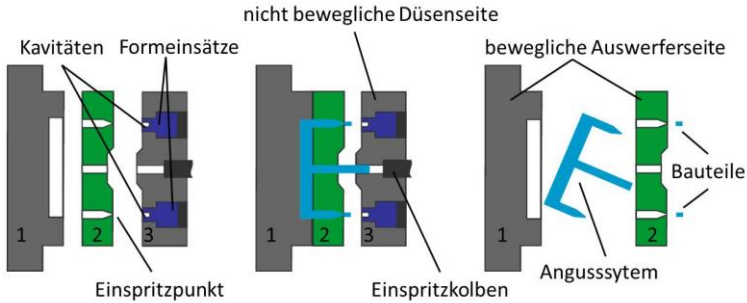


Abb. 3.20: Schematische Skizze des LIGA2.X-Werkzeugkonzeptes für die *micro-män 50*

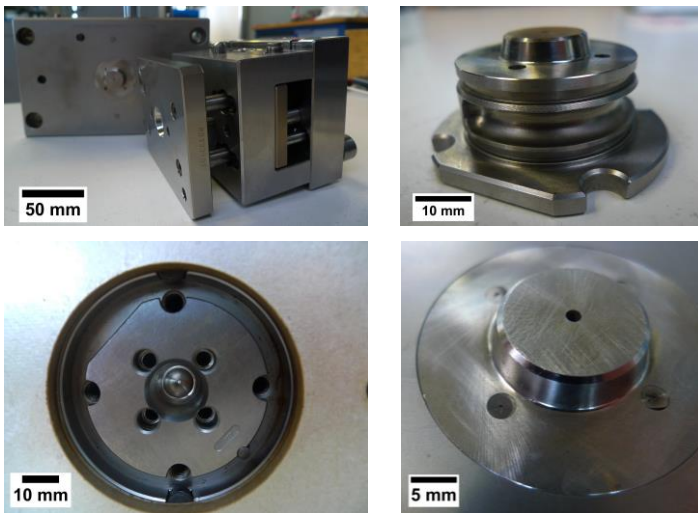


Abb. 3.21: Darstellung des Werkzeugkonzeptes für die *micro-män 50*

Die Umsetzung des Werkzeugkonzeptes erfolgte direkt bei der Fa. Otto Männer GmbH (siehe Abb. 3.21). Das Werkzeug wurde für die Aufnahme von vier LIGA2.X-Formeinsätzen ausgelegt. Die Anschnittöffnung wurde mit einem Durchmesser von 250 µm gefertigt. Eine Automatisierung der Angusstrennung, der Auswurf des Angus

sowie die Entnahme der Bauteile wurden in dieser Machbarkeitsstudie nicht vorgesehen, da diese Schritte keine technischen Neuerungen erforderten und später bei erfolgreichen Abformergebnissen leicht nachgerüstet werden können.

3.8 Mikrospritzgießprozess – LIGA2.X

Nur speziell für die Replikation von Mikrobauteilen entwickelte Maschinen können den hohen Anforderungen, vor allem bei den geforderten kurzen Verweilzeiten der Formmasse, bei kleinen Schussvolumen und der reproduzierbaren Regelung der Prozessparameter, in kleinsten Abstufungen gerecht werden. Beispiele für solche Maschinen sind die *Microsystem 50* sowie deren Nachfolger *MicroPower 50* der Fa. Wittmann Battenfeld GmbH + Co KG, die *micro-män 50* der Fa. Otto Männer GmbH und das Mikrospritzmodul der Fa. Arburg GmbH + Co KG. Nachfolgendes Kapitel behandelt die in der vorliegenden Arbeit für die Abformung von LIGA2.X-Formeinsätzen verwendeten, unterschiedlichen Mikrospritzgießsysteme. Darüber hinaus werden die für die Abformungen verwendeten Prozessparameter beschrieben.

Die Anforderungen bei der Replikation von Mikrobauteilen an die verwendeten Maschinen sind wie folgt:

- Homogene und reproduzierbare Materialaufbereitung bei kleinsten Mengen an Formmasse
- Kurze Verweilzeiten der Formmasse im Einspritzaggregat
- Möglichkeit der langsamen Werkzeugöffnungsbewegung
- Präzise und reproduzierbare Steuerung der Werkzeugposition
- Pneumatische Kernzugsteuerung
- Zuverlässige und reproduzierbare Regelung der einstellbaren Prozessparameter bei kleinsten Eingabeänderungen
- Verwendbarkeit von Standardgranulat

Die größte Herausforderung bei der Abformung von LIGA2.X-Mikrobauteilen liegt in der Festlegung des Prozessfensters. Schon relativ geringe Abweichungen der optimalen Parameter können entweder zu unvollständiger Formfüllung führen oder dazu, dass die Bauteile nicht über das Herausziehen am Anguss entformt werden können. Darüber hinaus ist der passgenaue Einbau der Formeinsätze in die jeweiligen Halteplatten des Werkzeugs essentiell. Schon kleinste Abweichungen führen zu Überspritzungen oder lassen keine Formfüllung zu. Als kritische Parameter wurden identifiziert:

- Lage des Einspritzpunktes zur Kontur des Bauteils
- Verwendete Formmasse
- Geschwindigkeit der Werkzeugöffnungsbewegung
- Größe der Anschnittbohrung
- Schwankungen des eingespritzten Formmassenvolumens und damit zusammenhängende unterschiedliche Druckverhältnisse in der Kavität
- Entlüftung der Kavität, der passgenaue Einbau der Formeinsätze
- Werkzeugtemperatur

Bei den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Abformversuchen mit LIGA2.X-Formeinsätzen auf unterschiedlichen Mikrospritzgießsystemen wurde festgestellt, dass der Prozess zur Massenproduktion von Mikrobauteilen geeignet ist. In Kapitel 5.2 wird auf die Prozessparameteroptimierung bei der LIGA2.X-Bauteilherstellung über das Mikrospritzgießen näher eingegangen.

3.8.1 *Microsystem 50 (MS 50)*

Die für die Abformungen der LIGA2.X-Formeinsätze am KIT-IAM-WPT verwendeten vollelektrischen Mikrospritzgießsysteme waren zum einen eine MS 50 (Baujahr 2000) mit fünf Tonnen maximaler Schließ-

kraft und zum anderen eine 2K-MS 50 (Baujahr 2010) mit acht Tonnen maximaler Schließkraft (siehe Abb. 3.22). Beide Maschinen wurden von der Fa. Wittmann Battenfeld GmbH & Co.KG hergestellt. Eine homogene Materialaufbereitung wird über eine Extruderschnecke (Durchmesser 14 mm) gewährleistet. Das Einspritzen der Formmasse in die Kavität wird von einem Kolben (Durchmesser 4,9 mm) übernommen. Für die Replikation wurden verschiedene Typen des teilkristallinen Thermoplasten Polyoxymethylen (POM) verwendet. In Tabelle 3.3 sind die Grundparameter der Abformungen auf der 2K-Maschine unter Verwendung des in Kapitel 3.7.1 beschriebenen Werkzeuges aufgelistet. Die unterschiedlichen Geometrien der abgeformten LIGA2.X-Bauteile weichen im benötigten Schussvolumen ($353 \text{ mm}^3 \pm 2 \text{ mm}^3$ bei vier in das Werkzeug eingebauten Formeinsätzen) nur gering voneinander ab und benötigen daher bei einem Kavitätswechsel nur marginale Optimierungen der Grundparameter für einen reproduzierbaren und stabilen Abformprozess.

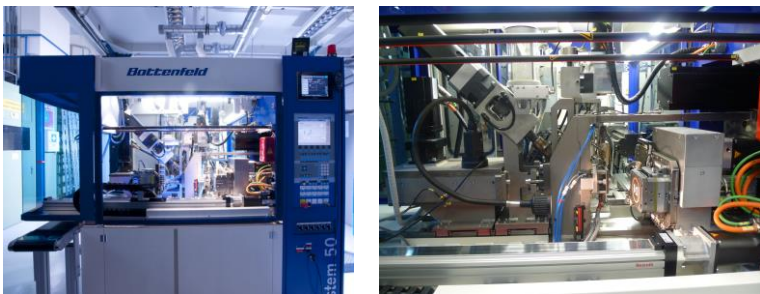


Abb. 3.22: MS 50 2K-Mikrospritzgießsystem mit aufgebautem Werkzeug für die LIGA2.X-Abformungen

Die für die Replikation an den MS 50-Maschinen verwendeten LIGA2.X-Formeinsätze mit Strukturen der Layouts LIGA2.0 und LIGA2.1 sind im Anhang A.4 gezeigt. Das derzeit erreichte maximale Aspektverhältnis bei Abformungen von Bauteilen mit einer Kavitätstiefe von $400 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ beträgt 5. In Abb. 3.23 sind Beispiele von LIGA2.X-Bauteilen, hergestellt mit der MS 50, gezeigt.

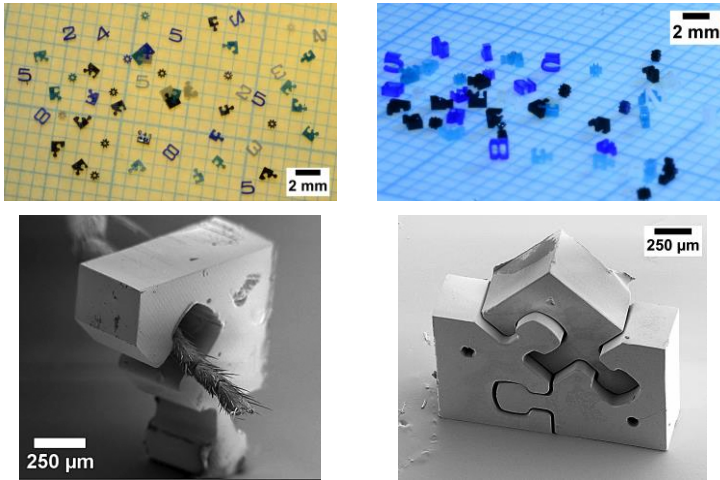


Abb. 3.23: Beispiele für die auf den MS 50, hergestellten LIGA2.X-Abformteile

Entlüftung der Kavität

In den ersten Abformversuchen von LIGA2.X-Formeinsätzen wurde, unter Verwendung einer Vakuumpumpe zur Evakuierung der Kavitäten und des Angussystems (< 1 mbar), nahezu keine Formfüllung erzielt. Es war nicht möglich, das Werkzeug so zu evakuieren, dass keine Luft von der Formmasse in die Kavität geschoben wurde. Das Problem wurde über eine gezielte Nutzung von Oberflächenrauheiten und den während des Spritzgießprozesses auftretenden Kräften gelöst (siehe Abb. 3.24). Durch die Kombination verschiedener Unterlegplättchen beim Einbau der LIGA2.X-Formeinsätze (siehe Abb. 3.24) kann der Anpressdruck der Werkzeugplatten eingestellt werden. Die auftretenden Kräfte (resultierend aus der Schließkraft der Maschine) können nicht alle Freiräume (bedingt durch die Oberflächenrauheiten) zwischen Werkzeugplatte und Formeinsätze schließen. Die Kraft, die auf den Formeinsatz wirkt (resultierend aus dem Einspritz-/Nachdruck während der Abformung), hilft hierbei, indem sie den Formeinsatz, soweit es die Unterlegplättchen zulassen, aus der Trennebene zurück-

drückt. Dadurch entsteht ein genügend großer Spalt, der durch die elastische Verformung der Werkzeugplatten beim Aufbringen der Schließkraft nicht vollständig geschlossen werden kann, jedoch so klein ist, dass keine Formmasse während der Nachdruckphase in den Spalt gedrückt wird. In diesen Spalt kann die in die Kavität gedrückte Luft entweichen, so dass eine vollständige Formfüllung erreicht wird (siehe Abb. 3.24).

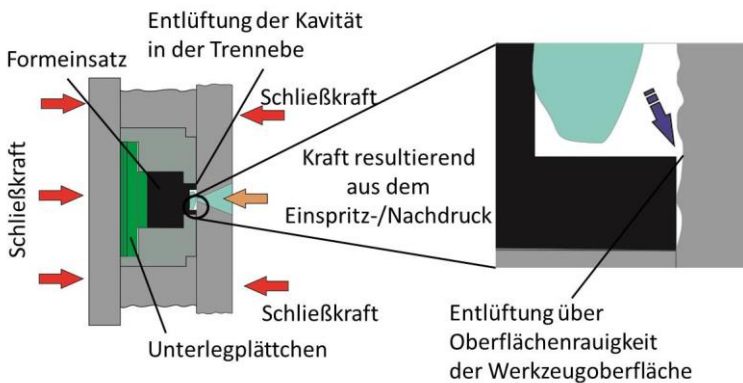


Abb. 3.24: Schematische Darstellung des Entlüftungsvorganges während des LIGA2.X-Abformprozesses

Werkzeugtemperierung

Bei den ersten Abformversuchen mit POM (Ticona *Hostaform*[®] C9021) hat sich schnell gezeigt, dass eine vollständige Formfüllung der Mikrokavitäten ohne variotherme Prozessführung möglich ist. Beim Einsatz der MS 50 wurde darüber hinaus festgestellt, dass bei „kaltem“ Werkzeug (Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C), die Entformung der Bauteile begünstigt wird. Diese Prozesseigenschaften tragen positiv dazu bei, kurze Zykluszeiten in der Abformung zu erreichen.

Tabelle 3.3: Grundparameter bei den LIGA2.X-Abformungen auf der 2K-MS 50

Parameter	Wert	Einheit
Einspritzgeschwindigkeit (am Kolben)	120	mm/s
Kühlzeit	10	s
Dosiervolumen (vier Formeinsätze eingebaut)	353	mm ³
Werkzeugtemperatur (isotherm, externes Temperier- gerät)	30	°C
Werkzeugöffnungs- geschwindigkeit	0.1	mm/s
Zykluszeit	25 bis 35	s
Material	Polyoxymethylen (POM) Fa. Ticona GmbH; Hostaform® C13031, Natur; C13013,14 Schwarz, C13031 XF 50/5339 und C9021 getrocknet 4h bei 80°C	

3.8.2 *micro-män 50*

Für die Abformungen der LIGA2.X-Formeinsätze zusammen mit der Fa. Otto Männer GmbH, wurde das vollelektrische Mikrospritzgießsystem *micro-män 50* (siehe Abb. 3.25) mit einer maximalen Schließkraft von fünf Tonnen verwendet. Zum Aufdosieren und Homogenisieren der Formmasse wurde eine Plastifizierschnecke mit Durchmesser 14 mm eingesetzt. Das Einspritzen der Formmasse erfolgte über einen Einspritzkolben mit Durchmesser 6 mm. Der maximal erreichbare Einspritzdruck der *micro-män 50* liegt bei 3.000 bar. Als Formmasse

für die Abformversuche wurde der teilkristalline Thermoplast Polyoxymethylen (POM *Hostaform*® C13031) der Fa. Ticona GmbH verwendet. Die Parameter der Abformungen, mithilfe des in Kapitel 3.7.2 beschriebenen Werkzeugs, sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst.



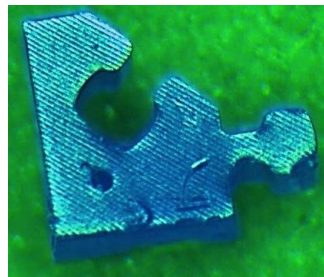
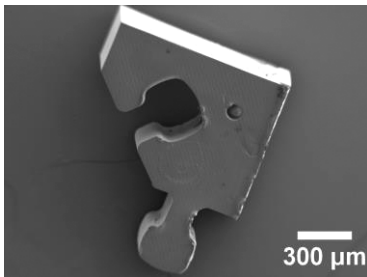
Abb. 3.25: *micro-män 50* mit dem für die LIGA2.X-Abformungen verwendeten Werkzeug

Tabelle 3.4: Grundparameter bei den LIGA2.X Abformungen auf dem *micro-män 50* Mikrospritzgießsystem

Parameter	Wert	Einheit
Einspritzdruck	200-300	bar
Nachdruck	350; 0,7	bar; s
Werkzeugtemperatur	100	°C
Thermische Prozessführung	Isotherm (bewegliche Werkzeughälfte induktiv beheizt, nicht bewegliche Werkzeughälfte über elektrische Heizpatronen beheizt)	
Werkzeugöffnungsgeschwindigkeit	50	mm/s
Zykluszeit	20 (halb-automatisch) ~5 (bei vollautomatischen Betrieb möglich)	s
Material	Polyoxymethylen (POM) Fa. Ticona GmbH; <i>Hostaform</i> ® C13031 getrocknet 4h bei 80°C	

Die auf der *micro-män 50* verwendeten Formeinsätze beinhalteten zwei unterschiedliche Strukturen: eine Puzzlestruktur mit 1.000 μm maximaler Kantenlänge und einem Volumen von $0,26 \text{ mm}^3$ sowie eine Zahnradstruktur mit einem Außendurchmesser von 729 μm und einem Volumen von $0,1 \text{ mm}^3$. Die Höhe der replizierten Bauteile betrug 400 μm . Bei den Abformversuchen musste der Einspritzpunkt (Anschnittdurchmesser) zweimal vergrößert werden.

Stabiler Prozess bei einem Anschnittdurchmesser von 450 μm



Stabiler Prozess bei einem Anschnittdurchmesser von 350 μm

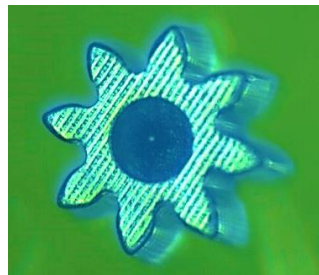
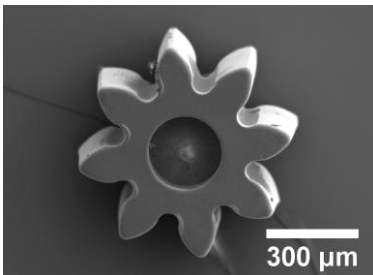


Abb. 3.26: Beispiele für abgeformte Bauteile mit dem *micro-män 50* Mikrospritzgießsystem

Erste Abformversuche mit einem Durchmesser von 250 μm zeigten eine vollständige Formfüllung. Die Entformung über das Herausziehen der Bauteile am Anguss war jedoch nicht möglich, da die Anbindung an das Bauteil zu schwach ausgelegt war. Die Erweiterung des Anschnittdurchmessers auf 350 μm zeigte Verbesserungen. Die achsensymmetrische Zahnradstruktur mit kleinerem Volumen konnte zuverlässig entformt werden. Die größeren nicht achsensymmetrischen Puzzleteile zeigten jedoch weiterhin Probleme bei der Entformung. Ein zuverlässiger Replikationsprozess für die Puzzleteile wurde dann bei einem Anschnittquerschnitt von Durchmesser 450 μm erreicht (siehe Abb. 3.26).

Entlüftung der Kavität

Die Entlüftung der Kavität wurde aufbauend auf den Erfahrungen bei der Abformung auf der MS 50 über gezielt eingebrachte Oberflächenrauheiten in der Trennebene gelöst (siehe Kapitel 3.8.1). In die Stirnseite der LIGA2.X-Formeinsätze wurde gezielt über Schleifen eine Rauheit eingebracht, welche zum gewünschten Entlüftungseffekt führt.

Werkzeugtemperierung

Die Werkzeugtemperierung des *micro-män 50* Werkzeuges wurde düsenseitig elektrisch über Heizpatronen gelöst. Die Auswerferseite wurde in den ersten Versuchen über den Kontakt mit einer Heizplatte erwärmt. Zukünftig könnte dieses über Induktion erfolgen. Im Temperaturmanagement konnte wie bei den Abformungen auf der MS 50 auf eine variotherme Prozessführung verzichtet werden. Für die Werkzeugtemperatur musste jedoch ein relativ hoher Wert von 100 $^{\circ}\text{C}$ gewählt werden. Dieser Unterschied lässt sich durch die unterschiedlichen Heizkonzepte der Maschinen, Werkzeuge und der damit verbundenen Fließweglängen erklären. Anschaulich sind diese Unterschiede an den Angussverteilern der beiden Werkzeuge in Abb. 3.27 zu sehen.

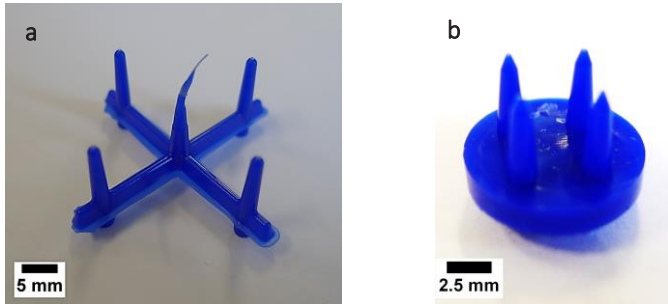


Abb. 3.27: **a** Angussystem bei der Abformung mit der *micro-män 50*; **b** Angussystem bei der Abformung mit der MS 50

3.9 Fazit der Prozessanalyse und Weiterentwicklung des LIGA-Prozesses

In Kapitel 3 wurde ein neu entwickelter Prozess vorgestellt, der die reproduzierbare und massentaugliche Herstellung von endkonturnahen polymeren LIGA-Mikrobauteilen ermöglicht. Die Herstellung dieser Art von Bauteilen - in großen Stückzahlen, zu akzeptablen Kosten und in einer angemessenen Zeit - war zu Beginn der in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Prozessentwicklung nicht möglich. Es wurde gezeigt, dass über neue Ansätze im Formenbau für das Mikrospritzgießen eine endkonturnahe nachbearbeitungsfreie Fertigung von LIGA-Bauteilen mit Schussgewichten kleiner als 1 mg über das Mikrospritzgießen mit Zykluszeiten kleiner 30 Sekunden möglich ist.

In der Konstruktion von LIGA-Bauteilen, deren Layoutgestaltung und der Auslegung der dazugehörigen LIGA-Formeinsätze, konnte durch den Einsatz von 3D-CAD Software sowie durch Spritzgießsimulationssoftware Vereinfachungen, eine größere Transparenz und eine klare Vorgehensweise in Bezug auf alle nachfolgende Fertigungsschritte definiert werden.

Bei der Fertigung von LIGA-Formeinsätzen wurden neue Wege in der Erzeugung der Außenkonturen über das Fräsen und Drahtschneiden aufgezeigt und qualifiziert. Mit neuartigen Referenzstrukturen wurden die Probleme der Lagegenauigkeit der Kavitäten zu den Formeinsatzaußenkonturen überwunden. Die Hauptprozessschritte der LIGA2.X-Formeinsatzfertigung sind in Tabelle 3.5 nochmals zusammengefasst. Um diesen Prozess in der Mikrotechnik etablieren zu können, müssen einige Herausforderungen angegangen werden: Eine davon ist die quantitative Charakterisierung der im Prozess verwendeten Formeinsätze sowie der replizierten Bauteile für eine Beurteilung der im Prozess realisierbaren Toleranzen. Die zweite Herausforderung ist die Werkzeugtechnik im Mikrospritzgießen, die auf spezielle Anforderungen wie zum Beispiel auf die Art der Entformung angepasst werden muss. Auf beide Herausforderungen wird in den folgenden Kapiteln eingegangen.

Tabelle 3.5: Hauptprozessschritte in der LIGA2.X-Formeinsatzherstellung

Bauteildesign und Form-einsatzdesign	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erstellen der Bauteil 3D Modelle ▪ Festlegen der Position der Anspritzpunkte ▪ Erstellen der Formeinsatz 3D Modelle ▪ Kontrolle der Lage der Kavität auf dem Formeinsatz
Layouterstellung Nickelstrukturplatte (NISP)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Homogene Aufteilung der Bauteile auf der strukturierbaren Fläche ▪ Erstellen eines 3D Modells der Nickelstrukturplatte ▪ Kontrolle der Position der Bauteile auf der Nickelstrukturplatte ▪ Ableiten der 2D Datei für die E-Beam-Lithographie
Maskenherstellung	<p>Zwischenmaskenherstellung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Substratvorbereitung (4"-Si-Wafer mit C/Ti/Cr/Au-Schicht) ▪ Resiststrukturierung mittels Elektronenstrahlolithographie (Verwendung der .gds-Datei) ▪ Entwicklung des Resists ▪ Goldgalvanoformung der Absorberstrukturen ▪ Aufkleben des Rahmens und Abheben der Zwischenmaske vom Substrat <p>Arbeitsmaskenherstellung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Substratvorbereitung (4"-Si-Wafer mit C/Ti/TiOx-Schicht/ Invarsubstrat mit Ti/TiOx-Schicht) ▪ Resiststrukturierung mittels Röntgenlithographie (Zwischenmaske)

- Entwicklung des Resists
 - Goldgalvanoformung der Absorberstrukturen
 - Aufkleben des Rahmens und Abheben der Arbeitsmaske vom Substrat /
Nasschemisches Ätzen des Invars substrats zur Freilegung der Ti-Membran
-

**Formeinsatz-
herstellung**

Strukturierung:

- Substratvorbereitung (8 mm dickes Kupfersubstrat mit Ti/TiOx-Schicht)
- Resiststrukturierung mittels Röntgenlithographie (Arbeitsmaske)
- Entwicklung des Resists
- Nickelgalvanoformung der Nickelstrukturplatte
- Erzeugung der Außenkontur der Nickelstrukturplatte

Mechanische Bearbeitung:

- Schutz der Kavitäten in der Nickelstrukturplatte mittels polymerer Schicht
 - Vereinzelung der Formeinsätze mittels μ -Fräsen und Drahterodieren
 - Entfernen der Schutzschicht
-

4 Einführung einer quantitativen Prozesskontrolle im LIGA2.X-Prozess

Bei der Herstellung von Formeinsätzen sowie bei deren Replikation muss sichergestellt werden, dass die im Layout festgelegten Maße im vorgegebenen Toleranzbereich liegen. Um dies überprüfen zu können, ist eine quantitative Maßkontrolle unabdingbar. Im Folgenden wird eine erstmals in den LIGA-Prozess integrierte quantitative Maßerfassung vorgestellt und deren Ergebnisse diskutiert. Die Ergebnisse sind ein wichtiger Schritt zur Erfassung des derzeitigen Standes der LIGA-Technik zur Herstellung von Formeinsätzen. Eine integrierte Maßkontrolle in den unterschiedlichen Fertigungsschritten bis zum abgeformten Bauteil erlaubt außerdem die Nachverfolgbarkeit innerhalb der LIGA2.X-Prozesskette sowie den Fertigungsabbruch beziehungsweise die Wiederholfertigung auf Grundlage der einzelnen Messergebnisse. Idealerweise wird auf Basis der Messergebnisse ein Vorhalt bestimmt, der durch das LIGA-Verfahren gefertigte Strukturen und Bauteile in ihrer Maßhaltigkeit verbessert.

4.1 Messmethode

Grundlage ist die am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) des KIT entwickelte Methode zur Qualitätskontrolle von Strukturen, hergestellt über die Röntgentiefenlithographie. Bei dieser werden zwei unterschiedliche Messtechniken eingesetzt [46], [107], [108].

In der ersten Messtechnik wird eine Koordinatenmessmaschine (CMM) (Werth Video Check IP-400) mit Fasertaster für eine taktile Messung verwendet (siehe Abb. 4.1). Die CMM wird in einem Rein-

raum der Klasse 10.000 mit einer Temperaturregelung ($20 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$) betrieben [46]. Stündlich wird die Temperatur zusammen mit der Luftfeuchtigkeit aufgezeichnet. Die Eignung der verwendeten CMM für die Vermessung von LIGA-Strukturen, in den hier geforderten Dimensionen, wurde in [107] und [108] nachgewiesen. Die Auflösung der CMM mit Fasertaster liegt bei $0,01 \text{ }\mu\text{m}$ und erlaubt Messungen mit einer Toleranz von $0,2 \text{ }\mu\text{m}$ [108]. Die Messunsicherheit U für typische Messungen wurde in [108] auf $2 \text{ }\mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung k von 2 berechnet. Der verwendete Fasertaster (WFP) besteht aus einer Glasfaser mit einem sphärischen Tastelement an der Spitze (siehe Abb. 4.1). Der Durchmesser des Tastelements wird jährlich verifiziert und beträgt $82,0 \text{ }\mu\text{m}$ [107].

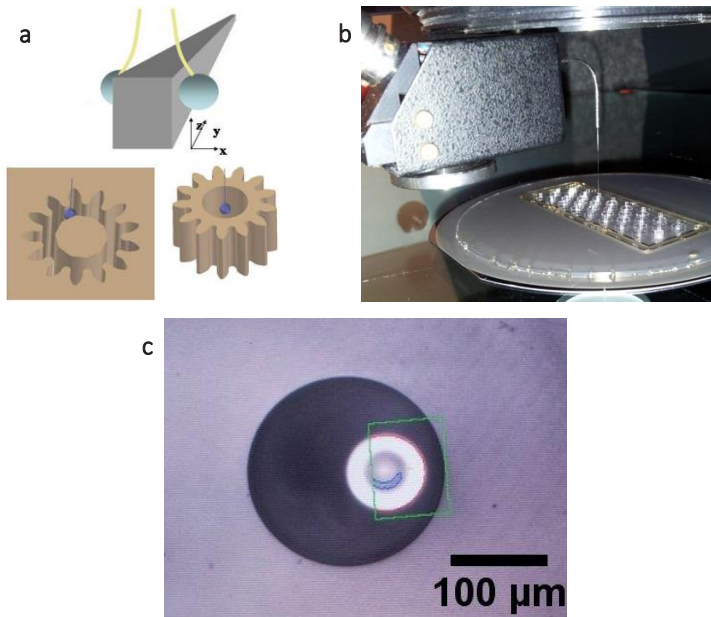


Abb. 4.1: **a** Messprinzip der CMM mit Fasertaster [107]; **b** Taktile Messung von Resiststrukturen (PMMA) mit der CMM (Werth Video Check IP-400) mit Fasertaster **c** Aufnahme des Fasertasters in Eigenleuchtmodus bei der Messung einer $\varnothing 200 \text{ }\mu\text{m}$ Resiststruktur (PMMA)

Das Messprinzip der taktilen Messung mittels der CMM mit Fasertaster basiert auf der Detektion des Mittelpunkts des sphärischen Tastelements mit einem optischen Bildgebungssystem und einer CCD-Kamera. Der WFP ist so montiert, dass sich das Zentrum des Tastelements in der Fokusebene des optischen Detektionssystems befindet. Das rückgestreute Licht des Tastelements wird auf dem Sensor der CCD-Kamera als heller Punkt dargestellt. Bei Kontakt des Tastelements mit der Oberfläche der zu vermessenden Probe verändert sich die Position des Lichtpunktes auf dem Sensor. Diese Veränderung der Position kann durch das Detektionssystem mit sub-pixel Genauigkeit bestimmt werden. Der Durchmesser (d) des Tastelements muss später von den erfassten Werten addiert/subtrahiert werden (siehe Gleichung {4.1} und Gleichung {4.2}), [107].

$$d_{Loch} = d_{Messwert} + d_{Tastelement} \quad \{4.1\}$$

$$d_{Säule} = d_{Messwert} - d_{Tastelement} \quad \{4.2\}$$

Bedingt durch den Durchmesser (d) des Tastelements am WFP können Strukturen erst ab einer Höhe von 50 μm (größer als der halbe Durchmesser des verwendeten Tastelementes) gemessen werden. Diese Randbedingung verhindert den Einsatz der Methode „CMM mit Fasertaster“ in der Messwerterfassung der Goldabsorberstrukturen auf den Röntgenmasken (Zwischenmaske Höhe; 2,3 $\mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$; Arbeitsmaske Höhe: 25 $\mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$). Die Verwendung einer berührungslosen Messmethode mit Hilfe eines Mikroskops mit manuellem xy-Tisch schließt diese Lücke in der Messwerterfassung von Strukturen mit einer Höhe kleiner 50 μm [109].

Bei der zweiten Messtechnik erfolgt die Messwerterfassung mit dem Messmikroskop mit xy-Tisch, indem die Oberfläche der Probe in die Fokusebene des Mikroskops gebracht wird. Auf dieser Oberfläche kann mit Hilfe des menschlichen Auges durch das Okular und den Mikrometerschrauben am xy-Tisch die Kante der zu messenden

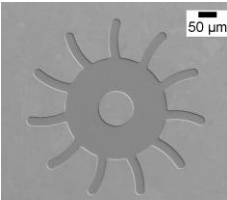
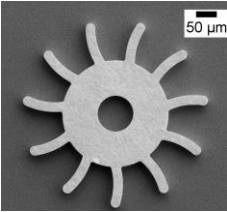
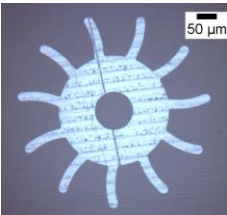
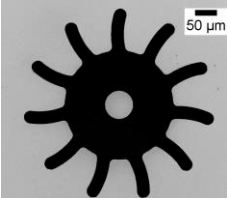
Struktur mit der Fadenkreuzmitte im Okular zur Deckung gebracht werden [107]. Auf einer Digitalanzeige kann nun der Wert abgelesen und in das Auswerteprogramm übertragen werden. Die Messunsicherheit für das Messmikroskop mit xy-Tisch wurde für x und y bestimmt zu 1,5 μm [107].

Aufgrund der starken Unterscheidung der beiden Messmittel in Hinblick auf deren Art beziehungsweise Vorgehensweise bei der Messwerterfassung, wird in der vorliegenden Arbeit darauf verzichtet, die Messergebnisse der beiden Messmittel miteinander zu kombinieren. Das heißt Messergebnisse der Röntgenmasken müssen getrennt von den restlichen mit der CMM mit Fasertaster gemessenen Ergebnissen betrachtet werden.

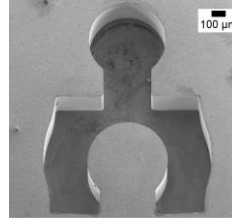
Die Berechnung der Annäherung der gemessenen Daten an die theoretische Form der zu messenden Strukturen (kreisrunde Säule bzw. Löcher) wurde in [46] ausführlich beschrieben. In dieser Arbeit wurde für die Annäherung des Durchmessers der Levenberg-Marquardt Algorithmus und für die Annäherung der Rundheit die Least-Square-Methode verwendet [46]. Die Vorgehensweise in [46] wurde für die Auswertung der Messergebnisse in der vorliegenden Arbeit übernommen.

In Tabelle 4.1 sind die verschiedenen Messmittel in den verschiedenen Prozessschritten des LIGA2.X-Verfahrens aufgeführt.

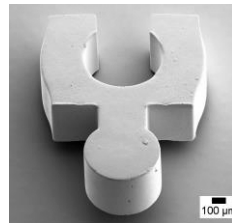
Tabelle 4.1: Auflistung der verschiedenen Zeitpunkte, an denen eine Messwerterfassung in der LIGA2.X -Prozesskette durchgeführt wird sowie das jeweils verwendete Messmittel

Fertigungsschritt	Messmittel	Messobjekt
Zwischenmaske Au Höhe 2,3 μm $\pm 0,5 \mu\text{m}$	Mikroskop Leitz UWM SKI mit XY-Tisch	
Arbeitsmaske Au Höhe 25 μm $\pm 5 \mu\text{m}$	Mikroskop Leitz UWM SKI mit XY-Tisch	
Strukturierter Resist (PMMA) Resisthöhe: 400 μm $\pm 15 \mu\text{m}$	Werth CMM Video Check IP 400 Fasertaser WFP	
Nickelstrukturplatte Strukturtiefe: 400 μm $\pm 15 \mu\text{m}$	Werth CMM Video Check IP 400 Fasertaser WFP	

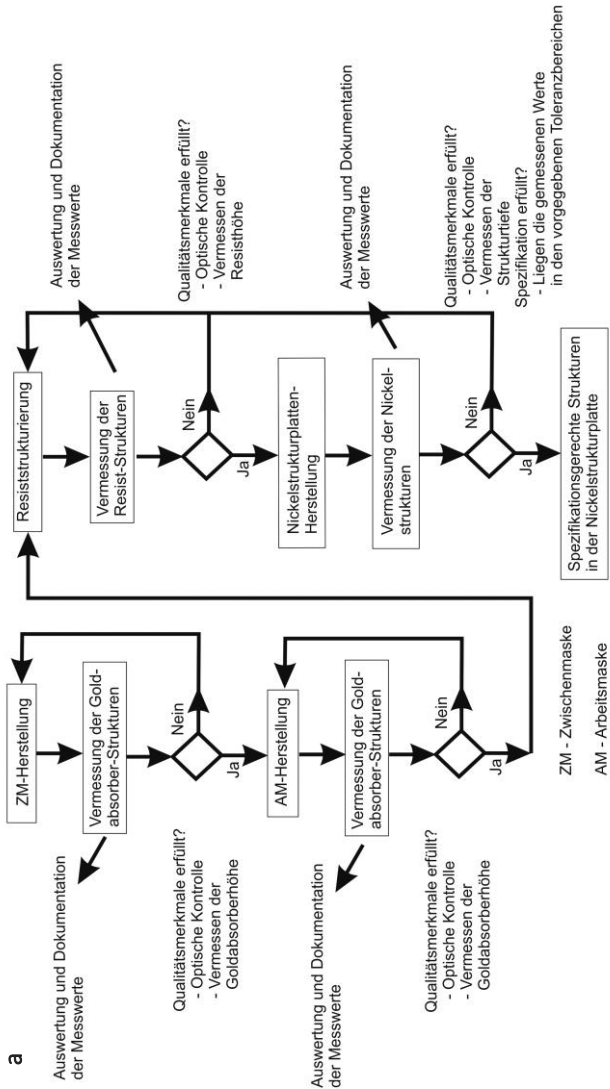
Formeinsatz (Nickel) Werth CMM Video
Strukturtiefe: Check IP 400
400 μm \pm 15 μm Fasertaser WFP



Replizierte Bauteile
(POM) Werth CMM Video
Bauteilhöhe: Check IP 400
400 μm \pm 15 μm Fasertaser WFP



In Abb. 4.2a und Abb. 4.2b ist der Ablauf der quantitativen Messwerterfassung innerhalb der LIGA2.X-Prozesskette dargestellt. Die Ablaufskizze verdeutlicht, in welchem Prozessschritt eine Messwerterfassung erfolgt und zu welchem Zeitpunkt bei einer Abweichung der Spezifikationen Maßnahmen durchgeführt werden können.



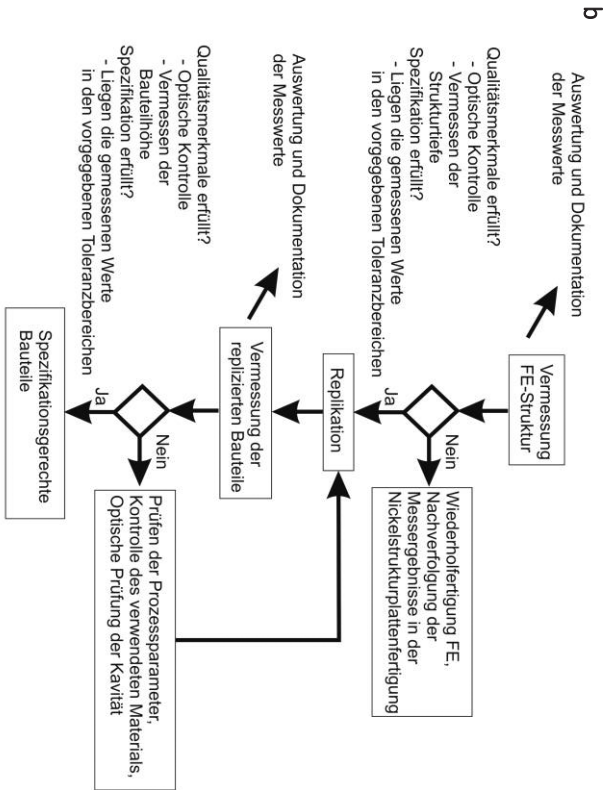


Abb. 4.2: Ablaufdiagramm der quantitativen Messwerterfassung innerhalb der LIGA-Prozesskette: **a** Messwerterfassung innerhalb der NISP-Herstellung; **b** Messwerterfassung innerhalb der Replikation

4.2 Maßkontrolle innerhalb der Fertigung der Nickelstrukturplatte (NISP)

Für die Maßkontrolle in der Fertigung der NISP wurden kreisrunde Strukturen des LIGA2.0-Layouts ausgewählt. Die vermessenen Strukturen waren Wellenbohrungen und Außenkonturen von Zahnrädern eines Planetengetriebes (siehe Abb. 4.3a) sowie Wellenbohrungen von Rotorstrukturen (siehe Abb. 4.3b). Die Durchmesser der Strukturen variierten zwischen 200 μm und 2.442 μm .

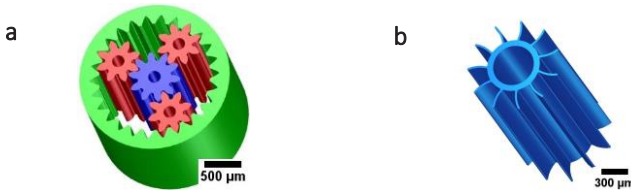


Abb. 4.3: **a** Planetengetriebe des LIGA2.0-Layouts; **b** Rotorstruktur des LIGA2.0-Layouts

In Abb. 4.4 wird das LIGA2.0-Layout als zweidimensionale Skizze mit der jeweiligen Bezeichnung, der auf dem Layout befindlichen 48 Strukturen gezeigt. Die grün umrandeten Strukturen wurden zur Erarbeitung der quantitativen Prozesskontrolle herangezogen und vermessen.

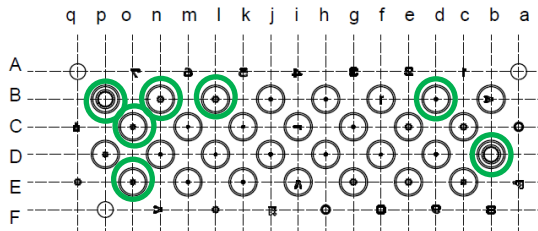


Abb. 4.4: Layout LIGA2.0 mit grün gekennzeichneten Strukturen, die für die Vermessung herangezogen wurden (Bp, Bn, Bl, Bd, Co, Db und Eo)

Innerhalb der Formeinsatzfertigung (LIGA2.0-Layout) wurden Direkt-LIGA-Bauteile (DLB)⁸ im Rahmen der Prozessoptimierung für die Galvanoformung von kreisrunden Säulenstrukturen (siehe Kapitel 5.5) hergestellt. Die DLB wurden in die Untersuchungen der Maßhaltigkeit einbezogen (siehe Abb. 4.5).

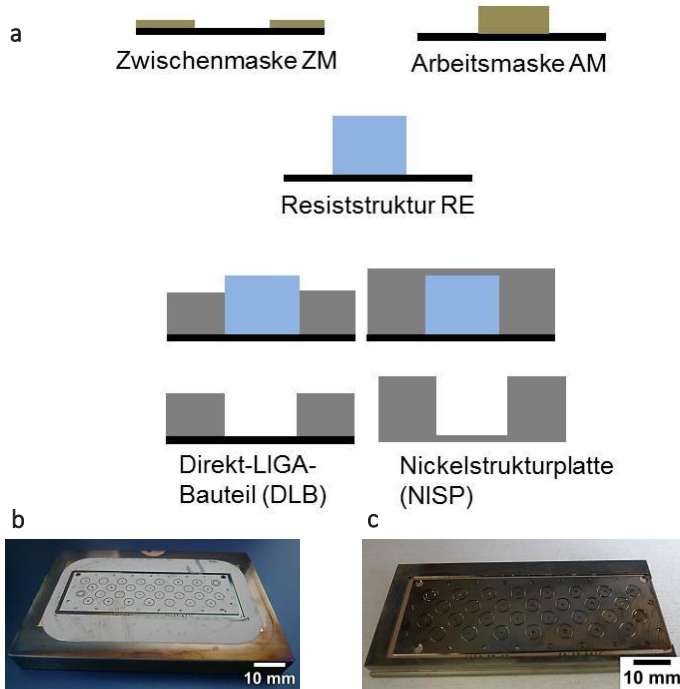


Abb. 4.5: **a** Schematische Darstellung der NISP- / DLB-Herstellung; **b**: Aufnahme eines Direkt-LIGA-Bauteiles auf Kupfersubstrat (LIGA2.0); **c** Aufnahme einer NISP (LIGA2.0)

⁸ Unter Direkt-LIGA-Bauteilen (DLB) werden metallische Bauteile verstanden, die direkt über die Galvanoformung hergestellt werden. Der Schritt der Abformung entfällt „LIG(A)“. Die Bauteile bestehen aus elektrochemisch abgeschiedenen Materialien, wie zum Beispiel Gold oder Nickel [110].

4.2.1 Bauteilkonturabhängigkeit in der NISP-Fertigung

Im folgenden Kapitel wird am Beispiel der Ergebnisse der Maßerfassung (innerhalb der NISP-Fertigung unter der Verwendung von PMMA-Resist) die Konturabhängigkeit der maßlichen Abweichung von kreisrunden Säulen beziehungsweise Lochstrukturen dargestellt. Hierzu werden die Ergebnisse zweier Strukturen des Planetengetriebes (Layout LIGA2.0, Strukturbezeichnung: Bl und Bp) herangezogen. Die Gesamtabweichung $\delta_{NISP/DLB}$, die über die komplette NISP-Fertigung auftritt, kann vereinfacht aufgeteilt werden in (siehe Gleichung {4.3}): Die Abweichungen verursacht durch die Galvanoformung ($\delta_{Galvanik}$) und die Abweichung resultierend aus den Lithographieverfahren (δ_{Litho}). Darüber hinaus gibt es weitere Einflussfaktoren aus den zahlreichen Prozessschritten vor oder nach der Lithographie beziehungsweise der Galvanoformung. Diese sind in Gleichung {4.3} in prozessbedingte Abweichungen ($\delta_{Prozess}$) zusammengefasst. Beispiele für $\delta_{Prozess}$ sind Abweichungen, verursacht beim Aufbringen des Resists, der Vorbehandlung der Substrate und bei diversen Ätzschritten. Speziell in der Untersuchung der Strukturgeometrieabhängigkeit spielen diese Faktoren eine untergeordnete Rolle und werden nicht weiter betrachtet.

$$\delta_{NISP/DLB} = \delta_{Galvanik} + \delta_{Litho} + \delta_{Prozess} \quad \{4.3\}$$

Die Abweichung, verursacht durch die Lithographie (δ_{Litho}) setzt sich zusammen aus Abweichungen in der E-Beam-Lithographie (zur Zwischenmaskenherstellung) sowie der beiden Röntgenlithographie-schritte zur Herstellung der Arbeitsmaske und der NISP, beziehungsweise des DLB (siehe Gleichung {4.4}). δ_{Litho} kann aus einer Summe von Einflüssen resultieren, wie zum Beispiel der Fluoreszenzstrahlung aus der Maskenmembran, der Erzeugung von Sekundärelektronen auf der Substratoberfläche (Metall), der Absorption von Strahlung in abgeschatteten Bereichen, der Resistentwicklung, der Divergenz der

Strahlung und vielen weiteren Einflussgrößen [36]. Die durch die Lithographie verursachte Abweichung kann bei den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Strukturen näherungsweise als strukturunabhängig eingestuft werden. Das heißt, die verursachte Abweichung ist für alle Strukturen des Layouts, unabhängig von deren lateralen Abmaßen, nahezu identisch. Aus diesem Grund wird im Folgenden nicht näher auf (δ_{Litho}) eingegangen.

$$\delta_{Litho} = \delta_{Litho\ ZM} + \delta_{Litho\ AM} + \delta_{Litho\ NISP/DLB} \quad \{4.4\}$$

Die durch die Galvanoformung resultierende Abweichung $\delta_{Galvanik}$ setzt sich zusammen aus der in der Zwischenmasken- und Arbeitsmaskenfertigung durchgeführten Goldgalvanoformung und der in der NISP- beziehungsweise der DLB-Fertigung durchgeführten Nickelgalvanik (siehe Gleichung {4.5}). $\delta_{Galvanik}$ ist durch das Verhalten des PMMA-Resists während der Galvanik zu erklären. Hier spielen zwei Effekte eine Rolle. Zum einen die thermische Ausdehnung (δ_{Temp}) des PMMA-Resists, resultierend aus der Temperaturänderung bei der Galvanoformung (Temperatur 52 °C) (siehe Anhang A.1), und zum anderen das Quellen des PMMA-Resists durch die Flüssigkeitsaufnahme im Elektrolyt (während der Galvanik), $\delta_{Quellen}$ [111], [112]. Beide Einflussfaktoren sind stark abhängig von der Kontur und der Höhe der Resiststrukturen. Der Einfluss der Abweichung ist am Beispiel der Nickelgalvanoformung in Abb. 4.6 dargestellt. Eine theoretische Betrachtung der thermischen Ausdehnung und des Quellens von PMMA auf Metallstrukturen, erzeugt über das LIGA-Verfahren, wurde in den Sandia National Laboratories bereits 2004 durchgeführt [111].

$$\begin{aligned} \delta_{Galvanik} = & (\delta_{Temp} + \delta_{Quellen})_{ZM} \\ & + (\delta_{Temp} + \delta_{Quellen})_{AM} \\ & + (\delta_{Temp} + \delta_{Quellen})_{NISP/DLB} \end{aligned} \quad \{4.5\}$$

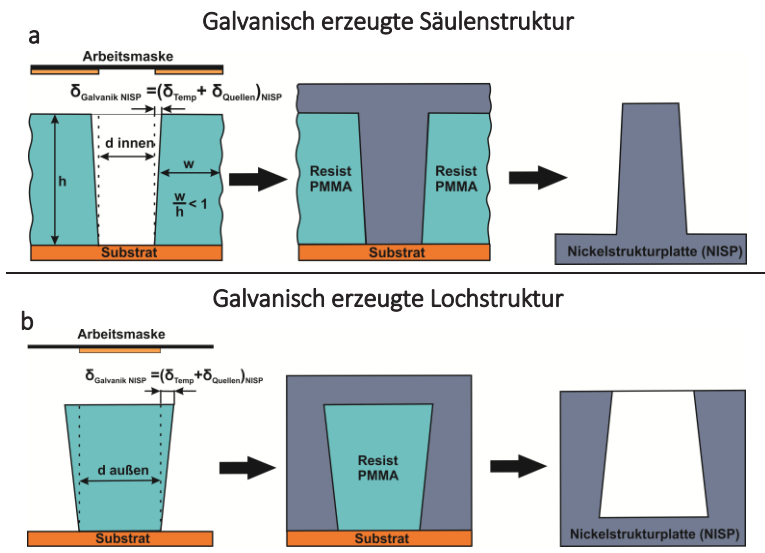
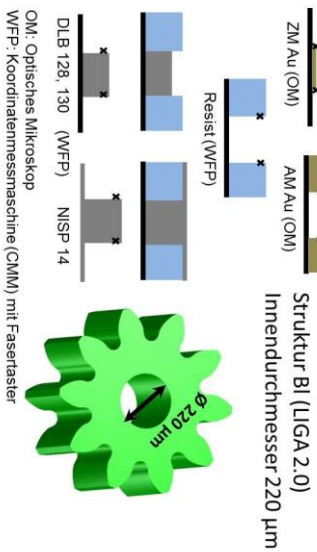
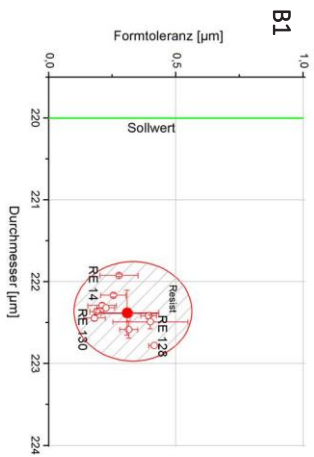
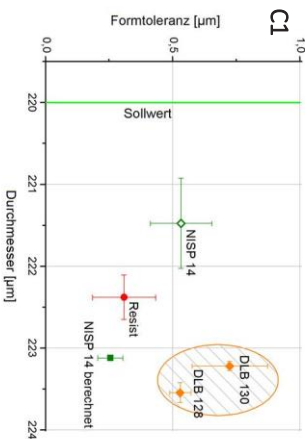
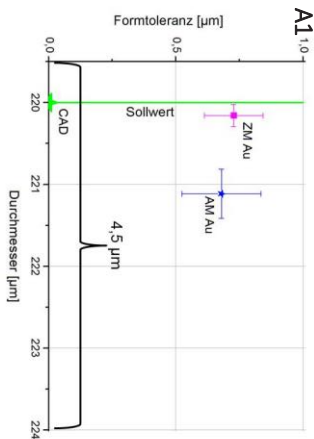


Abb. 4.6: Schematische Darstellung der strukturabhängigen Abweichung, verursacht durch thermische Ausdehnung und Quellen (Feuchtigkeitsaufnahme) des PMMA-Resists (der untersuchten Getriebestrukturen). **a** für galvanisch erzeugte Säulenstrukturen und **b** für galvanisch erzeugte Lochstrukturen

In Abb. 4.7 sind die messtechnisch ermittelten Ergebnisse der beiden zur Untersuchung herangezogenen Getriebestrukturen dargestellt. Bei den Strukturen handelte es sich um das Sonnenrad (Bl) und das Hohlrad (Bp). Die betrachteten Messgrößen sind zum einen die Wellenbohrung des Sonnenrades, mit 220 μm Innendurchmesser (Sollwert) und zum anderen der Außendurchmesser 2.442 μm (Sollwert) des Hohlrades. Auf der y-Achse der Diagramme ist die Formtoleranz aufgetragen die x-Achse zeigt die gemessenen Ist-Werte des Durchmessers. Für beide Strukturen wurde jeweils ein Diagramm für die Messergebnisse der Goldabsorberstrukturen auf den Röntgenmasken, der Resiststrukturen auf dem Kupfersubstrat sowie der DLB, beziehungsweise NISP, nach dem Strippen des Resists erstellt



x = Markierung der Messtellen

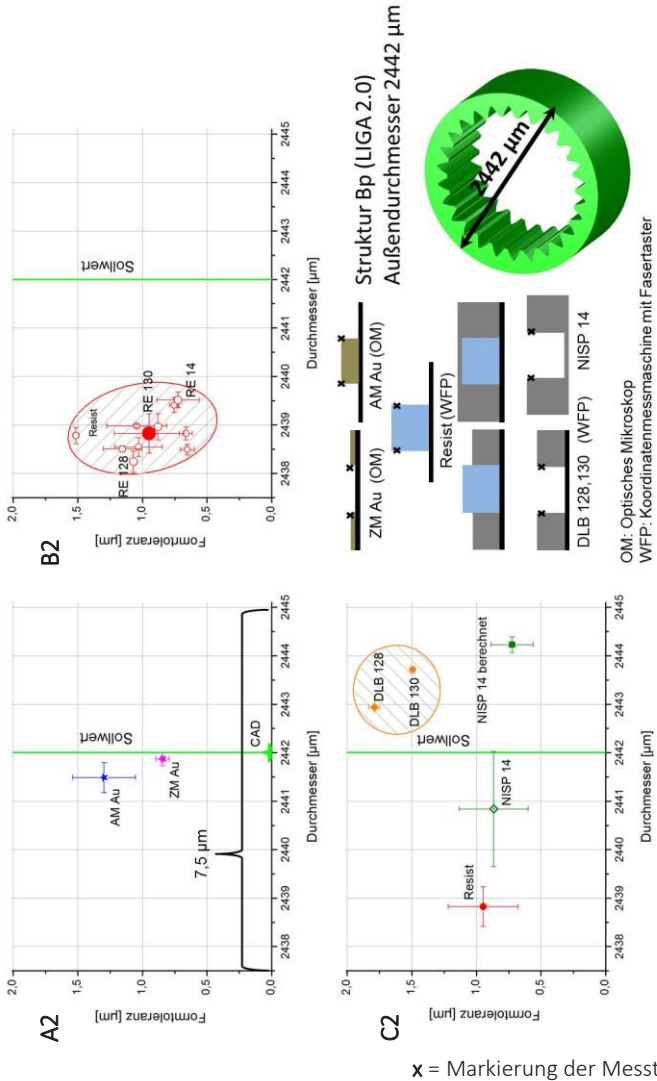


Abb. 4.7: Darstellung der messtechnisch ermittelten Daten der beiden Getriebestrukturen; Sonnenrad Bp (Diagramme: A1, A2 und A3); Hohlrad Bp (Diagramme: A2, B2 und C2)

Der Vergleich der Ergebnisse der Goldabsorberstrukturen auf den Röntgenmasken (ZM Au; AM Au) in Abb. 4.7 (Diagramme A1 und A2) zeigt, dass die Durchmesser der Wellenbohrung größer (im Sub-Mikrometerbereich) und die Werte der Außenkontur des Hohlrades im Vergleich zum Sollwert kleiner sind, wobei die Werte für die Formtoleranz des vergleichsweise „großen“ Hohlrades Bp größer ausfallen. Die Messwerte der Resiststrukturen (RE); (gemessen im Laufe der Jahre 2012 und 2013), dargestellt in Abb. 4.7 (Diagramme B1 und B2) zeigen für beide Strukturen die gleiche Tendenz wie zuvor die Goldabsorberstrukturen der Röntgenmasken, wobei hier die Abweichungen zum Sollwert signifikant höher sind. In Zahlen liegen die Werte der elf unterschiedlichen Resiststrukturen (auf unterschiedlichen Proben) der Wellenbohrung des Sonnenrades Bl im Bereich von 221,9 μm bis 222,8 μm und für die neun vermessenen Resiststrukturen der Außenkontur des Hohlrades Bp im Bereich von 2438,2 μm und 2440,8 μm . Der Mittelwert der Resiststrukturen des Sonnenrades Bl ist 2,4 μm größer und der Mittelwert des Hohlrades Bp 3,2 μm kleiner im Vergleich zu dem im Bauteildesign festgelegten Sollwert. Die Betrachtung der Formtoleranz der Resiststrukturen zeigt wiederum größere Abweichungen der Werte für das Hohlrades Bp im Vergleich zum Sonnenrad Bl.

Abb. 4.7 (Diagramme C1 und C2) zeigt die Werte der NISP und der DLB. Die Abweichungen der beiden Strukturen zum Sollwert sind kleiner als die der Resiststrukturen. Der Wert des Sonnenrades Bl ist 1,5 μm größer und der des Hohlrades Bp 0,7 μm kleiner als der jeweilige Sollwert. In Tabelle 4.2 sind die Abweichungen der jeweiligen Fertigungsschritte nochmals dargestellt.

Tabelle 4.2: Auflistung des Betrags der maßlichen Abweichungen innerhalb der Prozessschritte

Struktur	Sollwert	Betrag der Abweichung		
		Sollwert- ZM(AU)	AM(AU)- ZM(AU)	NISP- \overline{RE}
Wellenbohrung Bl	220 μm	0,2 μm	1,0 μm	0,9 μm
Außendurchmesser Bp	2442 μm	0,1 μm	0,4 μm	2,0 μm

Die Messwerte der untersuchten DLB-Proben (am Beispiel der Proben mit der Nr. 128 und 130) weichen von denen der NISP-Probe (am Beispiel der Probe mit der Nr. 14) ab (siehe Abb. 4.7). Durch die unterschiedliche Höhe der Messstellen an der Struktur lässt dies auf eine Abweichung der Seitenwände von der Lotrechten schließen. Für eine grobe Abschätzung der Seitenwandabweichung in Grad, wurde über die ermittelten Messwerte an den DLB ein Wert für die NISP ($\text{NISP}_{\text{berechnet}}$) bestimmt. Dieser Wert beruht auf der hohen Reproduzierbarkeit der Nickelgalvanoformung. Es konnte bei der Betrachtung einzelner Strukturgeometrien festgestellt werden, dass die Abweichungen der galvanisch erzeugten Strukturen (strukturgeometrieabhängig) von den dazugehörigen Resiststrukturen nahezu identisch sind. Diese Eigenschaft der hohen Reproduzierbarkeit in der Nickelgalvanoformung wurde 2012 in [46] veröffentlicht. Über die Messwerte der Resiststrukturen (RE) und die Messwerte der DLB kann der Wert $\text{NISP}_{\text{berechnet}}$ bestimmt werden und damit die Abweichung der Seitenwand von der Lotrechten in Grad in einer groben Annäherung abgeschätzt werden (siehe Abb. 4.8).

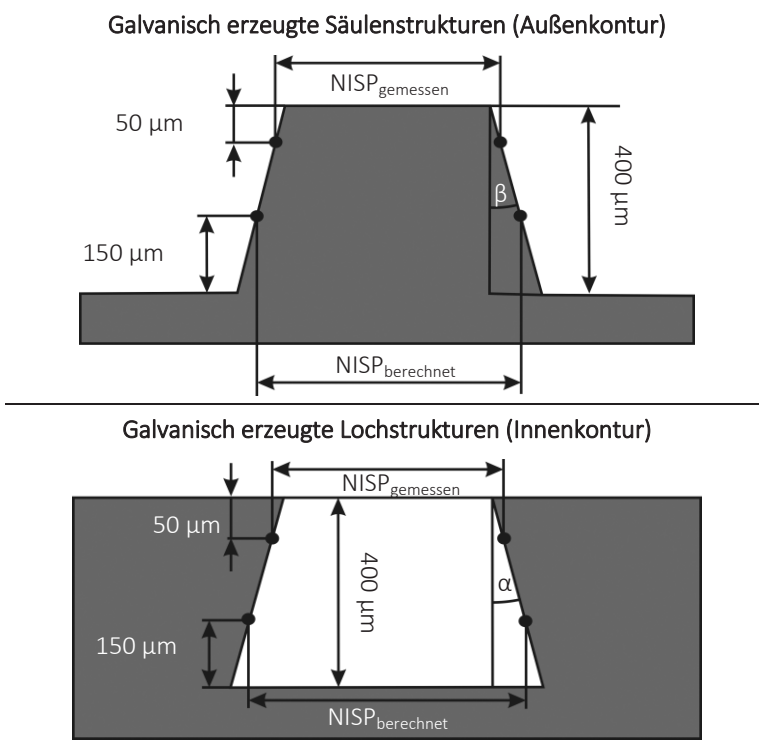


Abb. 4.8: Schematische Darstellung der bauteilkonturabhängigen Abweichung von Strukturseitenwänden in der Fertigung der NISP am Beispiel der beiden untersuchten Getriebestrukturen

Für die untersuchte Probe 14 (NISP 14) und der dazugehörigen Resiststruktur sowie DLB-Proben (DLB 128 und DLB 130) konnte NISP 14_{berechnet} bestimmt werden (siehe Gleichung {4.6}) und darüber eine Winkelabweichung für die Sonnenradstruktur (Säule) von $\beta_{14}=0,23^\circ$ und für die Hohlradstruktur (Loch) von $\alpha_{14}=0,48^\circ$ berechnet werden.

$$\begin{aligned}
 \text{NISP}_{\text{berechnet}} &= RE_{\text{NISP}} + \frac{\sum_{k=1}^n (\text{DLB}_{\text{Nr.x}} - RE_{\text{Nr.x}})_k}{n} \\
 &= RE_{14} + \frac{(\text{DLB}128 - RE128) + (\text{DLB}130 - RE130)}{2} \quad \{4.6\} \\
 &= \text{NISP}14_{\text{berechnet}}
 \end{aligned}$$

4.2.2 Maßliche Abweichung von kreisrunden galvanisch erzeugten LIGA-Strukturen

In Abb. 4.9 sind die Abweichungen von kreisrunden Strukturen auf zwei Nickelstrukturplatten (Nr.14 und Nr.83) und zwei Direkt-LIGA-Bauteilen (Nr. 128 und Nr. 130) zu dem im Layout festgelegten Sollwert aufgetragen. Diese Werte sind für potentielle Anwender von LIGA-Strukturen von höchster Bedeutung, da sie eine Aussage darüber erlauben, ob die im Layout vereinbarte Spezifikation in der gefertigten Struktur eingehalten wurde.

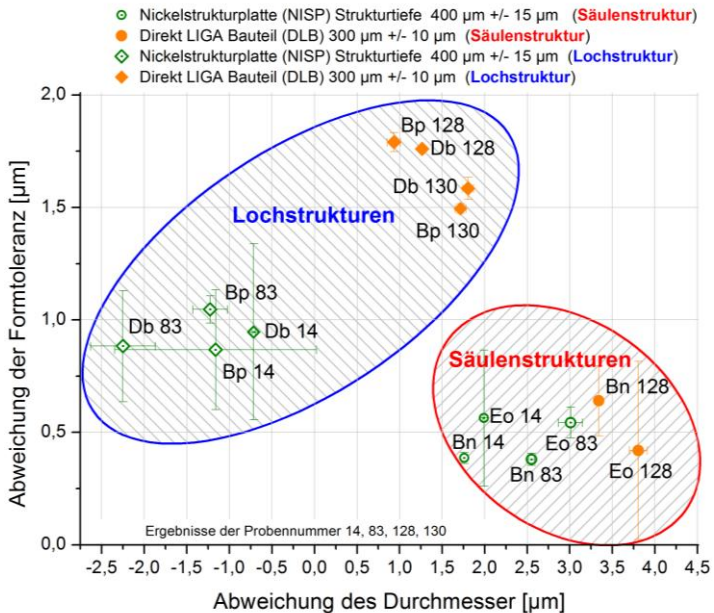


Abb. 4.9: Werte der Abweichungen der Strukturen auf den beiden vermessenen NISP-Proben und den beiden DLB-Proben

Die Maximalwerte der Abweichung aller vermessenen Innen- und Außendurchmesser zum Sollwert zwischen 200 μm und 2442 μm (NISP und DLB) liegen in einem Bereich zwischen -2,3 μm und +3,8 μm . Wobei die positive Abweichung von 3,8 μm für den Innendurchmesser des Planetenrades Eo auf einer DLB-Probe gemessen wurde und die negative Abweichung von -2,3 μm auf einer NISP-Probe in der Hohlradstruktur Db.

Bei Betrachtung der gemessenen Werte auf den beiden NISP-Proben (Nr. 14 und Nr. 83) haben die im Vergleich „großen“ Hohlradstrukturen (Sollwert Durchmesser 2442 μm) Abweichungen im negativen Bereich (-1,3 μm bis -2,3 μm). Das heißt „große“ Lochstrukturen haben die Tendenz zu kleineren Durchmessern. Die gemessenen Säulenstrukturen der Planeten-, Sonnen- und Rotorstrukturen mit Durchmessern zwischen 200 μm und 250 μm (Sollwert) haben Abweichungen im positiven Bereich (+1,8 μm bis +3,2 μm). Dies bedeutet, dass Säulenstrukturen im Durchmesserbereich von 200 μm bis 250 μm die Tendenz zu größeren Werten aufweisen.

Für die Strukturen auf den zwei vermessenen DLB-Proben (Nr. 128 und 130) ergibt sich die gleiche Tendenz, wie zuvor für die Strukturen auf den NISP-Proben. Bei einem Vergleich der Abweichungen der Strukturen auf den DLB-Proben mit denen auf den NISP-Proben ist die in Kapitel 4.2.1 beschriebene Abweichung der Seitenwände von der Lotrechten zu erkennen.

In Tabelle 4.3 sind die ermittelten Messwerte, deren Sollwert und die Abweichung in Prozent zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Messwerte und deren Abweichung zum jeweiligen Sollwert der vermessenen, galvanisch erzeugten NISP und Direkt-LIGA-Bauteile

Struktur ID	Sollwert [µm]	Messwerte Durchmesser [µm]	Messwerte Formtoleranz [µm]	Abweichung zwischen Sollwert und Messwert [µm]	Prozentuale Abweichung zum Sollwert in [%]	Direkt LIGA Bauteil (DLB) / Nickelstrukturplatte (NISP)
Bn 14	200	201.8	0.4	1.8	0.88	NISP 14
Bn 83	200	202.6	0.4	2.6	1.16	NISP 83
Bn 128	200	203.3	0.6	3.3	1.67	DLB 128
Bl 14	220	221.5	0.5	1.5	0.67	NISP 14
Bl 83	220	222.4	0.7	2,4	1,08	NISP 83
Bl 128	220	223.6	0.5	3.6	1.61	DLB 128
Bl 130	220	223.2	0.7	3.2	1.46	DLB 130
Dp 14	220	222.2	0.5	2.1	0.95	NISP 14
Dp 83	220	223.4	0.4	3.4	1.53	NISP 83
Dp 128	220	223.8	0.5	3.8	1.73	DLB 128
Eo 14	250	252.0	0.6	2.0	0.80	NISP 14
Eo 128	250	253.8	0.4	3.8	1.52	DLB 128
Bp 14	2442	2440.8	0.9	-1.2	0.05	NISP 14
Bp 83	2442	2440.8	1.1	-1.2	0.05	NISP 83
Bp 128	2442	2442.9	1.8	0.9	0.04	DLB 128
Bp 130	2442	2443.7	1.5	1.7	0.07	DLB 130
Db 14	2442	2441,3	1.0	-0.7	0.03	NISP 14
Db 83	2442	2439.8	0.9	-2.3	0.09	NISP 83
Db 128	2442	2443.3	1.8	1.3	0.05	DLB 128
Db 130	2442	2443.8	1.6	1.8	0.07	DLB 130

4.3 Maßkontrolle innerhalb der Replikation von LIGA2.X-Mikrobauteilen

Für die Maßkontrolle innerhalb der Replikation wurden Formeinsätze des LIGA2.1 Layouts (siehe Abb. 4.10) ausgewählt. Von den acht untersuchten Formeinsätzen beinhalten vier eine Puzzle-Verteilerstruktur und die anderen vier eine Puzzle-Verbindungsstruktur. Die replizierten Bauteile der acht Formeinsätze lassen sich zu einem „Endlospuzzle“ zusammensetzen (siehe Abb. 5.2).

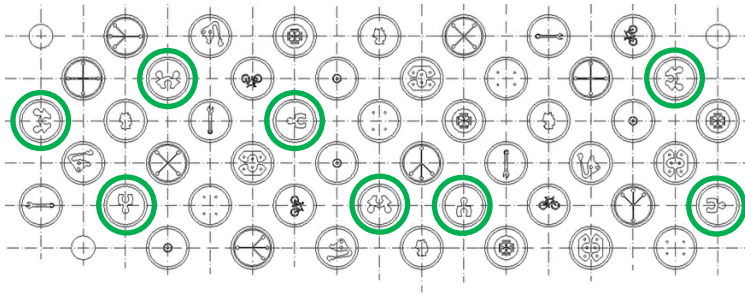


Abb. 4.10: Layout LIGA2.1 mit den in grün gekennzeichneten Strukturen, die für die Vermessung herangezogen wurden

Die Produktion der Bauteile wurde auf den MS 50-Maschinen (siehe Kapitel 3.8.1) unter der Verwendung von LIGA2.X Formeinsätzen hergestellt, wie in Kapitel 3.6 beschrieben. Die im Folgenden verwendete Bezeichnung der Puzzle-Verteilerstruktur lautet A1 bis A4 für den verwendeten Formeinsatz und S1 bis S3 für die Messstelle (Abb. 4.11a). Für das Puzzle-Verbindungsstück lautet die Bezeichnung A5 bis A8 für die Formeinsätze und die der beiden Messstellen S4 und S5 (Abb. 4.11b). Bei den Messstellen S1 bis S5 handelt es sich um den positiven und negativen Teil der kreisrunden Steckverbindungen an den beiden unterschiedlichen Puzzleteilen. An allen Messstellen werden der Ist-Wert der Durchmesser sowie die Formtoleranz messtechnisch erfasst.

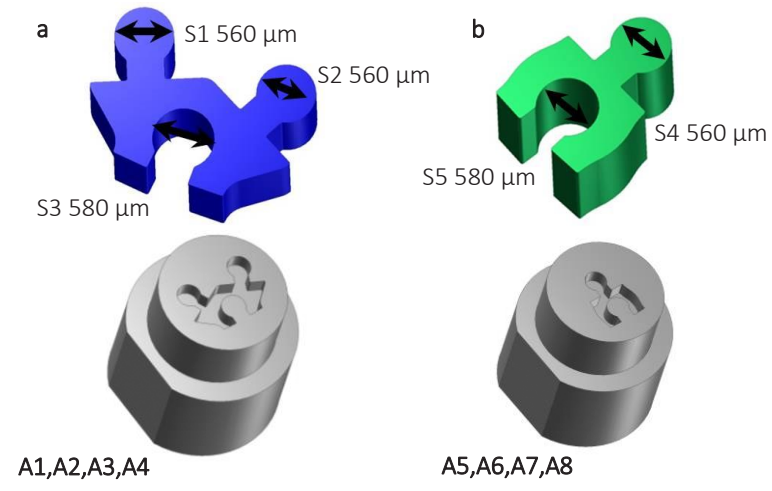


Abb. 4.11: CAD-Darstellung der beiden Puzzleteile und der dazugehörigen LIGA2.X Formeinsätzen. Kennzeichnung der Messstellen sowie deren im Bauteildesign festgelegter Sollwert: **a** Puzzle-Verteilerstück; **b** Puzzle-Verbindungsstück

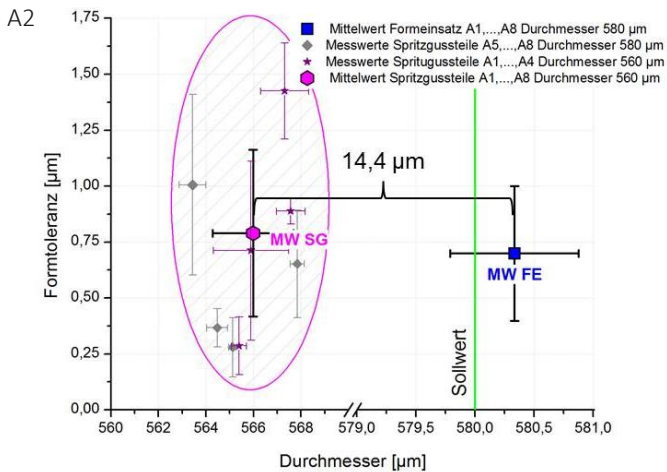
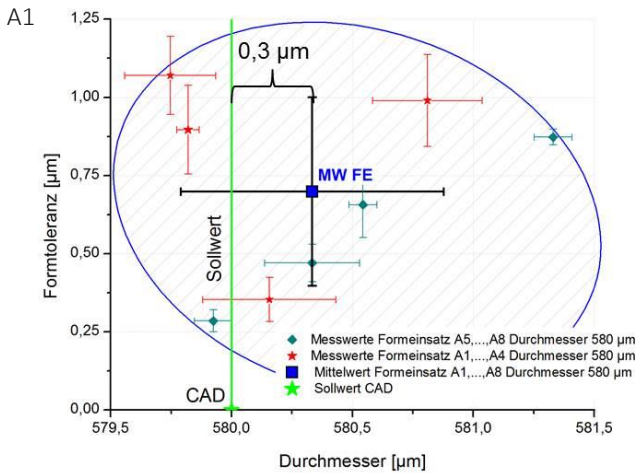
4.3.1 *Messtechnische Auswertung von spritzgegossenen Bauteilen und deren Kavitäten*

Auf der X-Achse der Ergebnisdiagramme in Abb. 4.12 ist der gemessene Ist-Wert des Durchmessers der jeweiligen Messstelle aufgetragen. Der dazugehörige Wert auf der Y-Achse der Diagramme zeigt die erfasste Formtoleranz.

In den Diagrammen Abb. 4.12A1 und Abb. 4.12B1 sind die Messwerte der acht Formeinsätze sowie deren Mittelwert gezeigt. Die Diagramme A2 und B2 (Abb. 4.12) zeigen die Zusammenfassung der Versuchsreihe der spritzgegossenen Bauteile, indem die berechneten Mittelwerte der Messwerte der jeweiligen Versuchsreihe aufgetragen sind. Eine Versuchsreihe für einen der acht Formeinsätze A1 bis A8 steht für 50 abgeformte Bauteile, von denen jedes zehnte messtechnisch charakterisiert wurde. Die Ergebnisse der Messstellen S3 und S5

(Sollwert gleich 580 μm) sind in den Diagrammen A1 und A2 aufgetragen, die Messstellen S1, S2 und S4 (Sollwert gleich 560 μm) sind in den beiden Diagrammen B1 und B2 gezeigt.

Messstellen mit **Sollwert 580 μm** der acht Formeinsätze (FE)/spritzgegossene Bauteile (SG)



Messstellen mit **Sollwert 560 µm** der acht Formeinsätze (FE)/spritzgegossene Bauteile (SG)

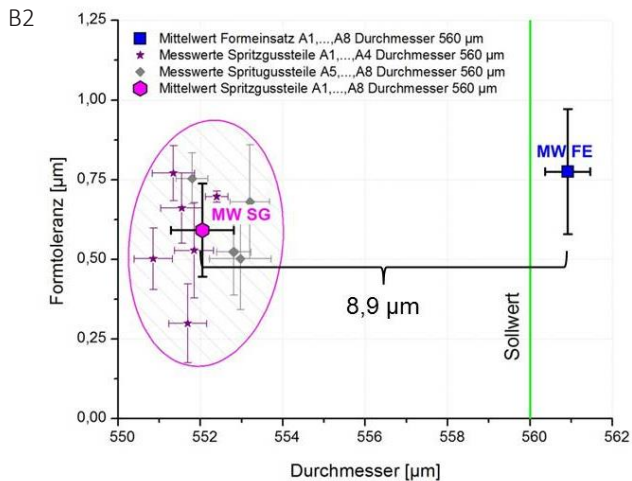
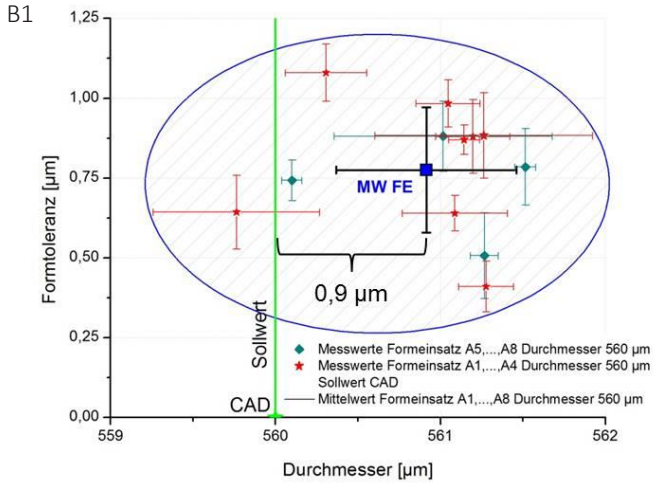


Abb. 4.12: Ergebnisdigramme der vermessenen Formeinsatzkavitäten (A1,B1) sowie der abgeformten Bauteile (A2,B2) für die beiden Durchmesser 580 µm und 560 µm

Die Messwerte der Formeinsatzstrukturen A1 bis A8 der Messstellen S3 und S5 (Sollwert 580 μm ; Säulenstruktur im Formeinsatz), in Diagramm Abb. 4.12A1, variieren in einem Bereich zwischen 579,8 μm (A3-S3) und 581,3 μm (A6-S5). Die Werte der Messstellen S1, S2 und S4 (Sollwert 560 μm ; Lochstruktur im Formeinsatz) variieren in einem Bereich zwischen 559,8 μm (A4-S1) und 561,5 μm (A8-S4). Die maximale Abweichung der ermittelten Werte zum Sollwert liegt bei +1,5 μm für den Formeinsatz A8 an der Messstelle S4.

Aus den erfassten Messwerten der acht Formeinsatzkavitäten lässt sich für die NISP-Fertigung schließen, dass bei kreisrunden Säulenstrukturen im Bauteil (Durchmesser 560 μm Sollwert) ein Vorhalt von etwa -1 μm und bei Lochstrukturen im Bauteil (Durchmesser 580 μm Sollwert) von etwa -0,25 μm bei einer Bauteildicke von 400 μm berücksichtigt werden muss (siehe Abb. 4.12).

Die in den Diagrammen A2 und B2 in Abb. 4.12 dargestellten Mittelwerte der acht Versuchsreihen von spritzgegossenen Bauteilen zeigt eine deutliche Abweichung ($\delta_{\text{Spritzgießen}}$) zu den am Formeinsatz gemessenen Werten. Diese Abweichung ist in der Regel gleichzusetzen mit der Abweichung resultierend aus der Schwindung ($\delta_{\text{Schwindung}}$) (siehe Gleichung {4.7}). Unter der Schwindung versteht man „die auf das Werkzeugmaß bezogene Differenz zwischen Formteilmaß und Kavitätsmaß“ [56].

$$\delta_{\text{Spritzgießen}} = \delta_{\text{Schwindung}} \quad \{4.7\}$$

Die wesentlichen Ursachen, resultierend aus der thermischen Schwindung ($\delta_{\text{Schwindung}}$), sind die Formmasseneigenschaften, wie zum Beispiel die thermische Kontraktion, das pvT-Verhalten, die Viskosität und die Temperaturleitfähigkeit. Darüber hinaus hat die Formteil- und Angussgeometrie einen Einfluss zum Beispiel über die Fließweglänge und zuletzt der Spritzgießprozess selbst mit den Faktoren Massestemperatur, Nachdruckhöhe und Zeit, Werkzeugwandtemperatur, Einspritzgeschwindigkeit und Formmassenaufbereitung (siehe Gleichung {4.8}); [56].

$$\delta_{\text{Schwindung}} = \delta_{\text{Formmasse}} + \delta_{\text{Geometrie}} + \delta_{\text{Prozess}} \quad \{4.8\}$$

Die für die Vermessung abgeformten Formteile wurden bei gleichen Prozessparametern (Grundparameter Kapitel 3.8.1), gleicher Angussgeometrie und Anschnittgröße sowie gleicher Formmasse (POM *Hostaform*[®] C9021; Fa. Ticona GmbH) durchgeführt. Somit wurden alle Faktoren, die auf die Abweichung $\delta_{\text{Schwindung}}$ beziehungsweise $\delta_{\text{Spritzgießen}}$ Einfluss haben soweit es möglich ist konstant gehalten. Maschinenbedingte Schwankungen, wie zum Beispiel in der Masseaufbereitung, den erreichten Ist-Werten der Einspritzdrücke oder Unterschiede in der Formmassenqualität sind nicht zu vermeiden und sorgen für eine Variation der Abweichungen δ_{Prozess} und $\delta_{\text{Formmasse}}$.

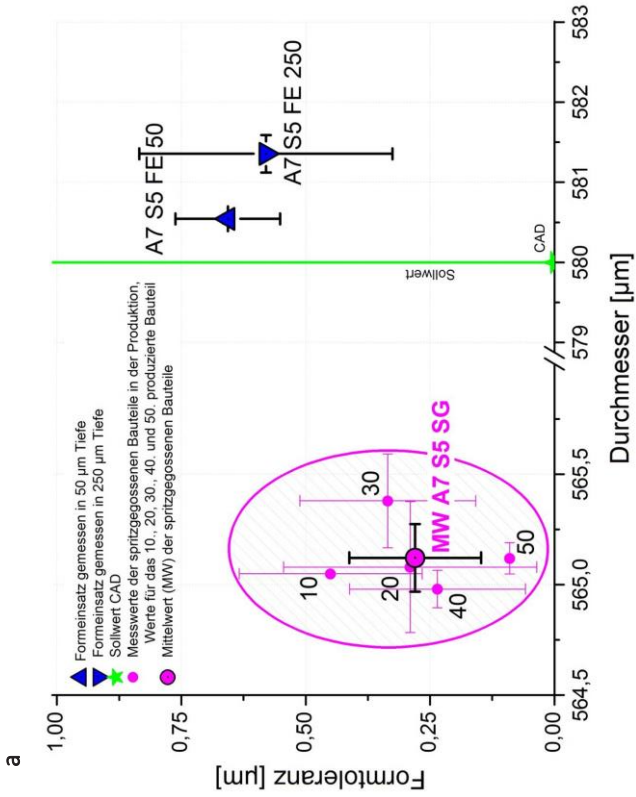
Die Mittelwerte der im Rahmen der acht Versuchsreihen mit jeweils einer der acht Formeinsätze A1 bis A8 abgeformten Bauteile liegen für S3 und S5 (Sollwert 580 μm ; Lochstruktur im Bauteil) zwischen 563,4 μm und 567,8 μm , der Mittelwert über alle vermessenen 580 μm Durchmesser liegt bei 565,9 μm (Abb. 4.12A2). Für die Messstellen S1, S2 und S4 (Sollwert 560 μm ; Säulenstruktur im Bauteil) liegt der Mittelwert zwischen 550,9 μm und 553,2 μm . Der Mittelwert über alle vermessenen, abgeformten Bauteile liegt bei 552,1 μm (Abb. 4.12 B2).

Auswertung der Versuchsreihen von abgeformten Bauteilen

In Abb. 4.13 sind am Beispiel zweier Messstellen (S5 und S1) die Messwerte aufgetragen, die innerhalb einer Versuchsreihe ermittelt wurden. Für den Formeinsatz A7 und A3 (Kontur: Puzzerverbindungsstück) wurden an zwei unterschiedlichen Tiefen (50 μm und 250 μm) des Formeinsatzes Messwerte aufgenommen. Die in Kapitel 4.2.1 beschriebene Konturabhängigkeit ist hier wiederzuerkennen. Die Säulenstruktur sowie die Lochstruktur wurden mit der Strukturtiefe größer. Wobei die Säulenstruktur S5, mit einem berechneten Winkel von 0,12°, eine positive Form für die Entformung der Bauteile bei der Replikation aufweist und die Lochstruktur eine negative, mit einem berechneten Winkel von 0,07°. Die Ergebnisse spiegeln die gleiche Tendenz wieder wie die in Kapitel 4.2.1 grob abgeschätzten Winkelabweichungen. Die Winkelabweichungen, beruhend auf dem gemess-

senen Wert, sind wesentlich geringer als die abgeschätzten. Dies liegt daran, dass zu der Abschätzung verschiedene Proben verwendet und deren Ergebnisse kombiniert wurden.

Es ist eine Tendenz zu erkennen, dass sich der gemessene Wert der Formtoleranz mit der Anzahl an abgeformten Bauteilen verringert. Jedoch wird dies nicht durch alle Messungen bestätigt. Die Vermutung liegt nahe, dass eventuelle Verschmutzungen oder minimalste Riefen (eventuell eingebracht durch Maskenfehler) der Formeinsätze durch die ersten Abformzyklen geglättet werden. Bei den Messwerten der Durchmesser kann keine Regelmäßigkeit in Abhängigkeit mit der Anzahl der abgeformten Bauteile ausgemacht werden (Abb. 4.13).



A7_S5_FE_50 / _250



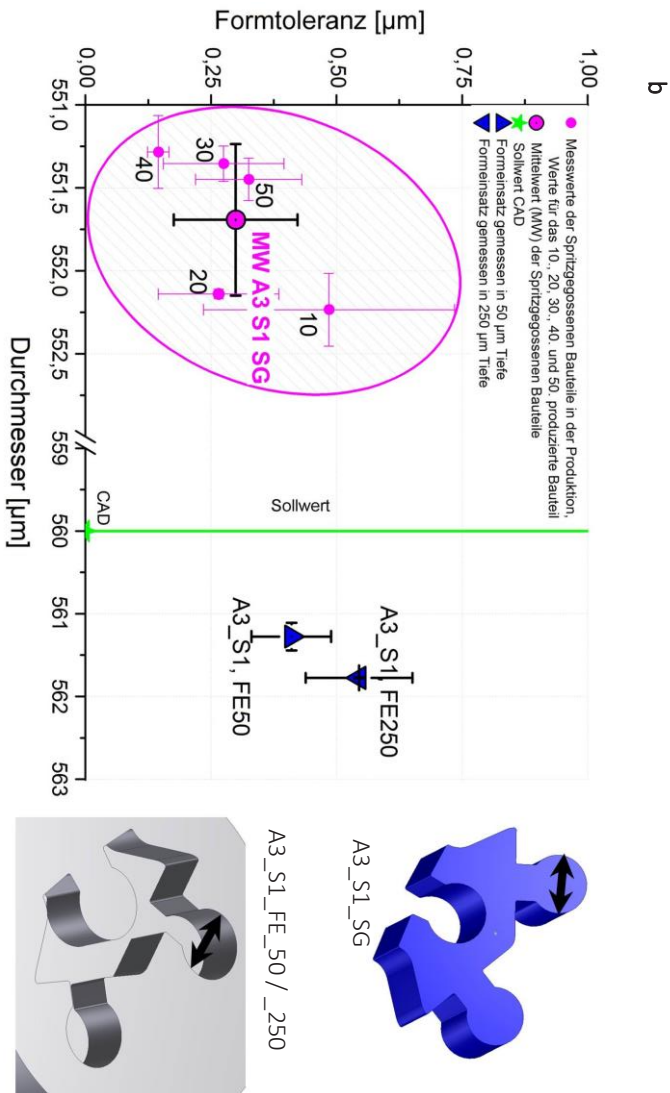


Abb. 4.13: Ergebnisdigramme der ermittelten Messwerte an den Formeinsätzen und Messstellen: a A7-S5; b A3-S1

4.3.2 Abweichungen der replizierten Bauteile von den jeweiligen Formeinsätzen

Die alleinige Betrachtung der Beträge der Abweichung $\delta_{\text{spritzguss}}$ („Differenz zwischen Formteilmaß und Kavitätsmaß“ [56]) aller Mittelwerte der Versuchsreihen von abgeformten Bauteilen zeigt, dass sich zwei Bereiche für die unterschiedlichen Durchmesser 580 μm und 560 μm ausbilden (siehe Abb. 4.14). Darüber hinaus ist die Streuung der Werte der Differenz der Formtoleranz sowie der Ist-Werte der Differenz der Durchmesser bei den Lochstrukturen mit 580 μm signifikant höher als bei den Säulenstrukturen mit 560 μm Durchmesser.

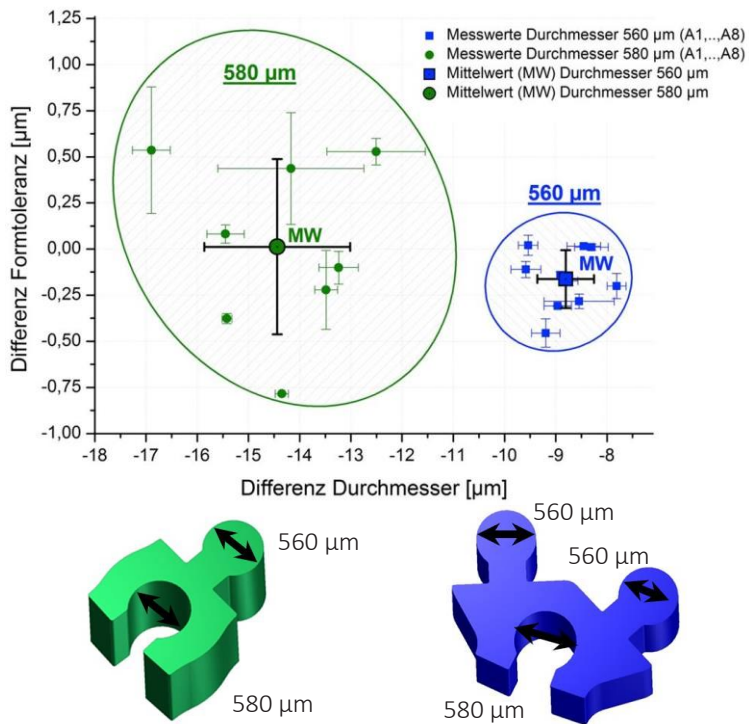


Abb. 4.14: Differenz der gemessenen Werte an den spritzgegossenen Bauteilen – den gemessenen Werten an den Formeinsatzstrukturen

Die größere Verteilung der Werte an den Messstellen mit Durchmesser 580 μm ($\delta_{\text{spritzguss}}$ zwischen -16,9 μm und -12,5 μm) ist begründet in der Kontur der Bauteile. Durch die nicht geschlossene Lochkontur des abgeformten Bauteils an den Messstellen (S3 und S5; Durchmesser 580 μm) kann sich diese durch den schwindungsbedingten Verzug (der Verzug resultiert aus anisotroper, konturgeometriebedingter Schwindung und den dadurch induzierten inneren Spannungen) „verformen“.

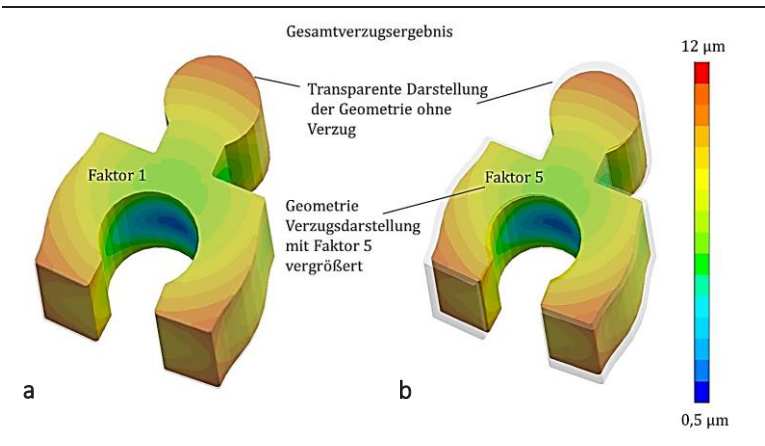


Abb. 4.15: Gesamtverzug resultierend aus dem Spritzgießprozess POM *Hostaform*[®] C9021 (verwendete Software *Sigmasoft*[®]); Puzzerverbindungsstück: **a** Gesamtverzugsresultat; **b** Gesamtverzugsresultat mit Multiplikationsfaktor 5

Die Schwindung liegt für den Mittelwert der gemessenen Messstellen mit Durchmesser 580 μm bei 2,4 %. Die dadurch veränderte unbestimmte Geometrie der Lochstruktur führt zu unterschiedlichen Durchmesser- und Formtoleranzwerten (Abb. 4.14). Für die gemessenen Durchmesser an den Messstellen S1, S2 und S4 mit 560 μm der Säulenstrukturen hingegen, liegen mit der geschlossenen Kreiskontur wesentlich homogenere Schwindungsbedingungen vor. Diese äußern sich in einer engen Verteilung der Werte der Formtoleranz sowie der

Abweichung $\delta_{\text{Spritzguss}}$. Die erfassten Werte von $\delta_{\text{Spritzguss}}$ liegen zwischen $-9,5 \mu\text{m}$ und $-7,8 \mu\text{m}$ (siehe Abb. 4.14). Die Schwindung liegt für den Mittelwert der gemessenen Messstellen mit Durchmesser $560 \mu\text{m}$ bei $1,6 \%$. Die ermittelten Messwerte sind samt der Abweichung $\delta_{\text{Spritzguss}}$ in Tabelle 4.4 zusammengefasst. Die im Datenblatt der verwendeten Formmasse POM *Hostaform*[®] *C9021* angegebene Schwindung liegt bei $1,8 \%$. In Abb. 4.15 sind die Gesamtverzugsergebnisse der Spritzgießsimulation des Puzzle-Verbindungsstücks gezeigt. Das dargestellte Simulationsergebnis bestätigt die in Abb. 4.12 und in Abb. 4.14 gezeigten Messwerte. Das Simulationsergebnis Gesamtverzug des Puzzle-Verteilerstücks ist im Anhang A.5 dargestellt.

Die Abweichungen innerhalb des Spritzgießprozesses sind stark abhängig von der Bauteilgeometrie. Der Mittelwerte aller gemessenen Säulenstrukturen (Sollwert $560 \mu\text{m}$) liegt bei $\delta_{\text{Spritzgiesen}} = 8,8 \mu\text{m}$ und weicht damit um $5,6 \mu\text{m}$ von dem der Lochstrukturen (Sollwert $580 \mu\text{m}$) ab. Die im makroskopischen verwendeten Lösungen, wie zum Beispiel die Verwendung von Versteifungs- beziehungsweise Verstärkungsstrukturen an Bauteilbereichen oder die Erhöhung der Wandstärken, führen zu einer Verringerung des Bauteilverzuges [113]. Diese etablierten Möglichkeiten können jedoch an Mikrobauteilen nicht angewandt werden. Änderungen an der Kavität, welche nach der Erstabmusterung im Regelfall an mechanisch gefertigten Kavitäten zur Verbesserung der Maßhaltigkeit durchgeführt werden, sind an LIGA-Strukturen ebenfalls nicht möglich. Somit bleiben als Einflussfaktoren auf die Schwindung die Formmasse und der Spritzgießprozess selbst. Änderungen an der Formmasse sind in Kleinserien, bei kommerziell hergestelltem Kunststoffgranulat, fast nicht zu realisieren, da die Hersteller bei Kleinstmengen keine Änderungen in ihren Formmassenzusammenstellungen durchführen. Daraus folgt, dass nur die Optimierung der Prozessparameter, die in Kapitel 5.2 anhand der Zielgröße der Bauteilmasse der abgeformten Bauteile durchgeführt wird, möglich ist.

Tabelle 4.4: Messwerte und deren Abweichung der spritzgegossenen Bauteile zum jeweiligen Formeinsatz an den verschiedenen Messstellen der beiden Puzzleteile

Struktur ID	Sollwert	Formeinsatz [µm]	Formeinsatz Formtoleranz [µm]	Mittelwert Spritzguss- Bauteile [µm]	Formtoleranz [µm]	Abweichung Formeinsatz und Spritzguss- Bauteil [µm]	Prozentuale Abweichung zum Formeinsatz in [%]
A2 S1	560	561,0	1,0	551,9	0,5	-9,2	-1,6
A2 S2	560	561,1	0,9	552,4	0,7	-8,8	-1,7
A3 S1	560	561,3	0,4	551,8	0,3	-9,6	-1,7
A3 S2	560	561,1	0,6	551,5	0,7	-9,5	-1,7
A4 S1	560	559,8	0,6	550,9	0,5	-8,9	-1,6
A4 S2	560	560,3	1,1	551,3	0,8	-9,0	-1,6
A5 S4	560	561,3	0,5	552,8	0,5	-8,5	-1,5
A6 S4	560	560,1	0,7	551,8	0,8	-8,3	-1,5
A7 S4	560	561,0	0,9	553,2	0,7	-7,8	-1,4
A8 S4	560	561,5	0,8	553,0	0,5	-8,6	-1,5
A1 S3	580	579,8	0,9	567,3	1,4	-12,5	-2,2
A2 S3	580	579,8	1,1	565,4	0,3	-14,4	-2,5
A3 S3	580	580,2	0,4	566,0	0,8	-14,2	-2,4
A4 S3	580	580,8	1,0	567,6	0,9	-13,2	-2,3
A5 S5	580	580,3	0,5	563,4	1,0	-16,9	-2,9
A6 S5	580	581,3	0,9	567,8	0,7	-13,5	-2,3
A7 S5	580	580,5	0,7	565,1	0,3	-15,4	-2,7
A8 S5	580	579,9	0,3	564,5	0,4	-15,5	-2,7

4.4 Zusammenfassung der Prozesskontrolle in der LIGA2.X-Mikrobauteilfertigung

Durch die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen an den Röntgenmasken, Nickelstrukturplatten und Direkt-LIGA-Bauteilen konnte gezeigt werden, dass die Abweichungen bei gleicher Strukturtiefe stark von der lateralen Bauteilkontur abhängen. Die nachgewiesene Konturabhängigkeit macht eine Einführung eines einheitlichen Maßvorhaltes in der Designphase von Bauteilen für die LIGA-Strukturfertigung unmöglich. Um im Bauteildesign Vorhalte zur Verbesserung der Maßhaltigkeit einführen zu können, müssen spezielle Testlayouts für unterschiedliche Konturen erstellt werden und in unterschiedlichen Höhen realisiert und charakterisiert werden.

Aus den hier erlangten Erkenntnissen für kreisrunde Strukturen mit 400 µm Höhe können die in Tabelle 4.5 aufgelisteten Maßvorhalte für das Bauteildesign von LIGA-Strukturen abgeleitet werden. Die Werte der Maßvorhalte sind unter Vorbehalt zu verstehen, da deren Validierung in der Praxis noch aussteht.

Die Ergebnisse der Auswertung der erfassten Messwerte der Formeinsatzkavitäten und der spritzgegossenen Bauteile haben gezeigt, dass die Schwindung (maßliche Abweichung der spritzgegossenen Bauteile von deren Kavität) bei den untersuchten Strukturen geometrieabhängig ist. Üblicherweise wird in der Replikation die Schwindung durch die vom Hersteller angegebenen Werte als Aufmaßfaktor in der Bauteil- beziehungsweise in der Formeinsatzkonstruktion berücksichtigt und später nach der Erstabmusterung die Kavität so nachbearbeitet, dass alle Spezifikationen erfüllt werden können. Diese Methode kann bei der LIGA2.X-Fertigung nicht angewandt werden, da eine Nacharbeit der LIGA-Kavitäten nicht möglich ist. Die alleinige Berücksichtigung der vom Hersteller angegebenen thermischen Schwindung führt zu einer Verbesserung, jedoch nicht zum gewünschten Ergebnis. Vielmehr müssen bei diesem neu entwickelten Verfahren alle im LIGA2.X-Prozess auftretenden Abweichungen auf Grundlage der bis

jetzt gesammelten Werte abhängig von der Bauteilgeometrie abgeschätzt und als Aufmaß (siehe Gleichung {4.9}) berücksichtigt werden.

$$\text{Aufmaß}_{LIGA2.X} = \delta_{\text{Spritzgießen}} + \delta_{NISP} \quad \{4.9\}$$

Derzeit ist es nur möglich, für die in dieser Arbeit untersuchten kreisrunden Strukturen mit 400 μm Höhe und den untersuchten Durchmessern (560 μm und 580 μm) ein Aufmaßfaktor auf Grundlage von Erfahrungswerten abzuschätzen. In Gleichung {4.10} ist ein Beispiel für eine 400 μm hohe Säulenstruktur mit Durchmesser 560 μm gegeben.

$$\begin{aligned} \text{Aufmaßfaktor} & \text{ Säule } \varnothing 560 \mu\text{m}; 400 \mu\text{m Höhe} [\%] & \{4.10\} \\ & = \frac{\text{Aufmaß}_{LIGA2.X} [\mu\text{m}] * 100\%}{\text{Sollwert} [\mu\text{m}]} \\ & = \frac{(8,9 \mu\text{m} - 0,9 \mu\text{m}) * 100\%}{560 \mu\text{m}} = 1,4\% \end{aligned}$$

Für die Einführung einer Konstruktionshilfe für LIGA-Strukturen müssen viele Messdaten von unterschiedlichen Geometrien in unterschiedlichen Dimensionen und Höhen gesammelt und ausgewertet werden. Alle erfassten Daten müssen in eine Datenbank abgelegt werden und als Grundlage eines 3D-CAD Zusatzprogrammes dienen. Eine solche Datenbank erfordert Unmengen an Versuchen und Charakterisierungen. Die schnelle Verwirklichung dieser Vision ist daher nicht realisierbar. Es ist nicht möglich einen einheitlichen Vorhalt (Aufmaßfaktor) für alle Strukturen und Höhen zu verwenden.

Tabelle 4.5: Maßvorhalte für Kreisstrukturen innerhalb der NISP-Fertigung und Mikrobauteil-Herstellung (POM); Werte basierend auf den in der vorliegenden Arbeit erlangten Erkenntnissen

Bauteilstruktur	Solldurchmesser [μm]	Maßvorhalt [μm] für die NISP- Herstellung	Maßvorhalt [μm] für die Mikrobauteil- Herstellung (POM)
Kreisstruktur	580 \pm 10	-0,3	14,1
Kreisstruktur	560 \pm 10	-0,9	8

5 Prozessoptimierung des LIGA2.X-Prozesses anhand geeigneter Demonstratoren

Im folgenden Kapitel werden die durchgeführten Arbeiten in Bezug auf die Prozessoptimierung des neu entwickelten LIGA2.X-Prozesses vorgestellt.

5.1 Statistische Versuchsplanung (DoE)

Die statische Versuchsplanung (DoE) ist ein weitverbreitetes und etabliertes Mittel für die Optimierung von Prozessen in der Naturwissenschaft. Es werden dabei verschiedene Methoden, wie in [114] beschrieben, angewandt. In der vorliegenden Arbeit wurden für die Optimierung der Prozessparameter die wichtigsten Einflussgrößen auf das Ergebnis ausgewählt und ein zweistufiger, vollfaktorieller Versuchsplan (2^k -Faktorversuchsplan) mit Hilfe der kommerziellen Software *XSeI*[®] 12.1 aufgestellt [115]. Diese Versuchspläne beziehen „k“ Versuchsparameter auf „m“ Stufen in die Versuchsplanung ein [114]. Die Anzahl der Versuche „n“ berechnet sich über Gleichung {5.1} wie folgt:

$$n = m^k \quad \{5.1\}$$

Bei einem Versuchsplan mit drei Versuchsparametern auf zwei Stufen berechnet sich die Anzahl der Versuche zu acht. Zu dieser Versuchszahl werden drei Zentralwertversuche addiert, die willkürlich im Versuchsplan verteilt werden (siehe Abb. 5.1). Diese Zentralwertversuche haben große Bedeutung bei Versuchsplänen mit zwei Stufen und dienen zur Überprüfung der Linearität der Einflussfaktoren. Die

Gesamtzahl der Versuche erhöht sich damit auf elf. Die Erstellung der Reihenfolge der Versuche wird in einer sogenannten Planmatrix erstellt. Nach der Durchführung der Einzelversuche mit Hilfe der Planmatrix wird die Zielgröße mit einer geeigneten Messmethode quantitativ erfasst und in die Antwortmatrix übertragen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse können die Einflussdiagramme erstellt und auf die Zusammenhänge von Zielgröße und Einflussfaktoren geschlossen werden.

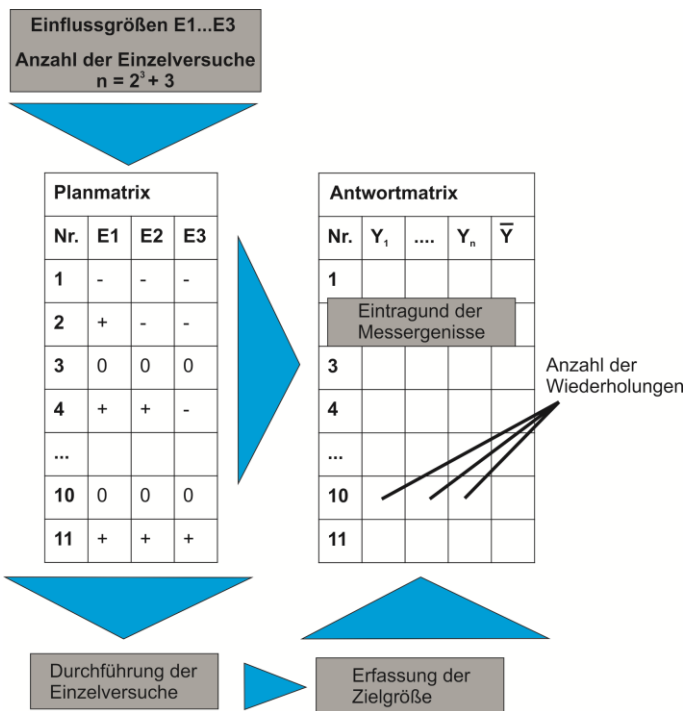
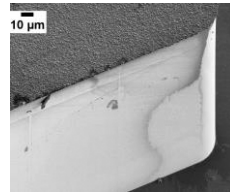
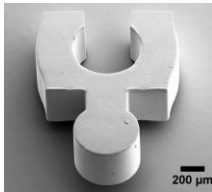
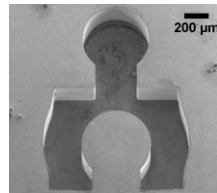
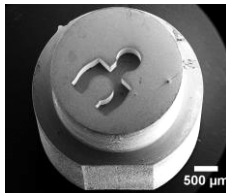


Abb. 5.1: Planmatrix und Antwortmatrix eines 2^3 -Versuchsplanes addiert mit drei Zentralpunktversuchen

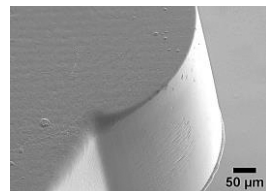
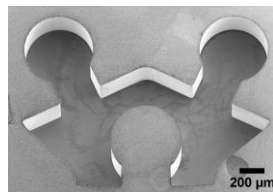
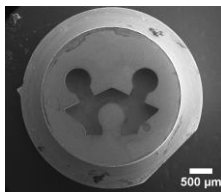
5.2 Optimierung der Spritzgießparameter am Beispiel des LIGA2.X-Endlospuzzles

Für das auf dem LIGA2.1-Layout befindlichen Endlospuzzle, bestehend aus zwei Teilen, dem Verteilerstück und dem Verbindungsstück, wurde die Reproduzierbarkeit des Prozesses validiert. In Kapitel 4.3 wurden die maßlichen Abweichungen der Abformteile dargestellt und diskutiert. Hier soll auf die Parameteroptimierung der Abformung mit Hilfe der MS 50-2K eingegangen werden.

Puzzle-Verteilerstück



Puzzle-Verbindungsstück



Zusammenbau

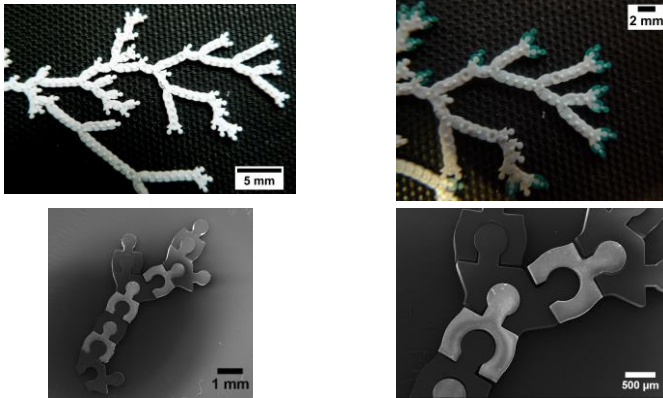


Abb. 5.2: REM- und Fotoaufnahmen der Endlospuzzleteile (Formeinsätze und Formteile, Layout LIGA2.1)

Ausgehend von den empirisch über „trial and error“ bestimmten Grundparametern zur Replikation von LIGA2.X-Bauteilen (siehe Kapitel 3.8.1) sollen im Folgenden die optimalen Spritzgießparameter bestimmt werden. Hierzu wurde am Beispiel der beiden Endlospuzzleteile über die Methode der statistischen Versuchsplanung (DoE) ein Versuchsplan aufgestellt und abgearbeitet. Die Masse der abgeformten Bauteile diene als Zielgröße der DoE, da diese in einem vertretbaren Zeitrahmen erfasst werden kann und gute Rückschlüsse auf die Bauteilqualität zulässt. In Abb. 5.2 sind ausgewählte REM- und Fotoaufnahmen, der für die Optimierung der Prozessparameter verwendeten LIGA2.X-Formeinsätze und den damit hergestellten Bauteilen gezeigt.

5.2.1 Bestimmung der Einflussgrößen (Mikrospritzgießen)

Die Erfahrungen in der Abformung von LIGA2.X-Bauteilen haben gezeigt, dass kleinste Änderungen des Dosiervolumens⁹ zu einer unvollständigen oder keiner Formfüllung führen oder das Bauteil nicht mehr entformbar ist. Im zweiten Fall ist es notwendig den Formeinsatz aus dem Werkzeug auszubauen und zu reinigen. Im Rahmen der DoE ist es nicht sinnvoll die Variation des Dosiervolumens in den Versuchsplan aufzunehmen, da bei keiner Formfüllung und bei Nichtentformbarkeit des Bauteiles die Zielgröße nicht bestimmt werden kann. Es wurde daher in Vorversuchen entschieden das optimale Dosiervolumen bei sonst konstanten Bedingungen zu bestimmen und nicht als Parameter in die DoE aufzunehmen.

Ein wichtiger Einstellparameter ist die Einspritzgeschwindigkeit (V_E) der Formmasse. Unter der Einspritzgeschwindigkeit versteht man die Geschwindigkeit des Einspritzkolbens beim Einspritzen der Formmasse.

Die Werkzeugtemperatur (T_W) ist eine weitere entscheidende Größe, die Einfluss auf das Ergebnis nimmt. In der vorliegenden Arbeit wurde die gemessene Rücklauftemperatur des Temperiermediums (Wasser), das zum Temperieren durch das Werkzeug fließt, am extern angeschlossenen Temperiergerät als Näherung der Werkzeugtemperatur angenommen.

Die Geschwindigkeit der Werkzeugöffnungsbewegung (V_W) hat speziell in der LIGA2.X-Abformung auf die Entformbarkeit und die Qualität der Anguss/Bauteiltrennung einen hohen Einfluss und ist als wichtiger Einflussparameter zu betrachten. Damit sind die wichtigsten Einflussparameter für die LIGA2.X-Abformung genannt.

In der Herstellung von makroskopischen Spritzgussbauteilen sind der Umschaltzeitpunkt sowie die Nachdruckhöhe und Nachdruckzeit als

⁹ Unter Dosiervolumen wird die Menge an Formmasse verstanden, die für einen Spritzgießzyklus aufdosiert wird.

weitere wichtige Parameter zu variieren. In der Herstellung von LIGA2.X-Mikrobauteilen mit Bauteilgewicht < 1 mg und isothermer Prozessführung kann die Nachdruckzeit und Geschwindigkeit als nicht signifikant angenommen werden. Der Grund hierfür ist das schnelle Erstarren der Masse bei kleinen Strukturen in den LIGA2.X-Formeinsatzkavitäten und einer „kalten“ Werkzeugwand, die an der Abformung beteiligt ist. Weitere Einflussparameter sind die Formmasstemperatur, Dosiergeschwindigkeiten und der Staudruck, die in der vorliegenden Arbeit konstant bei den Vorgaben des Materialherstellers gehalten werden.

Hieraus ergaben sich die Einflussfaktoren, die in den Versuchsplan aufgenommen wurden:

- E1 Einspritzgeschwindigkeit (V_E)
- E2 Werkzeugtemperatur (T_W)
- E3 Werkzeugöffnungsgeschwindigkeit (V_W)

Bestimmung der Prozessgrößen

Für beide Puzzleteile wurde das optimale Dosiervolumen über die Variation der aufdosierten Masse bei sonst konstant gehaltenen Parametern (Zentralpunktversuch) durchgeführt. Das Ergebnis ist ein Dosiervolumen von 295 mm^3 . Für die beiden Versuchsdurchführungen wurde jeweils ein Formeinsatz mit der entsprechenden Puzzlestruktur eingebaut. In die drei freien Plätze der Formeinsatzhalterplatte wurden Dummy-Formeinsätze ohne Kavität eingebaut.

Für jeden in den Versuchsplan aufgenommenen Parameter muss ein oberer und unterer Wert (Faktorstufe) ausgewählt werden. Der untere Wert wird mit „-1“ gekennzeichnet und der obere Wert mit „+1“. Die im Zentralpunktversuch verwendeten Faktorstufen werden im Folgenden mit „0“ gekennzeichnet.

Die in der Durchführung des Versuchsplans verwendeten Werte der Prozessgrößen zum Mikrospritzgießen, an der 2K-MS 50 unter der Verwendung der Formmasse POM (Ticona *Hostaform C9021*), wurden

ausgehend von den Grundparametern für die Abformungen (siehe Kapitel 3.8.1) wie folgt bestimmt:

E1: Einspritzgeschwindigkeit V_E

Die Einspritzgeschwindigkeit soll hoch gewählt werden, um schnell viel Formmasse in die Kavität zu schieben. Jedoch gibt es hier Grenzen. Eine ist das Entstehen von sogenannten „Schwimmhäuten“, die sich als Defekt beziehungsweise Grat am Bauteil zeigen. Solche Überspritzungen sind, trotz maximal eingestellter Schließkraft bei Abformungen von LIGA2.X-Bauteilen auf der MS 50 bei Einspritzgeschwindigkeiten > 250 mm/s aufgetreten. Die maximal gewählte Einspritzgeschwindigkeit wurde somit auf 200 mm/s festgelegt. Tabelle 5.1 zeigt zusammenfassend, die Parameter der Faktorstufe E1.

Tabelle 5.1: Parameter der Faktorstufen des Einflussfaktors E1 (Einspritzgeschwindigkeit V_E)

E1	-1	100 [mm/s]
E1	0	150 [mm/s]
E1	+1	200 [mm/s]

E2: Werkzeugtemperatur T_w

In Vorversuchen hat sich herausgestellt, dass die verschiedenen Mikrospritzgießsysteme in Kombination mit den dazugehörigen Werkzeugen sehr unterschiedliche Werkzeugtemperaturen benötigen. Bei der MS 50 hat sich gezeigt, dass eine Werkzeugtemperatur von größer 80 °C keine Entformung der Bauteile zulässt. Bei Werkzeugtemperaturen von 50 °C bis 70 °C wurde festgestellt, dass keine zuverlässige Bauteilproduktion bei Abformungen mit LIGA2.X-Formeinsätzen möglich ist. Der obere Wert der Werkzeugtemperatur wurde somit zu 40 °C definiert. Tabelle 5.2 zeigt zusammenfassend die Parameter der Faktorstufe E2.

Tabelle 5.2: Parameter der Faktorstufen des Einflussfaktors E2 (Werkzeugtemperatur T_w)

E2	-1	20 [°C]
E2	0	30 [°C]
E2	+1	40 [°C]

E3: Werkzeugöffnungsgeschwindigkeit V_w

Die Werkzeugöffnungsgeschwindigkeit sollte bei Abformungen der im LIGA2.X-Verfahren entwickelten Werkzeugtechnik so gering wie möglich gewählt werden. Das Entformen durch ein homogenes konstantes Ziehen am Anguss sollte so schonend wie möglich geschehen, um ein vorzeitiges Abreisen des Angusses vom Bauteil zu verhindern. Reißt der Anguss zu früh ab, zum Beispiel bevor das Bauteil überhaupt aus seiner Kavität herausgezogen wird, ist die Entformung der Bauteile nicht mehr möglich. Der untere Wert im Versuchsplan wurde mit 0,1 mm/s gewählt, was dem Minimum entspricht, das die Maschine zulässt. Tabelle 5.3 zeigt zusammenfassend die Parameter der Faktorstufe E3.

Tabelle 5.3: Parameter der Faktorstufen des Einflussfaktors E3 (Werkzeugöffnungsgeschwindigkeit W_v)

E3	-1	0,1 [mm/s]
E3	0	0,2 [mm/s]
E3	+1	0,3 [mm/s]

Zusammenfassend sind für alle drei Einflussgrößen die Parametereinstellungen in Tabelle 5.4 aufgelistet.

Tabelle 5.4: Zielgröße und Einflussgrößen und deren Parameter in den unterschiedlichen Faktorstufen

Parameter	Unterer Wert	Zentralpunkt	Oberer Wert	Einheit
E1: Einspritzgeschwindigkeit (V_E)	100	150	200	[mm/s]
E2: Werkzeugtemperatur (T_W)	20	30	40	[°C]
E3: Werkzeugöffnungs- geschwindigkeit (V_W)	0,1	0,2	0,3	[mm/s]
Zielgröße: Bauteilmasse (m)				[mg]

5.2.2 *Ergebnisse der statistischen Versuchsplanung (Mikrospritzgießen)*

Die Prozessparameter wurden in die Software *XSel*[®] 12.1 der Fa. CRGRAPH [115] eingepflegt. Unter Verwendung der eingelesenen Parameter schlägt das Programm einen Versuchsplan vor.

Zur Erfassung der Zielgröße wurde eine Semimikrowaage (*BP 211 D*) der Fa. Sartorius, stehend auf einem schwingungsarmen Messtisch, verwendet. Im Wägebereich < 80 g verfügt die Waage über ein Auflösungsvermögen von 0,01 mg, mit einer Reproduzierbarkeit von $\leq \pm 0,02$ mg [116].

Die Auswertung der Ergebnisse ergab, dass der Prozess, in den im Versuchsplan gewählten Grenzen reproduzierbar und stabil für die Massenproduktion geeignet ist. An allen im Versuchsplan abgeformten Bauteilen (220 Stück) wurden mittels optischer Kontrolle keine Defekte festgestellt. Das heißt, die Änderung der Bauteilmasse (der abgeformten Bauteile) wurde nicht durch Überspritzungen verursacht. Die Unterschiede der Masse über alle Variationen des Versuchsplans

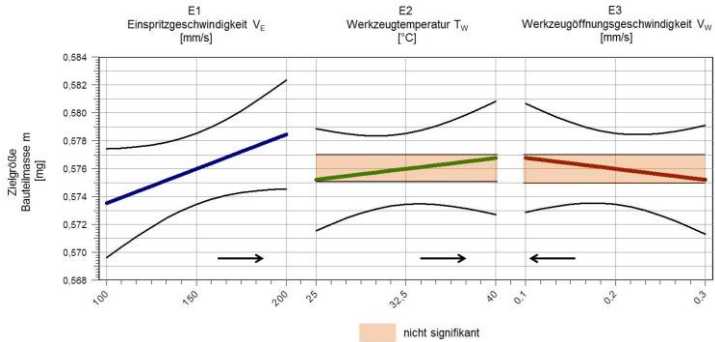
lagen für das Puzzle-Verteilerstück bei $0,06 \text{ mg} \pm 0,02 \text{ mg}$ und die des Puzzle-Verbindungsstücks bei $0,04 \text{ mg} \pm 0,02 \text{ mg}$. Trotz dieser geringen Varianz der Zielgröße, wurden eindeutige Tendenzen für die Abformung von LIGA2.X-Mikrobauteilen auf der MS 50 festgestellt. Der höchste Wert, der an einem Puzzle-Verbindungsstück gemessen wurde liegt bei $0,59 \text{ mg} \pm 0,02 \text{ mg}$ der höchste Messwert der Puzzle-Verteilerstücke liegt bei $0,98 \text{ mg} \pm 0,02 \text{ mg}$. Im Vergleich hierzu wiegt ein Granulat Korn des verwendeten Materials $29 \text{ mg} \pm 1,5 \text{ mg}$.

Das Ergebnis der statistischen Versuchsplanung für die beiden Puzzle-teile wird anhand zweier Einflussdiagramme (erstellt mit *XSeI*[®] 12.1 [115]) diskutiert. Auf der y-Achse der Einflussdiagramme ist die Masse (Zielgröße der DoE) und auf der x-Achse sind die drei Einflussfaktoren Einspritzgeschwindigkeit, Werkzeugtemperatur sowie Werkzeugöffnungs geschwindigkeit aufgetragen (siehe Abb. 5.3). Der Verlauf der jeweiligen Geraden der unterschiedlichen Einflussfaktoren gibt an, wie stark sich diese auf die Zielgröße auswirken. Bei Geraden mit positiver Steigung wirkt sich eine Erhöhung der jeweiligen Einflussgröße positiv auf die Zielgröße aus (in diesem Fall eine Erhöhung der Bauteilmasse). Bei negativer Steigung verhält es sich genau entgegengesetzt. Die Auswirkung auf die Zielgröße ist negativ. Der Streubereich der einzelnen Einflussgrößen E1 bis E3 wird jeweils mit Hilfe zweier Kurven dargestellt. Je enger diese Kurven die Gerade einschließen, desto genauer kann eine Aussage bezüglich dieses Einflussfaktors getroffen werden.

Für beide Puzzle-teile wirkt sich eine Erhöhung der Einspritzgeschwindigkeit V_E positiv auf die Bauteilmasse aus. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine schnellere Bewegung des Einspritzkolbens mehr Formmasse in die Kavität transportiert, bevor die Formmasse einfriert und das Nachschieben der Formmasse verhindert wird. Die beiden anderen Einflussfaktoren sind bei beiden Puzzle-teilen nicht signifikant. Der Streubereich um die Geraden ist so groß, dass egal ob diese eine negative oder positive Steigung hat, die Kurven, die den Streubereich begrenzen, nicht geschnitten werden. Die in den Einflussdiagrammen

dargestellten Tendenzen der Einflussfaktoren Werkzeugtemperatur und Werkzeugöffnungsgeschwindigkeit sind jedoch für beide Puzzle-teile gleich (siehe Abb. 5.3).

Einflussdiagramm Puzzle-Verbindungsstück



Einflussdiagramm Puzzle-Verteilerstück

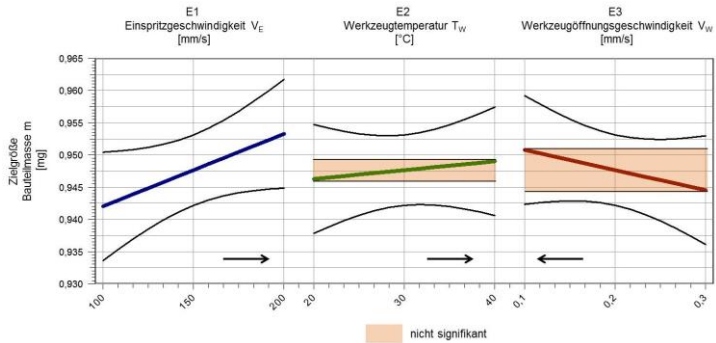


Abb. 5.3: Darstellung der Ergebnisse der DOE mit Hilfe von Einflussdiagrammen

Daraus kann geschlossen werden:

- Eine Erhöhung der Werkzeugwandtemperatur kann einen positiven Einfluss auf die Bauteilmasse haben. Die wärmere Werkzeugwand erhöht die Fließfähigkeit der Formmasse und lässt dadurch eine marginal bessere Füllung der Kavität zu.
- Das langsame Auffahren des Werkzeuges kann zu einer geringeren Belastung des Angusses während der Entformung durch die Werkzeugöffnungsbewegung führen. Dadurch liegt die Vermutung nahe, dass eine geringere Menge Formmasse aus dem eigentlichen Formteil „herausgerissen“ wird und eine langsame Werkzeugauffahrtgeschwindigkeit in einer höheren Bauteilmasse resultiert. Jedoch müssen für die Bestätigung dieser Annahme weitere Untersuchungen im Rahmen einer DoE mit den Zielgrößen Höhe und Durchmesser des Angussrestes am Bauteil durchgeführt werden (siehe Abb. 5.3).

Die Durchführung und Auswertung der Versuchspläne hat gezeigt, dass der in der vorliegenden Arbeit entwickelte LIGA2.X-Prozess ein Prozessfenster bietet, das eine Optimierung bezüglich der Bauteilqualität zulässt. Die verschiedenen Strukturen können ausgehend von den in Kapitel 3.8.1 gefundenen Grundeinstellungen optimiert und reproduzierbar in einer Massenproduktion hergestellt werden. Speziell für die hier untersuchten Endlospuzzleteile hat die Durchführung der DoE gezeigt, dass eine hohe Einspritzgeschwindigkeit zu einem höheren Bauteilgewicht und somit besserer Formfüllung führt. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass für beide Puzzleteile, trotz unterschiedlichen Volumens, die gleichen Parameter zu optimalen Ergebnissen geführt haben. Dies bestätigt die in Kapitel 3.8.1 gewonnene Erkenntnis, dass für verschiedene LIGA2.X-Strukturen dieselben Parameter zur Abformung verwendet werden können. Die Verwendung von verschiedenen Formeinsatzkavitäten gleichzeitig in Mehrkavitätenwerkzeugen zeigt einen robusten Prozess und erhöht damit die Flexibilität des LIGA2.X-Prozesses.

5.3 Laterale Designfreiheit in der Konstruktion von LIGA2.X-Bauteilen

Ein Alleinstellungsmerkmal der LIGA-Technik ist die laterale Designfreiheit in x- und y-Richtung mit hohem Aspektverhältnis. Im folgenden Kapitel wird diese überragende Prozesseigenschaft genutzt und anhand von Demonstratorbauteilen aufgezeigt.

Der Produktdesigner kann in den lateralen Dimensionen seiner Kreativität freien Lauf lassen und muss nahezu keine einschränkenden Randbedingungen in Bezug auf das Bauteildesign, wie zum Beispiel die große Kantenverrundung, die beim μ -Fräsen durch den verwendeten Schaftfräser vorgegeben wird, in Kauf nehmen. Darüber hinaus lässt die LIGA-Technik komplexe Formen für außergewöhnliche technische Lösungen von Ingenieuren oder Forschern zu, die teilweise erst die Realisierung von Produkten erlaubt.

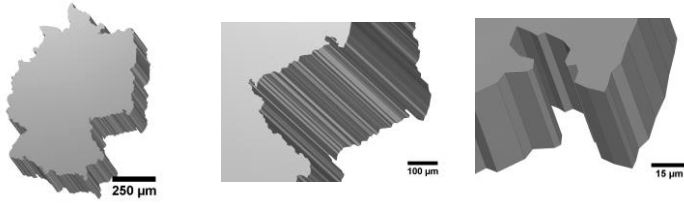
In der vorliegenden Arbeit wurden Demonstratorbauteile erzeugt, die ohne die Eigenschaften der LIGA-Technik wie die hohe Seitenwandqualität, die verschwindend geringe Eckenverrundung und die Möglichkeiten in der lateralen Designfreiheit nicht realisierbar gewesen wären.

Miniaturisierte Umrisskontur „Deutschland“

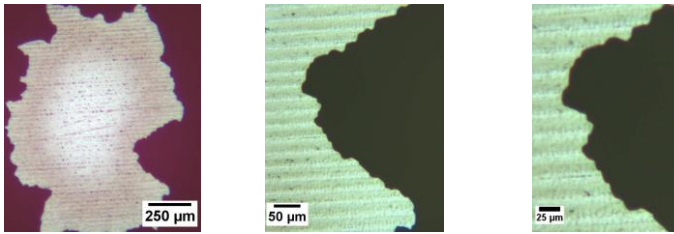
Ein eindrucksvolles Beispiel für die lateralen Freiheiten, welche die LIGA-Technik bietet, ist die exakte Nachbildung der Außenkontur Deutschlands in einem Formteil (inklusive der komplexen Umrisskontur und einer maximalen Nord-Süd-Ausdehnung von 1 mm Länge; siehe Abb. 5.4). Auf die in Kapitel 3.3 beschriebene Regel der Kantenverrundung von $1\ \mu\text{m}$ wurde verzichtet. In diesem speziellen Fall ist an einer Vielzahl der Ecken der Außenkontur ein deutlich größerer Öffnungswinkel als 90° vorhanden und dadurch die Gefahr der Rissbildung im Resist deutlich vermindert. Darüber hinaus sollte die prozessbedingte Kantenverrundung qualitativ anhand von Mikroskop-Aufnahmen beurteilt werden. Die Herstellung der Struktur auf

den Röntgenmasken, im späteren Resist zur Formeinsatzherstellung sowie in der Nickelgalvanoformung, verlief problemlos. Die Abformungen auf der MS 50 wurden mit den in Kapitel 3.8.1 beschriebenen Grundparametern durchgeführt. In Abb. 5.4 ist zusammengestellt: das Bauteildesign, die Formeinsatzkavität mit 400 µm Tiefe und das abgeformten Bauteil aus POM. Bei Betrachtung der Resiststrukturen ist ein deutlicher Verlust an Konturdetails, im Vergleich zu den im CAD erstellten Strukturen, zu erkennen. In der Kopie der Resiststrukturen über die Galvanoformung ist hingegen kein qualitativer Verlust der Konturgenauigkeit sichtbar. Der Vergleich der REM-Aufnahmen der spritzgegossenen Bauteile und der Kavität im Formeinsatz zeigt, dass ein weiterer Qualitätsverlust durch den Abformprozess stattfindet.

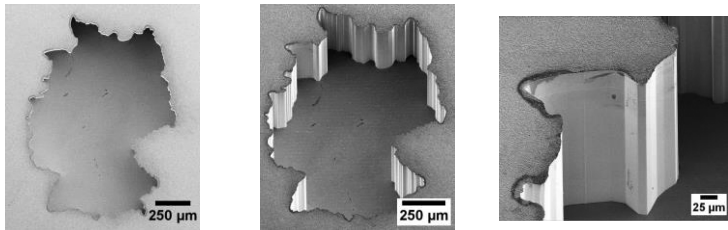
Bauteil Design 3D-CAD



Resiststrukturen (PMMA)



Formeinsatzstruktur (Nickel)



Spritzgegossenes Bauteil (Kunststoff POM)

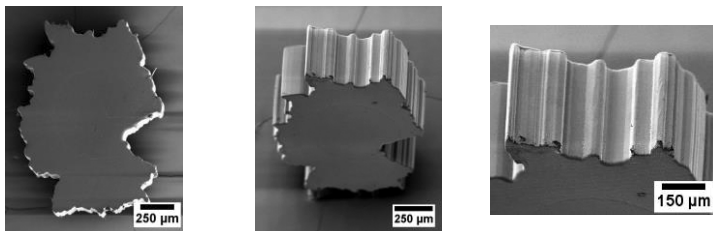


Abb. 5.4: Dokumentation des Qualitätsverlustes in der Konturgenauigkeit innerhalb des LIGA2.X-Prozesses

Das Beispiel der Umrisskontur Deutschland zeigt eindrucksvoll, dass im LIGA2.X-Verfahren laterale Details im einstelligen Mikrometerbereich mit einer hohen Qualität übertragen werden können.

5.4 Seitenwandqualität von LIGA2.X-Formeinsatzkavitäten

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, sind Seitenwände der Formeinsatzkavität mit hoher Oberflächengüte und ohne Hinterschnitte Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Abformung. Im folgenden Kapitel werden die Seitenwände von LIGA2.X-Formeinsätzen qualitativ im Hinblick auf mögliche Hinterschnitte sowie quantitativ zur Klassifizierung der Oberflächengüte untersucht.

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erlangen, wurden eigens für diese Untersuchungen Strukturen (siehe Abb. 5.5) im Rahmen der Erstellung des LIGA2.3-Layouts (siehe Abb. 5.6) entworfen. Die Strukturen verfügen über eine maximal 2.500 μm lange Messstrecke für quantitative Untersuchungen und einer Fläche von 2,5 mm^2 für qualitative Untersuchungen. Für die Aufnahme der Rauheitskennwerte wurden die Rechteck-Prüfstrukturen nach der qualitativen Untersuchung mittels Drahterodieren aus der NISP getrennt (siehe Abb. 5.8), um die Seitenwandfläche für die verwendeten Messmittel zugänglich zu machen.

„Rechteck-Prüfstruktur“
für die Bestimmung der
Seitenwandqualität von
LIGA2.X-Strukturen.

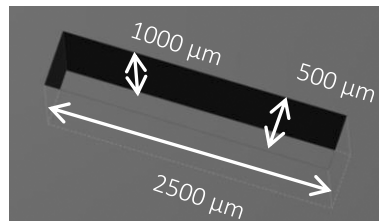


Abb. 5.5: Schematische Darstellung der Rechteck-Prüfstruktur zur Erfassung der Seitenwandqualität in LIGA2.X-Formeinsätzen

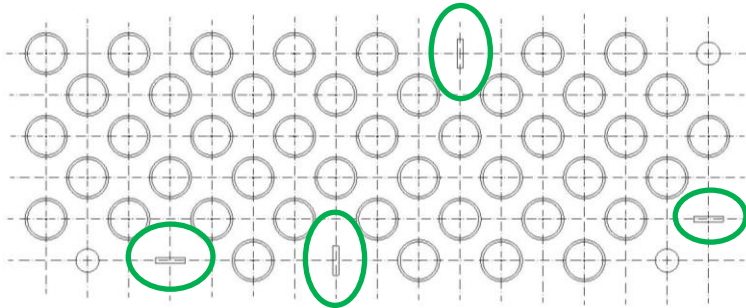


Abb. 5.6: Layout LIGA2.3 mit grün gekennzeichneten Strukturen, die für die Vermessung der Seitenwandrauigkeit herangezogen wurden

5.4.1 Qualitative Auswertung

Die qualitative Auswertung der LIGA-Seitenwände wurde mittels REM durchgeführt. Abb. 5.7 zeigt repräsentativ die Auswertung einer Rechteck-Prüfstruktur. In der Übersichtsaufnahme (Vergrößerung 200-fach) sind keinerlei Unebenheiten, Löcher oder sonstige Defekte zu erkennen. Detailaufnahmen (Vergrößerung 5.000-fach) machen die Klebeschicht mit einer Dicke zwischen 10 μm bis 15 μm an der Strukturoberkante sichtbar. Darüber hinaus ist ein geringfügiger Grat kleiner 1 μm , der durch leichte Unterplattierung in der Galvanoformung entstanden ist, zu erkennen. Die Detailaufnahme der LIGA-Seitenwand Mitte zeigt bei der 5.000-fachen Vergrößerung vereinzelte Riefen mit geringer Tiefe. Die Aufnahme des Strukturgrundes zeigt eine defektfreie Oberfläche mit einem exakten Übergang von Seitenwand zu Strukturgrund. Die LIGA-Seitenwände sind qualitativ beurteilt von sehr hoher Güte in Bezug auf Riefen oder Hinterschnitte, die in der Replikation zu hohen Entformungskräften führen würden.

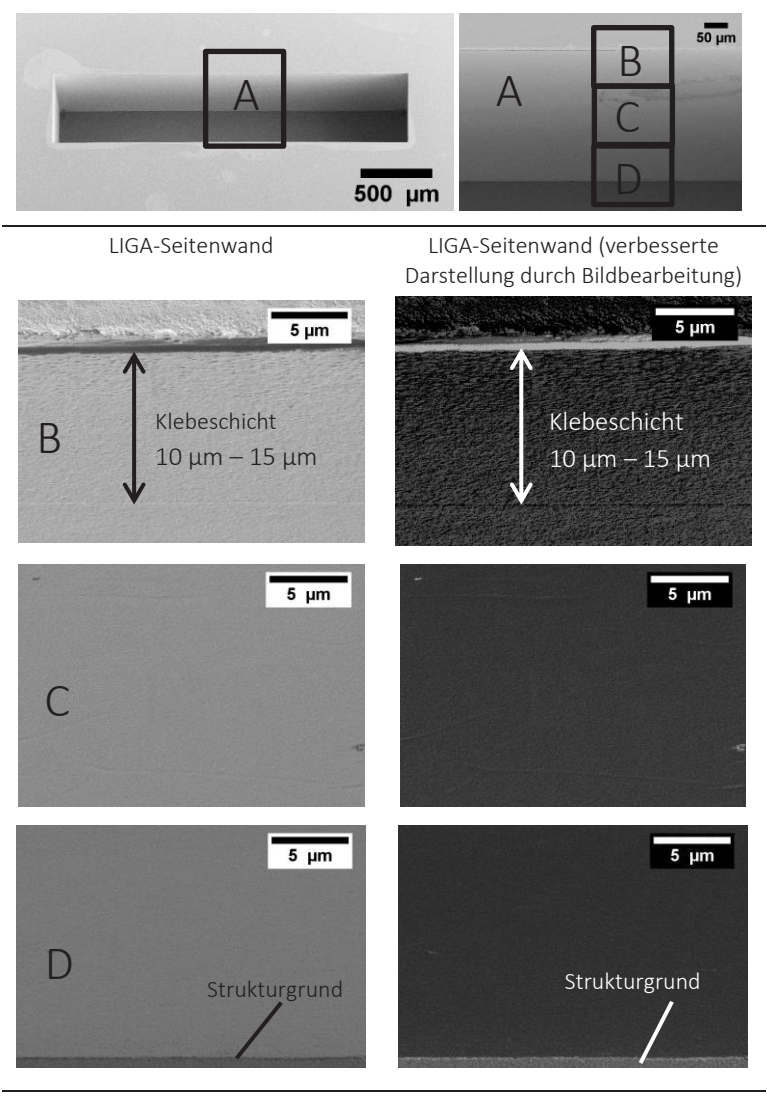


Abb. 5.7: Qualitative Auswertung der LIGA-Seitenwandqualität mit dem REM; links: Originalaufnahmen; rechts: mit *Adobe Photoshop CS6* bearbeiteten Aufnahmen zur besseren Darstellung

5.4.2 Quantitative Auswertung

Die quantitative Auswertung wurde mit Hilfe verschiedener Prüfmittel durchgeführt. Zuerst wurde mittels Weißlichtabstandsmessung (*MicroProf*[®] der Fa. FRT, Fries Research & Technology GmbH) der Oberflächenrauheitskennwert als arithmetischer Mittenrauwert R_a berührungslos aufgenommen. Die Messstrecke für aufgenommene Linienscans wurde auf 1500 μm festgelegt, um mögliche Defekte, eingebracht über das Drahterodieren, nicht in die Messung einfließen zu lassen. Die Grenzwellenlänge λ_c wurde auf 0,25 mm (angelehnt an die Normen DIN EN ISO 4288 [117] und DIN EN ISO 3274 [118]) festgelegt.

Danach wurde taktil mit dem Rasterkraftmikroskop (AFM) (*Dimension Icon* der Fa. Bruker Corporation) der arithmetische Mittenrauwert R_a erneut bestimmt. Diese Untersuchungen wurden durchgeführt, um die über die chromatische Weißlichtabstandsmessung erfassten Werte zu validieren. Hierbei wurde jeweils eine Messstrecke von 70 μm untersucht.

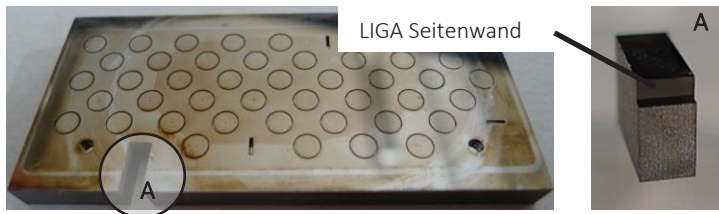


Abb. 5.8: NISP; Layout LIGA2.3; Ausschnitt **A**: Drahterodierter Prüfkörper zur Bestimmung der Seitenwandrauigkeit

Die Auswertung der Linienscans mittels berührungsloser Messungen ergab über alle gemessenen Proben einen Mittelwert des arithmetischen Mittenrauwert R_a von 23 nm $\pm 1,5$ nm. Dieser Wert entspricht Werten, die über Verfahren wie Honen und Läppen erreicht werden können [119]. In Abb. 5.9 ist das Ergebnis eines mit dem FRT *MicroProf*[®] aufgenommenem Flächenscans (0,5 mm X 0,5 mm) gezeigt.

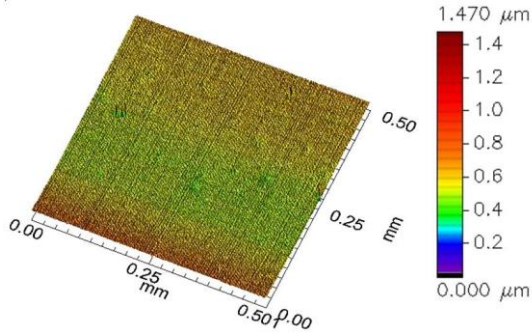


Abb. 5.9: Auswertung des Flächenscans mit dem *MicroProf*[®] und der Software *Marc III* von der Fa. FRT, der sRa Wert (der gesamten Fläche 0,25 mm²) beträgt 21 nm

Die Auswertung der Messergebnisse, die mit dem AFM aufgenommen wurden (siehe Abb. 5.10), ergaben eine Mittelwert des arithmetischen Mittenrauheits R_a von 20 nm für die untersuchten LIGA-Seitenwände. Der erfasste Wert liegt im Bereich der zuvor gemessenen Werte mittels der chromatischen Weißlichtabstandsmessung und bestätigt die Messergebnisse des FRT *MicroProf*[®].

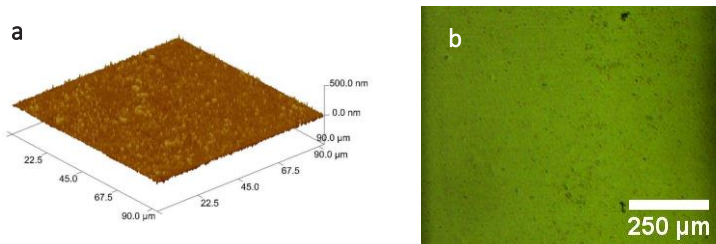


Abb. 5.10: **a** Darstellung der Tribologie eines 90 μm x 90 μm Ausschnittes der LIGA-Seitenwand, aufgenommen mit dem AFM *Dimension Icon* der Fa. Bruker Nano GmbH; **b** Kameraaufnahme der LIGA-Seitenwand

Die Qualität der in der LIGA-Technik gefertigten Seitenwände ist ausgesprochen gut und über mechanische Verfahren nur mit großer Anstrengung möglich. Die hier untersuchten Flächen sind jedoch für die mechanische Oberflächenbearbeitung nicht zugänglich und es ist derzeit nicht möglich mikromechanisch hergestellte Mikrostrukturen an den Seitenwänden auf diese Oberflächengüte nachzubearbeiten. Die LIGA-Technik zur Herstellung von Formeinsatzkavitäten hat hier ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal im Vergleich mit anderen Fertigungsverfahren, die sonst noch in der Mikrosystemtechnik zur Verfügung stehen.

5.5 Galvanoformung von kreisrunden Säulen in kritischen Dimensionen

In der Nickel-Galvanoformung von Strukturen mit hohem Aspektverhältnis tritt bei der Realisierung von kreisrunden Säulen mit Durchmesser zwischen 50 μm bis 500 μm ein mittlerweile charakteristischer Fehler auf [93]. Die galvanische Abscheidung startet bei einer Kontaktierung des Substrates (am Galvanikstartgrund (TiO_x)) von hinten nicht oder das Strukturwachstum endet nach kürzester Zeit (siehe Abb. 5.11). Die Ausfallraten dieser Strukturen auf einer NISP können 60 % überschreiten und sorgen somit für eine nicht tolerierbare Ausschussrate von Formeinsatzkavitäten. Die Möglichkeiten für Ursachen sind vielfältig und ungeklärt. In der vorliegenden Arbeit sollte über die Durchführung einer DoE mittels eines vollfaktoriellen Versuchsplans mit wichtigen Einflussgrößen und der Ausfallrate der Strukturen als Zielgröße ein erster Ansatz zum Verständnis der Vorgänge liefern und dadurch zur Lösung des Problems beitragen.

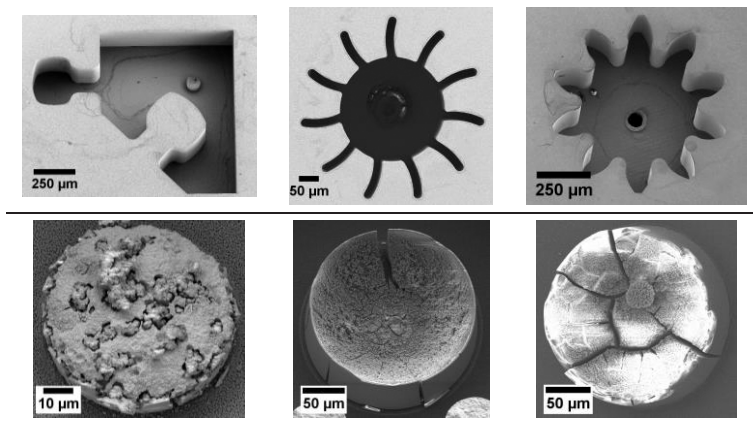


Abb. 5.11: Beispiele für defekte kreisrunde Säulenstrukturen innerhalb der LIGA2.0-Formeinsatzfertigung

5.5.1 Statistische Versuchsplanung (Galvanoformung)

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, muss für die Durchführung der DoE ein Versuchsplan aufgestellt werden, der die Einzelversuche mit der dazugehörigen Variation der Einflussgrößen und Prozessparameter enthält. Aus Kosten-, Zeit- und Kapazitätsgründen wurde hier auf die Zentralwertversuche und damit auf die Überprüfung der Linearität der Einflussfaktoren/Einflussgrößen verzichtet. Die Einflussfaktoren wurden in zwei Stufen kombiniert „-1“ für den unteren Wert und „+1“ für den oberen Wert. Darüber hinaus wurde die Anzahl der zu untersuchenden Größen auf drei beschränkt (aus den genannten Randbedingungen und der Verwendung eines vollfaktoriellen Versuchsplans errechnet sich nach Gleichung {5.1} die Anzahl der Einzelversuche zu acht).

Innerhalb der DoE wurden acht Resiststrukturen (LIGA2.0 Layout; siehe Abb. 5.12) auf der Kupfersubstratplatte erzeugt. Auf dem LIGA2.0 Layout befanden sich 23 kreisrunde Strukturen, die sich zur Untersuchung eigneten. Die anschließende galvanische Nickelab-

scheidung wurde nach $300 \mu\text{m} \pm 20 \mu\text{m}$ gestoppt, um eine Aussage über einen erfolgreichen Galvanikstart treffen zu können. Als Zielgröße des Versuchsplanes wurde die Ausfallrate A (siehe Gleichung {5.2}) der Säulenstrukturen der jeweiligen Probe in Prozent gewählt, die wie folgt berechnet wurde:

$$A = \frac{\text{Anzahl nicht vorhanden Säulen (IST Wert)}}{\text{max. Anzahl Säulen (Soll Wert)}} \cdot 100 \% \quad \{5.2\}$$

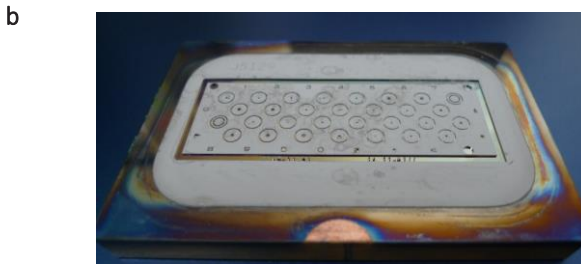
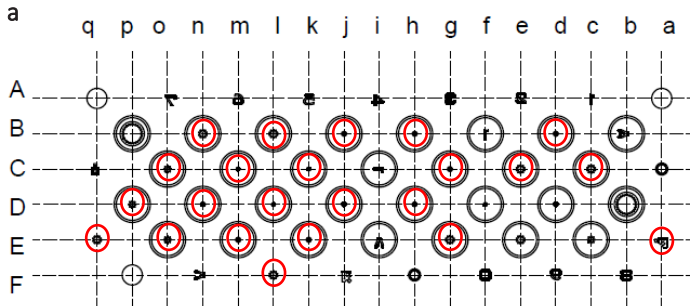


Abb. 5.12: **a** LIGA2.0-Layout; **b** Aufnahme einer der acht zur Auswertung der Ausfallrate hergestellten Proben

5.5.2 Bestimmung der Einflussgrößen (Galvanoformung)

Einen signifikanten Einfluss auf den Galvanikstart hat die zuverlässige und vollständige Freientwicklung des Strukturgrundes. In Kapitel 3.5.2 wurde die Entwicklung des PMMA-Resists unter Verwendung von GG-Entwickler beschrieben. Die Erfahrungen mit dieser Entwicklerlösung sind bei allen Arten von Strukturgeometrien positiv. Es wird jedoch vermutet, dass sich speziell in kreisrunden Strukturen kleinste Mengen an Resist nicht lösen lassen oder der Abtransport des gelösten Resists nicht vollständig stattfinden kann und sich so beim Trocknen der entwickelten Strukturen ein dünner Film im Strukturgrund absetzt. Um sicher zu gehen, dass beide Vermutungen nicht zutreffen, wurde als erster Einflussfaktor (E1) des Versuchsplanes ein Trockenätzschritt etabliert. Dieser Ätzschritt wurde direkt vor der Nickelgalvanoformung mittels reaktivem Ionenätzen (RIE) durchgeführt. Bei dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten RIE-Prozess wurde unter Sauerstoff als Reaktivgas ein gerichtetes Plasma in Richtung der entwickelten Resiststrukturen angewandt und ein anisotroper Abtrag des Polymers von circa 1 µm sowohl auf der Resistoberfläche als auch im Strukturgrund bewirkt. Das Ätzen wurde mithilfe des *Oxford Plasmalab System 80 Plus* durchgeführt. Die für die in den Faktorstufen verwendeten Parameter sind in Tabelle 5.5 aufgelistet.

Tabelle 5.5: Prozessparameter Einflussfaktor E1 reaktives Ionenätzen

E1	-1	0	[Watt/min]
E1	+1	110/20	[Watt/min]

Einen weiteren Einfluss auf einen guten Start der galvanischen Abscheidung hat die vollständige Benetzung der Kathodenoberfläche beziehungsweise des Strukturgrundes mit Elektrolyt. Um ideale Ausgangsbedingungen zu schaffen, wird die Probe vor Galvanikstart in eine wässrige Lösung des im Elektrolyt verwendeten Fluortensids,

unter Verwendung eines Vakuums eingetaucht (10 min, 100 mbar und 50 °C Umgebungstemperatur). Nach dieser Behandlung wird die Probe in die Anlage zur Galvanoformung eingebaut und nach einer 30-minütigen Ruhezeit im Elektrolytbad mit Strom beaufschlagt. Diese Vorbehandlung wurde bei allen Proben durchgeführt und ist in der Fertigung von LIGA-Formeinsätzen als Standard in den Prozess implementiert. Daher wurde diese Vorbehandlung nicht als Einflussfaktor in den Versuchsplan aufgenommen. Die Vorbehandlung wurde bei allen acht Proben gleichermaßen durchgeführt.

Ein weiterer Einflussfaktor, der in den Versuchsplan aufgenommen wurde, ist die Wahl des Galvanikstartgrundes. Der in der LIGA-Formeinsatzherstellung etablierte und bewährte Startgrund Titan/Titanoxid verfügt über sehr gute Hafteigenschaften einerseits zwischen der erzeugten Nickelschicht und dem Kupfersubstrat und andererseits zwischen dem aufgeklebten Resist und dem Kupfersubstrat. Diese Eigenschaft ist besonders wichtig in der Abscheidung von dicken Schichten, um das Ablösen der Nickelschicht vom Substrat zu verhindern. Jedoch ist der Titan/Titanoxid-Startgrund ein unedleres galvanisches Element als Nickel. Um auszuschließen, dass der „unedle“ Startgrund einen Einfluss auf die Defektrate bei kreisrunden Säulenstrukturen hat, wurde der Startgrund im Rahmen des Versuchsplanes zwischen Titan/Titanoxid und Titan/Titanoxid/Gold variiert. Die Verwendung von Gold begründet sich in der Eigenschaft als edles Metall mit hohem positiveren Elektrodenpotential. In Tabelle 5.6 sind die Faktorstufen des Einflussfaktors E2 Goldstartschicht aufgelistet. „-1“ bedeutet kein galvanisch abgeschiedenes Gold und somit Titan/Titanoxid als Startgrund und „1“ bedeutet zusätzliche 10 µm abgeschiedenes Gold als Startgrund.

Tabelle 5.6: Prozessparameter Einflussfaktor E2 Goldstartschicht

E2	-1	0	[μm]
E2	+1	10 \pm 2	[μm]

Das zweite große Thema neben den idealen Galvanikstartvoraussetzungen ist die Verringerung der Wasserstoffbildung während der Galvanoformung. Es wird angenommen, dass dieser Wasserstoff in Form von Gasblasen in einer bestimmten Größe, aus kreisrunden Strukturen mit bestimmten Durchmessern und hohen Aspektverhältnissen nicht entweichen kann. Das heißt, zum einen, dass der Weg für den Elektrolytaustausch an der zurückgestellten Elektrode [120] versperrt ist und keine weitere Reduktionsreaktion an der betroffenen Kathodenfläche zugelassen wird. Andererseits unterbricht die Gasblase den galvanischen Kontakt und somit wird das weitere Schichtwachstum verhindert.

Eine Einflussgröße auf den gebildetem Wasserstoff ist die Wahl der Stromdichte während der galvanischen Abscheidung, die als dritter und letzter Einflussfaktor (E3) in den Versuchsplan aufgenommen wurde. Über die Stromdichte kann die Menge an umgesetzter Ladung pro Zeiteinheit an der Kathode gesteuert werden. Der Ansatz der Variation der Stromdichte dient dazu, den kathodischen Wirkungsgrad (Stromausbeute) zu beeinflussen und dadurch den Strom, der zur Wasserstoffbildung genutzt werden kann, zu minimieren [25]. Um diesen Ansatz zu verfolgen, wurden die in Tabelle 5.7 wiedergegebenen Prozessparameter für den Einflussfaktor E3 gewählt.

Tabelle 5.7: Prozessparameter Einflussfaktor E3 Stromdichte

E3	-1	0,9	[A/dm^2]
E3	+1	1,8	[A/dm^2]

Die Einflussfaktoren sowie deren Prozessgrößen sind in Tabelle 5.8 zusammengefasst.

Tabelle 5.8: Zusammenfassung der Prozessparameter E1 bis E3

Parameter	Unterer Wert	Oberer Wert	Einheit
E1: Reaktives Ionenätzen	0 / 0	110 / 20	[Watt] / [min]
E2: Goldstartschicht	0	10 ±2	[µm]
E3: Stromdichte	0,9	1,8	[A/dm ²]

Ein zusätzlicher Einfluss in der galvanischen Abscheidung ist die Verteilung des elektrischen Feldes. Hier ist die gleichmäßige Verteilung der Resistfläche auf dem Kupfersubstrat für eine homogene Stromlinienverteilung während der Metallabscheidung ausschlaggebend. Das für die Durchführung der DoE verwendeten Layout LIGA2.0 wurde, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, schon in der Layouterstellung genau auf diese gleichmäßige Verteilung der Resistflächen optimiert. Da das Layout für alle Proben durch die Maske vorgegeben war und ein neues spezielles Layout für die in dieser Arbeit durchgeführten DoE zur Säulengalvanik nicht verhältnismäßig wäre, war der Einfluss der Stromlinienverteilung abhängig von der Resistflächenverteilung nicht Bestandteil des Versuchsplanes.

Weitere Einflussfaktoren, wie zum Beispiel die Elektrolytzusammensetzung, die Temperatur während der Galvanoformung, der pH-Wert, die Geschwindigkeit mit der die Proben im Elektrolyt bewegt werden, die Einbauposition der Probe relativ zur Gravitationskraft und die Schichtdicke, wurden in der Durchführung der Einzelversuche als konstant angenommen.

5.5.3 *Ergebnisse der statistischen Versuchsplanung (Galvanoformung)*

Die Einflussfaktoren sowie deren Faktorstufen wurden in die Software Visual XSei[®] 12.1 der Fa. CRGRAPH eingepflegt und ein Versuchsplan erstellt.

Die Ausfallrate A, Zielgröße des Versuchsplanes, wurde mit Hilfe eines optischen Mikroskops erfasst. Darüber hinaus wurden REM-Aufnahmen der galvanisierten Proben für die Beurteilung herangezogen.

Die Auswertung der DoE nach erfolgreicher Durchführung des Versuchsplanes resultieren in dem in Abb. 5.13 dargestellten Einflussdiagramm. Auf der y-Achse des Diagrammes ist die Ausfallrate als Zielgröße in Prozent aufgetragen. Die x-Achse enthält die drei Einflussfaktoren E1 bis E3. Der Streubereich (dargestellt in den beiden Kurven, welche die Gerade einschließt) aller drei Einflussfaktoren ist so groß, dass die Kurven unabhängig von deren Steigung nicht geschnitten werden. Somit sind alle drei Einflussfaktoren als nicht signifikant zu beurteilen und es kann keine Aussage gemacht werden, ob eine Verbesserung durch die Variation der gewählten Faktoren erzielt wurde.

Eine Tendenz der Verringerung der Ausfallrate durch den, vor die Galvanik geschalteten Trockenätzschritt ist durch die Gerade (die Steigung der Gerade zeigt an, wie stark sich der Einflussfaktor auf die Zielgröße auswirkt) erkennbar. Da dieser sich nicht negativ auf die Folgeschritte in der Formeinsatzherstellung auswirkt, wird empfohlen, diesen in die Standardfertigung von LIGA-Formeinsätzen am KIT zu implementieren.

Ein weiteres Ergebnis der DoE ist, dass die Wahl eines edleren Startgrundes im Hinblick auf die Ausfallrate keinen Einfluss zeigt. Somit sollten die guten Hafteigenschaften des Titan/Titanoxidstartgrundes weiter in der Formeinsatzfertigung zur Anwendung kommen.

Eine Verringerung der Stromdichte zeigt eine positive Tendenz im Hinblick auf die Zielgröße, das heißt die Ausfallrate der Säulenstrukturen. Es wird als sinnvoll betrachtet eine längere Galvanikzeit zu akzeptieren und die Ausschussrate damit zu senken.

Einflussdiagramm Zielgröße Ausfallrate kreisrunder Säulen

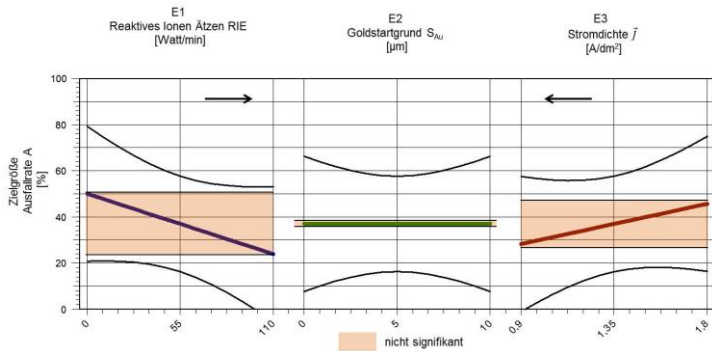
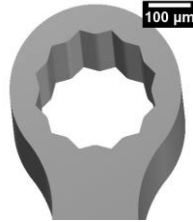
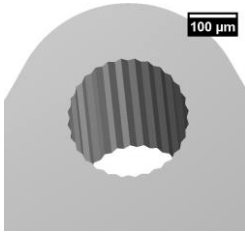


Abb. 5.13: Einflussdiagramm der Ausfallrate bei der galvanischen Abscheidung kreisrunder Säulenstrukturen

Es konnten durch diese Untersuchungen keine eindeutigen Einflüsse auf die Zielgröße herausgefunden und die Ausfallrate der Säulenstrukturen nicht auf ein zufriedenstellendes Maß gesenkt werden. Aus diesen Erkenntnissen heraus müssen weitere Untersuchungen folgen und soweit möglich auf die Herstellung von kreisrunden Säulen mit Durchmesser zwischen 50 μm und 500 μm verzichtet werden. Eine Möglichkeit die Ausfallraten, und dadurch die Ausschussrate von LIGA-Formeinsätzen zu senken, liegt im Bauteildesign. Hier kann durch eine gezielte Abweichung von der kreisrunden Form die Ausfallrate auf ein akzeptables Maß reduziert werden. Beispiele für solche „Ausweichformen“, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch getestet wurden, sind in Abb. 5.14 dargestellt.

3D-CAD Konstruktion LIGA2.X
Bauteile
(Ausweichformen)



LIGA2.X Formeinsatz
Strukturtiefe 1000 µm

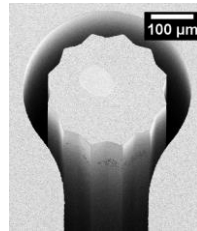
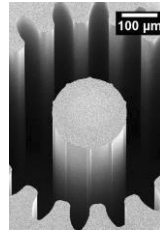
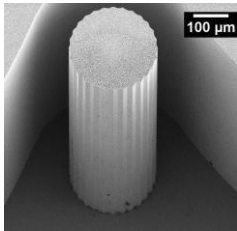


Abb. 5.14 Ausweichformen für die Herstellung von kreisrunden Säulenstrukturen in der Nickelgalvanik

6 Weiterentwicklung der LIGA2.X-Werkzeugtechnik

Die in Kapitel 3.7 beschriebenen Werkzeugvarianten wurden, um Zeit und Kosten zu sparen, durch den Umbau von schon vorhandenen Spritzgießwerkzeugen umgesetzt. Ein solcher Werkzeugumbau muss unter Beachtung von Randbedingungen und der damit einhergehenden Kompromisse realisiert werden. Ein Umbau sollte so wenig wie möglich Einzelbauteile des zu verändernden Werkzeuges betreffen, um den Aufwand gering zu halten.

Im folgenden Kapitel wird ein Spritzgusswerkzeug vorgestellt, das eigens für den LIGA2.X-Prozess entwickelt und aufgebaut wurde. In der Konzeptphase erlaubte der Start auf der „grünen Wiese“ völlige Freiheiten in der Ideenfindung und dadurch neue Denkweisen in der Konzeptfindung.

6.1 Konzeptfindung

Im Rahmen der Werkzeugentwicklung wurden verschiedene Konzepte generiert, auf Basis der zuvor durchgeführten Problemanalyse und genauen Klärung der Aufgabenstellung.

Auf Grundlage der in Kapitel 3.7 beschriebenen Werkzeugkonzepte lagen für eine Weiterentwicklung der LIGA2.X-Werkzeugtechnik folgende Anforderungen vor:

- Verringerung des durch die Angusstrennung hervorgerufenen Defekts (Abb. 6.1)
- Wechselbare Formeinsätze (Angusssystem; düsenseitig) für die Sicherstellung einer schnellen Anpassung des Anschnittdurchmessers an die zu replizierenden Bauteile

- Hohe Oberflächengüte des düsenseitigen Formeinsatzes (Abb. 6.1)
- Möglichkeit des einfachen und schnellen Wechsels der LIGA2.X Formeinsätze (auswerferseitig)
- Berücksichtigung einer Möglichkeit die replizierten Bauteile über ein Handlingsystem zu entnehmen
- Möglichkeit der variothermen Temperierung des Werkzeuges, bis zu einer maximalen Temperatur von 130 °C¹⁰
- Möglichst geringe zyklisch zu temperierende Werkzeugmasse
- Evakuierung des Angussystems sowie der Kavität
- Erzeugung eines Mehrfachkavitätenwerkzeug (minimale Anforderung zweifach)
- Möglichkeit der Verwendung von verschiedenen Thermoplasten (POM, PE, COC, PMMA)

¹⁰ Die Verarbeitung von PMMA mit variothermer Prozessführung soll möglich sein. Hier werden beim Einspritzen der Formmasse Werkzeugtemperaturen von 120 °C-130 °C benötigt. Glasübergangstemperatur der verwendeten PMMA-Formmasse PLEXIGLAS® 6N – PMMA der Firma Evonik Industries AG [121] liegt bei 99 °C [122].

Werkzeugbedingte Defekte auf den abgeformten Bauteilen (MS 50)

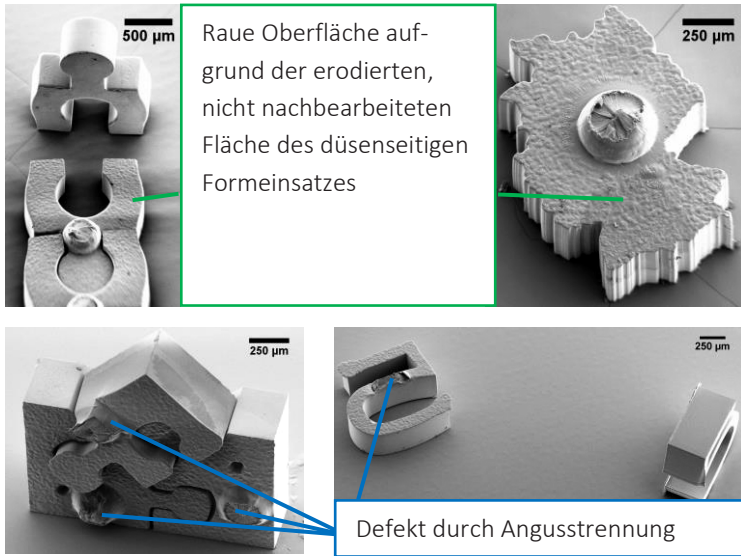


Abb. 6.1: Aufnahmen der werkzeugbedingten Defekte auf LIGA2.X-Bauteilen hergestellt mit den MS 50-Maschinen

Ausgehend von der Funktionsstruktur des Werkzeugkonzeptes (siehe Anhang A.2) und den Grundlagen (siehe Kapitel 2.2.1) wurden schnell Lösungen für Teilfunktionen wie das Aufheizen, das Evakuieren, das Einspritzen der Formmasse und das Abkühlen gefunden. Die Teilfunktionen Entformung der Bauteile und die anschließende Trennung des Angusses in der Herstellung von LIGA2.X-Bauteilen waren jedoch zu betrachten. In Tabelle 6.1 wird eine favorisierte Auswahl der generierten Ideen zur Lösung dieser Teilfunktionen vorgestellt.

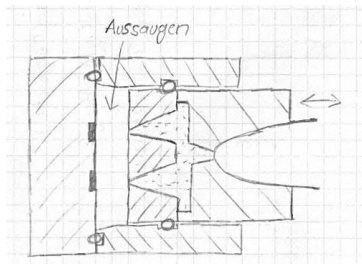
Tabelle 6.1: Vorstellung der drei favorisierten Konzepte zur Realisierung der Entformung und Angusstrennung bei der Herstellung von LIGA2.X-Bauteilen

Konzept 1:

Bauteil-Entformung: über Unterdruckentnahme.

Bauteil-Trennung: über Abreißen

Das Konzept 1 („Saugkonzept“) sieht vor, dass die Bauteile mittels Unterdruck aus der Kavität „gesaugt“ werden.

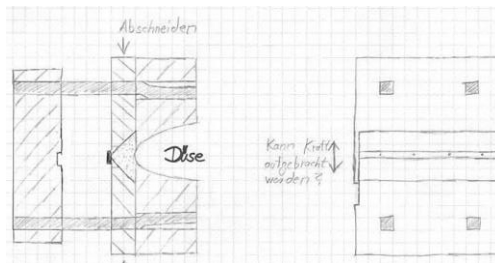


Konzept 2:

Bauteil-Entformung: über Herausziehen am Anguss;

Bauteil-Trennung: über Abschneiden

Nachdem die Bauteile am Anguss aus der Kavität gezogen wurden (siehe Werkzeugvarianten in Kapitel 3.7) setzt die Auswerferseite ihre Öffnungsbewegung fort und betätigt so, durch die gekrümmten Führungsschienen, den Schneidmechanismus. Das Bauteil soll dadurch sauber vom Anguss abgeschnitten werden („Abschneidkonzept“).

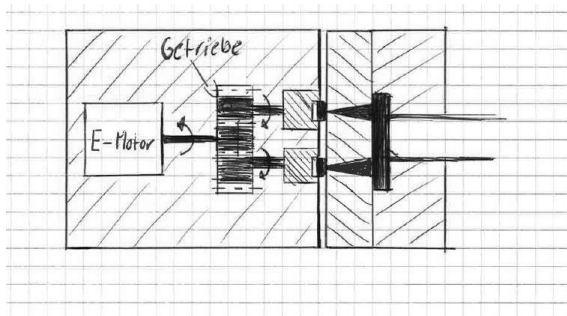


Konzept 3:

Bauteil-Entformung: über Herausziehen am Anguss;

Bauteil-Trennung: über Abdrehen

Konzept 3 („Abdrehkonzept“) sieht vor, dass die Bauteile teilentformt werden. Das heißt die Bauteile werden am Anguss bis maximal zur halben Bauteildicke aus der Kavität gezogen. Danach wird durch die Rotationsbewegung der LIGA2.X Formeinsätze der Anguss abgesichert und die Bauteile über ein Unterdruckentnahmemodul vollständig aus der Kavität gezogen und entnommen.



In Konzept 1 („Saugkonzept“) ist es fraglich, ob die Vakuumpumpe die notwendige Kraft aufbringt, um die erstarrten Bauteile aus der Kavität zu lösen. In [123] wurde die Entformung mittels Unterdruck speziell für Mikrobauteile mit kleiner Stirnfläche als ungeeignet beurteilt. Das „Saugkonzept“ wurde aus den genannten Gründen nicht weiter verfolgt und nicht in die weitere Entscheidungsfindung mit einbezogen.

Das zur Produktoptimierung und Qualitätssicherung verwendete System **Quality Function Deployment (QFD)**, wird in der Industrie zur Priorisierung von Produktanforderungen und Kundenwünschen eingesetzt [124], [125]. Das QFD in Form des House of Quality [125], [126] dient der Umsetzung der Bedürfnisse in technische Eigenschaften. Durch die volle Konzentration auf die Kundenzufriedenheit kann

ein qualitativ hochwertiges Produkt angeboten werden. In der vorliegenden Arbeit wurde das QFD zur Bestätigung der Auswahl einer bereits intuitiv favorisierten Lösung verwendet.

Die Bewertungsschwerpunkte des House of Quality (siehe Anhang A.3) waren:

- Vereinzelung der Bauteile ohne Nachbearbeitung, mit möglichst hoher Oberflächenqualität an der Trennfläche
- Sichere Entformung der Bauteile aus der Kavität

In Tabelle 6.2 ist das Ergebnis der drei im House of Quality bewerteten Konzepte wiedergegeben.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der durchgeführten QFD-Analyse zur Entscheidungshilfe

Abreißkonzept	268
Abschneidkonzept	273
Abdrehkonzept	282

Der beim „Abreißkonzept“ entstehende Defekt an der Abrissstelle des Angusses vom eigentlichen Bauteil (Abb. 6.1), ist der ausschlaggebende Punkt, dass dieses Konzept die schlechteste Bewertung in der QFD-Analyse erhalten hat. Die beiden anderen Konzepte versprechen in diesem, essentiellen und mit höchster Gewichtung bewerteten Punkt eine sauberere Trennung vom Anguss.

Die Nachteile des Abschneidkonzeptes im Vergleich zum Abdrehkonzept lagen zum einen in der Abdichtung der Schneidevorrichtung in Hinblick auf die Evakuierung des Angussystems und den Kavitäten. Zum anderen war die präzise Führung der Schneiden als komplex zu bewerten, da schon bei geringen Toleranzen oder verschleißbedingten Abweichungen die abgeformten Bauteile beschädigt wurden (Abb. 6.2).

Das Werkzeugkonzept, basierend auf der Angusstrennung mittels Abdrehkonzent, konnte mit der Veröffentlichungsnummer DE 102012103720 A1 [127] als Patent angemeldet werden.

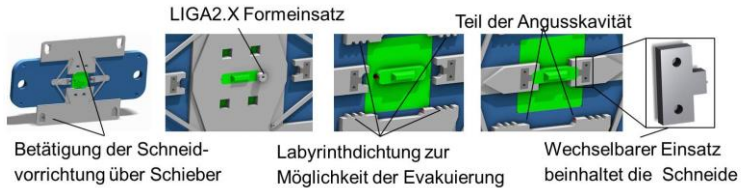


Abb. 6.2: 3D-CAD-Entwurf der Schneidvorrichtung zur Trennung des Angusses vom abgeformten Bauteil

Da nur wenige beziehungsweise keine Erfahrungen und Kenntnisse für neue Entformungskonzepte für das Mikrospritzgießen von kleinsten einzelnen Bauteilen vorlagen, wurde letztendlich ein Werkzeugkonzept entwickelt, das alle drei favorisierten Entformungskonzepte enthielt (siehe Abb. 6.3). Ein solches Werkzeug hätte die drei verschiedenen Konzepte in Bezug auf ihre Praxistauglichkeit und die industrielle Massenproduktion von Bauteilen testen können.

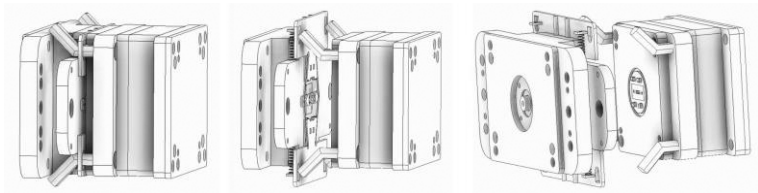


Abb. 6.3: Finales Werkzeugkonzept, in dem die drei Konzepte Abreißen, Abdrehen und Abschneiden vereint sind

6.2 LIGA2.X-Werkzeugentwurf und Realisierung

Zusammen mit der Firma Rodinger Kunststoff-Technik GmbH (RKT) wurde aus dem erarbeiteten Werkzeugkonzept (siehe Abb. 6.3) ein konkreter Werkzeugentwurf eines Zwei-Kavitäten-Werkzeuges. Durch das begrenzte Budget wurde auf die Heißkanaltechnik¹¹, Drucksensoren im Angusskanal, Heizpatronen und die Realisierung einer Abschneidvorrichtung für die Anguss/Bauteil-Trennung verzichtet. Im Folgenden wird kurz auf die Lösung für die in Kapitel 6.1 aufgeführten Anforderungen eingegangen.

Eine Verbesserung der Angusstrennung, in Bezug auf die Qualität der Trennfläche, sollte mit Hilfe einer Abdrehvorrichtung erzielt werden. Diese Vorrichtung wurde in der Konzeptphase als die innovativste und vielversprechendste Lösung dieser Teilfunktion beurteilt. Ein über die Leistung in der Drehzahl regelbarer Elektrokleinstmotor (DC) der Fa. Faulhaber [129] überträgt über eine Kombination von zwei Getrieben (Planetengetriebe mit Übersetzungsverhältnis von 134:1 und Verteilergetriebe mit Übersetzungsverhältnis eins), eine Drehbewegung auf die beiden eingebauten LIGA2.X-Formeinsätze (siehe Abb. 6.4). Durch die Drehbewegung, relativ zum Anguss, wird dieser abgeschert und die Bauteile vereinzelt. Für die zu verwendende Drehzahl in Hinblick auf das Abscheren des Bauteils vom Anguss wird eine starke Abhängigkeit von der Formmasse sowie der Anschnittgröße erwartet.

¹¹ Unter einem Heißkanal wird ein beheiztes Angussystem verstanden, das die Formmasse ohne Wärmeverlust bis an die Kavität leitet. Die Formmasse wird durch eine Heißkanaldüse direkt in die Kavität eingespritzt. Werkzeuge mit mehreren Kavitäten besitzen mehrere Heißkanaldüsen [128].

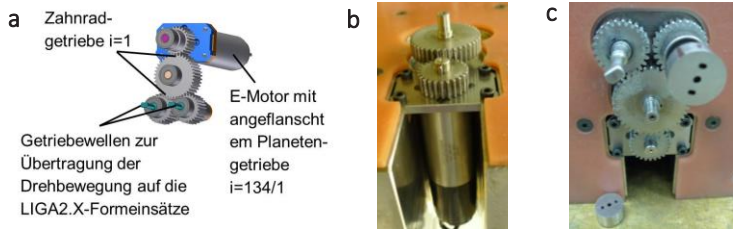


Abb. 6.4: Darstellung der in das Spritzgießwerkzeug LIGA2.X integrierten Abdrehvrichtung: **a** schematisch im 3D-CAD, **b** Aufnahme von unten; **c** Aufnahme von vorne

Für die schnelle Variation des Anschnittquerschnitts wurden düsenseitig wechselbare Einsätze vorgesehen (siehe Abb. 6.5). Diese Einsätze erlauben die Anpassung der Anschnittöffnung an die zu erzeugende Bauteilgeometrie sowie die zu verwendende Formmasse. Die Oberfläche der Stirnseite der Angusseinsätze war Teil der Kavität und wurde geschliffen ausgeführt. Für die ersten Versuche wurden jeweils zwei Einsätze mit einem Anschnittdurchmesser von 0,3 mm und 0,5 mm gefertigt.

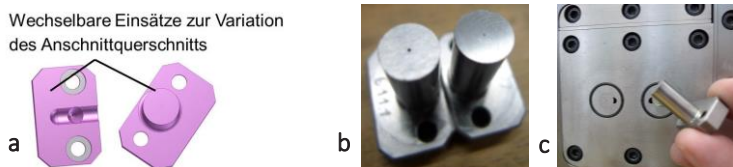


Abb. 6.5: Darstellung der wechselbaren Einsätze zur schnellen Anpassung des Anschnittdurchmessers: **a** schematisch im 3D-CAD, **b** Aufnahme zweier Einsätze mit unterschiedlichem Anschnittdurchmesser; **c** Aufnahme der düsenseitigen Werkzeugplatte, in die die Einsätze eingebaut werden

Das schnelle und einfache Wechseln der LIGA2.X-Formeinsätze wurde über die Verwendung eines Bajonettverschlusses realisiert (siehe Abb. 6.6). Die Formeinsätze können so über die Trennebene, ohne das Lösen von Schrauben, gewechselt werden. Die LIGA2.X-Formeinsätze werden in einen runden Halter außerhalb des Werkzeuges eingebaut,

danach in das Werkzeug eingesetzt und durch eine Drehbewegung mit Hilfe des Bajonettverschlusses gesichert.

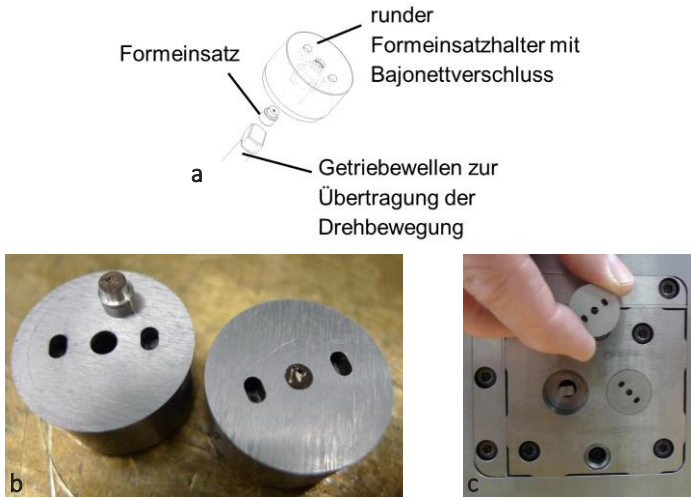


Abb. 6.6: Darstellung der wechselbaren Einsätze unter Verwendung eines Bajonettverschlusses für einen schnellen Tausch von LIGA2.X-Formeinsätzen:

a schematisch, **b** Aufnahme der beiden Formeinsatzhalter mit LIGA2.X-Formeinsätzen; **c** Aufnahme der auswerferseitigen Werkzeugplatte, in die die Formeinsatzhalter eingebaut werden

Für die spätere Serienfertigung wurden zwei Zentriereinheiten der Fa. Hasco Hasenclever GmbH + Co KG in die Auswerferseite eingebaut (siehe Abb. 6.7). Diese Führungen erlauben das präzise Anfahren eines Handlingsystems zur Entnahme der Bauteile. Das für das Handlingsystem vorgesehene Funktionsprinzip ist die Entnahme über Unterdruck.

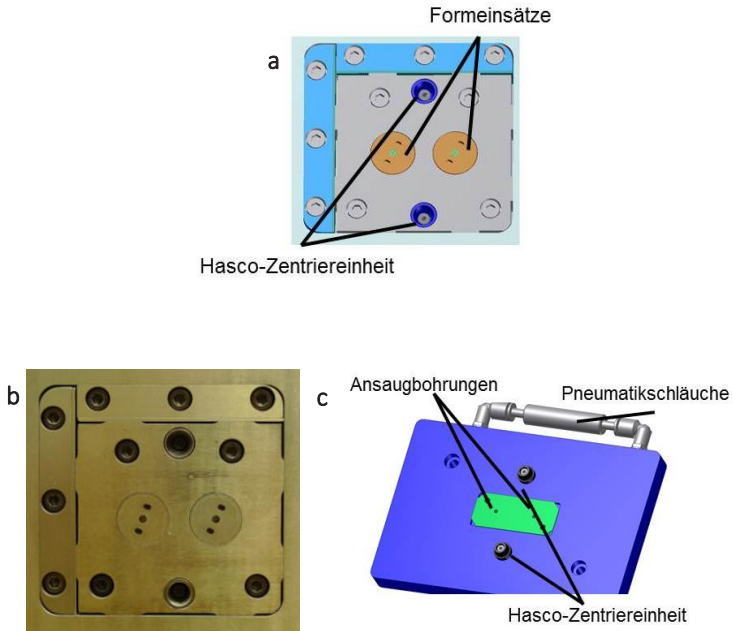


Abb. 6.7: Darstellung der vorgesehenen Zentrierungen für die Verwendung eines Handlingsystems: **a** Schematisch im 3D-CAD, **b** Aufnahme der auswerferseitigen Werkzeugplatte mit zwei HASCO-Zentriereinheiten; **c** Konzept eines möglichen Handlingsystems zur Entnahme von LIGA2.X-Bauteilen über Unterdruck

Zur Temperierung des Werkzeuges wurden Kanäle eingebracht, durch die das Kühlmedium (wahlweise Wasser oder Öl) mittels extern angeschlossenen Temperiergeräten fließen kann. Sieben verschiedene Kanäle (davon zwei im kavitätsnahen Bereich) können separat angesteuert werden (siehe Abb. 6.8). Für die ersten Versuche soll eine isotherme Prozessführung gewählt werden, bei der die Temperierkanäle der Auswerferseite zusammen mit denen der mittleren Platte gebrückt und an ein Temperiergerät angeschlossen werden. Dasselbe geschieht mit den Temperierkanälen der Düsen­seite. Falls nach den ersten Abformversuchen der Umstieg auf eine variotherme Prozessführung notwendig wird, ist das Werkzeug für eine maximal zulässige

Werkzeugtemperatur von 130 °C vorbereitet. Zusätzlich wurden isolierende Platten zur thermischen Trennung eingebracht, um die zyklisch zu temperierende Masse zu verringern und den Elektromotor vor Überhitzung zu schützen (siehe Abb. 6.8). Eine weitere Maßnahme zum Schutz vor Überhitzung bei hohen Werkzeugtemperaturen wurde mit der Option der Luftanblasung des Elektromotors vorgesehen.

Das Werkzeug wurde vorbereitet, um eine Evakuierung des Angussystems sowie der beiden Kavitäten zu realisieren. Dazu wurden zwischen den einzelnen Werkzeugplatten Vakuumdichtungen eingesetzt. Darüber hinaus wurde ein Kanal in die Düsenseite eingebracht, über den eine Vakuumpumpe die Luft aus dem Angussystem und den Kavitäten saugen kann.

Falls ein Vakuum zur Formfüllung erforderlich wird, muss zusätzlich eine Nut an die LIGA2.X-Formeinsätze angedreht werden. In diese Nut wird ein Dichtring eingesetzt, welcher das Volumen der Kavitäten und des Angusses zu dem restlichen Volumen der Auswerferseite abdichtet (siehe Abb. 6.8).

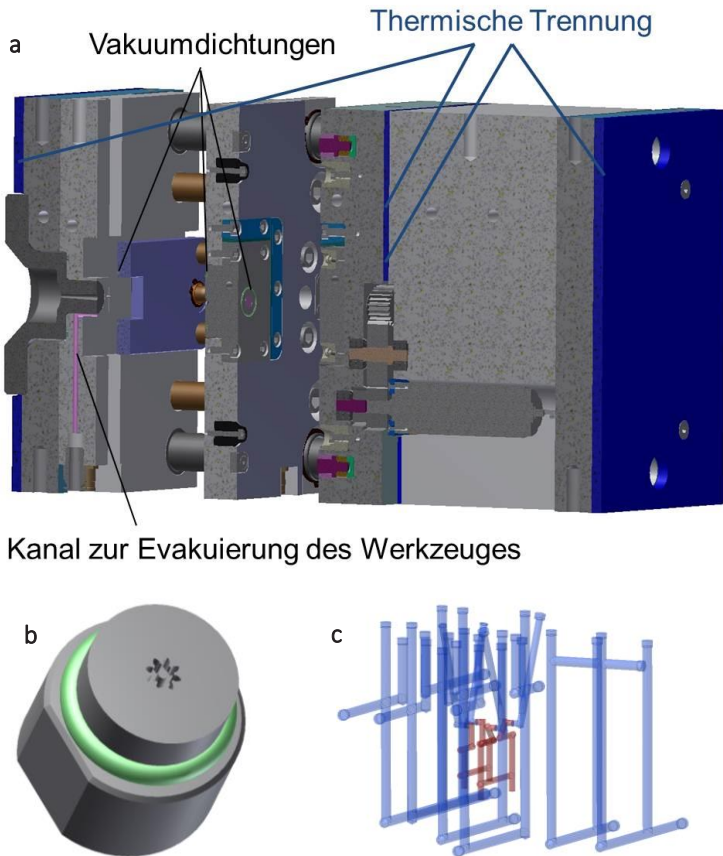


Abb. 6.8: Schematische Darstellung im 3D-CAD: **a** des Evakuierungskonzeptes, **b** LIGA2.X-Formeinsatz mit Dichtung als Teil des Evakuierungskonzeptes; **c** Kühlkanalsystem des LIGA2.X-Werkzeuges (in rot ist der kavitätsnahe Kühlkreislauf hervorgehoben)

Mittels vier Federpaketen wird im ersten Millimeter der Werkzeugöffnungsbewegung eine definierte Kraft auf die mittlere Platte ausgeübt (siehe Abb. 6.9). Diese Kraft dient dazu, dass die mittlere Platte sich nicht von der Düsen­seite lösen kann und somit das Herausziehen der Bauteile kontrolliert ermöglicht wird.

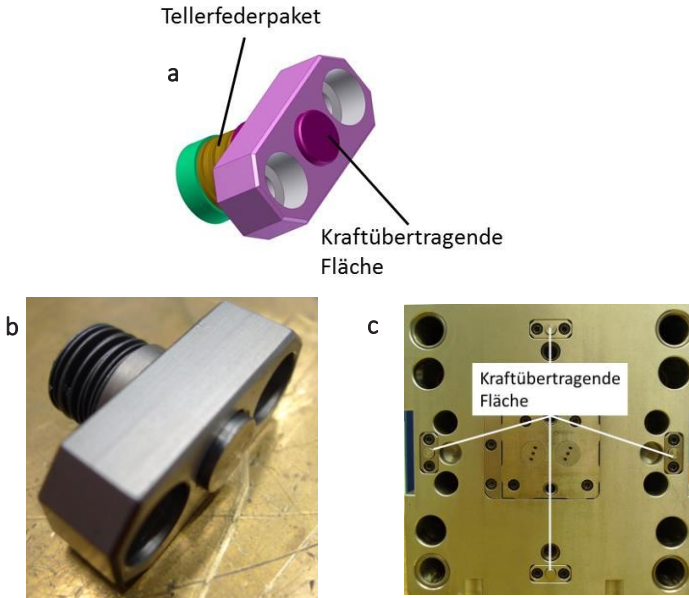


Abb. 6.9: Darstellung der Tellerfederpakete für die Gewährleistung einer definierten Werkzeugöffnungs-bewegung: **a** Schematisch im 3D-CAD, **b** Aufnahme eines Federpaketes, **c** Aufnahme der Auswerferseitigen Werkzeugplatte mit den eingebauten Federpaketen

Auf der Grundlage der mit der Fa. RKT ausgearbeiteten Lösungen für die einzelnen Anforderungen und der durchgeführten Multizyklussimulation mit der Spritzguss-simulationssoftware *Sigmasoft*[®] der SIGMA Engineering GmbH, ergab sich für das Werkzeug (siehe Abb. 6.10) folgender prinzipieller Ablauf, welcher der Realisierung des Werkzeuges zu Grunde liegt:

- Spritzen des Formteils
- Öffnen des Werkzeuges um maximal die Hälfte der Bauteil-dicke über die Maschinenöffnungsbewegung
- Zwischenstopp der Öffnungsbewegung der Maschine (Formteil ist teilentformt)

- Einleitung einer definierten Drehbewegung der Getriebespindel über einen Elektromotor. Durch die Drehbewegung Trennung des Bauteils vom Anguss über Abscheren
- Komplette Öffnung des Werkzeuges, dabei Entformung des 3 Plattenangusses
- Optionale Entnahme der Formteile über eine Saugvorrichtung

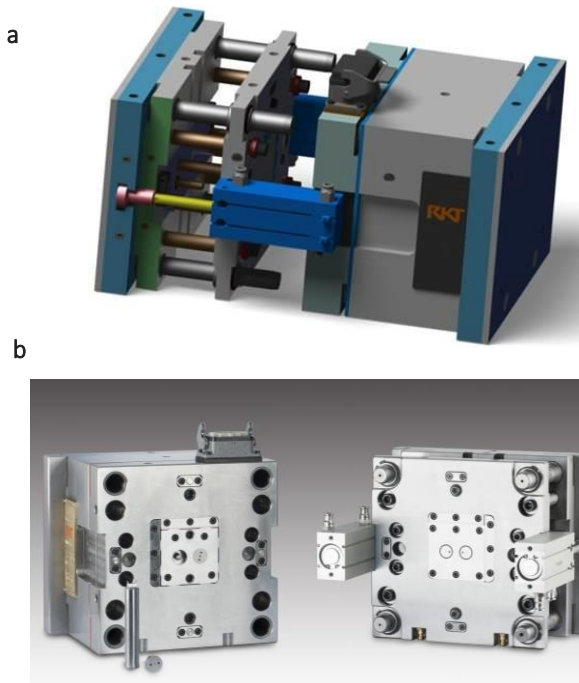


Abb. 6.10: LIGA2.X-Werkzeug: **a** 3D-CAD-Darstellung; **b** Aufnahme des fertiggestellten Werkzeuges

6.3 Abformversuche unter Verwendung des LIGA2.X-Werkzeuges

Nach Aufbau des Werkzeuges wurden erste Abformversuche durchgeführt. Diese Versuche wurden mit dem bewährten Werkzeugkonzept (Kapitel 3.7) über Abreißen durchgeführt. Die verwendete Spritzgießmaschine war eine Arburg 420C mit 60 Tonnen maximaler Schließkraft (siehe Abb. 6.11). Die Materialaufbereitung sowie Homogenisierung wurde über eine Plastifiziereinheit mit einer Drei-Zonen-Schnecke (Durchmesser 18 mm) realisiert. Als Formmasse wurden verschiedene Typen des teilkristallinen Thermoplasten Polyoxymethylen (POM) verwendet. In Tabelle 6.3 sind die Grundparameter der Abformung aufgelistet. Das Schussvolumen des Angussystems zusammen mit zwei LIGA2.X-Bauteilen belief sich auf etwa $0,8 \text{ mm}^3$.

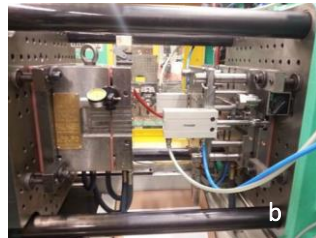


Abb. 6.11: Arburg 420 C des IAM-WPT am KIT: **a** Spritzgießmaschine; **b** Detaildarstellung des aufgespannten LIGA2.X-Werkzeuges

Für diese Versuche wurden Formeinsätze mit Strukturen des LIGA2.1 Layouts (Abb. 4.10) verwendet.

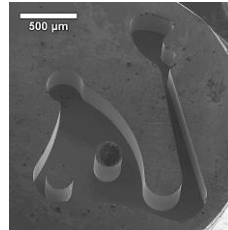
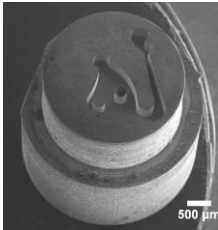
Tabelle 6.3: Grundparameter der Abformversuche mittels der Arburg 420 C unter Verwendung von LIGA2.X-Formeinsätzen

Parameter	Wert	[Einheit]
Einspritzgeschwindigkeit	20	[mm/sec]
Einspritzdruck	560	[bar]
Nachdruck	260	[bar]
Schneckendurchmesser	18	[mm]
Werkzeugtemperatur	70 (isotherm; Temperiermedium Öl)	[°C]
Werkzeugöffnungsgeschwindigkeit	1	[mm/s]
Zykluszeit	20-25	[s]
Material	Polyoxymethylen (POM) Typ Ticona C13031, natur; C13013,14 schwarz, C13031 XF 50/5339 und C9021 22 PS getrocknet 4 h bei 80 °C	

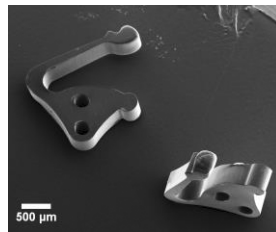
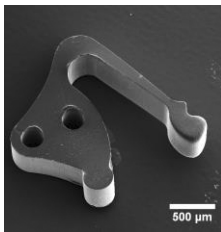
Erste Ergebnisse sind in Tabelle 6.4 dargestellt. Hier wurde zum Vergleich ein Formteil gewählt, welches sich mit dem in Kapitel 3.7.1 beschriebenen Werkzeuges nicht spezifikationsgerecht herstellen ließ. Unter der Verwendung des neuen Werkzeuges konnte eine vollständige Formfüllung erzielt werden. Ein Grund hierfür ist, dass die Vergrößerung des Anschnittdurchmessers von 0,3 mm auf 0,5 mm dafür sorgt, dass schneller mehr Formmasse in die Kavität gespritzt werden kann und dadurch die mögliche Fließweglänge erhöht wird.

Tabelle 6.4: Erste Ergebnisse der LIGA2.X-Bauteile hergestellt mit der Arburg 420C-Spritzgießmaschine im Vergleich zu den Bauteilen hergestellt mittels der MS 50-Maschinen

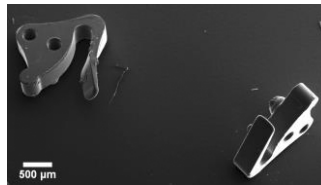
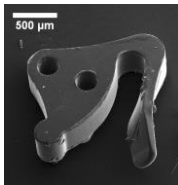
Formeinsatz



Werkzeug Arburg



Werkzeug Microsystem 50



Die ersten mit dem neuen Werkzeug durchgeführten Funktionstests sind vielversprechend. Es konnte direkt bei der ersten Abmusterung ein vollautomatischer Prozess mit einer Zykluszeit von 20 s bei zwei eingebauten LIGA2.X-Formeinsätzen gefahren werden.

Qualifizierung Abdrehfunktion

Im Rahmen dieser Arbeit wurden alle Funktionen des Werkzeuges inklusive der Abdrehfunktion erfolgreich auf deren Funktion geprüft. Für den Funktionstest der Abdrehfunktion im laufenden Abformzyklus fehlen die technischen Möglichkeiten am KIT-IAM-WPT, da die Implementierung der Funktion in den laufenden Prozess eine elektrische Spritzgießmaschine mit einer hochauflösenden Steuerung des Werkzeugöffnungsweges und der Funktion eines Zwischenstopps in der Werkzeugöffnungsbewegung benötigt. Im Rahmen von Abformversuchen mit der elektrischen Spritzgießmaschine *Allrounder 370 A* bei der Fa. Arburg GmbH + Co KG wurden erste Funktionstests in Bezug auf die Drehfunktion des Werkzeuges durchgeführt. Im Test selbst wurde beim Anfahren des Abformprozesses die einwandfreie Funktion der Drehfunktion geprüft und validiert. Im laufenden Prozess wurde festgestellt, dass die vorgesehene Schmierung der Reibpaarung (runder Formeinsetzhalter/Werkzeugplatte) nicht ausreicht. Deshalb konnten keine qualitativ hochwertigen Bauteile mit der in den Abformzyklus integrierten Drehfunktion hergestellt werden. Daraufhin wurden Teile des Werkzeugs zur Nachbearbeitung gegeben.

In zukünftigen Arbeiten müssen mit den überarbeiteten Werkzeugteilen neue Tests gefahren werden, um die Drehfunktion zu qualifizieren und die erwartete Verbesserung der Trennstelle Anguss/Bauteil zu validieren. Auf Grundlage der Ergebnisse der ersten vielversprechenden Funktionstests muss darüber hinaus das Werkzeug unter Verwendung einer kleineren Plastifiziereinheit getestet werden, wie zum Beispiel dem Mikromodul der Fa. Arburg GmbH + Co KG [77].

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Besondere der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Prozessfolge „LIGA2.X“ liegt darin, dass sie den Anwendungsbereich der bestehenden LIGA-Technik deutlich erweitert, indem sie die Möglichkeit schafft, einzelne dreidimensionale, polymere LIGA-Mikrobauteile mit Bauteilgewichten kleiner 1 mg in großen Stückzahlen endkonturnah, reproduzierbar, ressourcenschonend und kostengünstig herzustellen.

Die durchgeführten Arbeiten zur Entwicklung des Verfahrens beinhalteten die Bauteilgestaltung, die Layouterstellung, die Formeinsatzherstellung, das Mikrospritzgießen der Bauteile, die Charakterisierung der hergestellten Bauteile und erste Arbeiten zur weiteren Optimierung des Verfahrens. Die vorgestellten Ergebnisse führen zu einer Verbesserung der bestehenden LIGA-Fertigung, zu neuen Möglichkeiten in der Mikrospritzgießtechnologie sowie zu einer Erweiterung des Technologieangebotes des KIT. Auf dessen Basis können nun neue Produkte ermöglicht werden.

Eine in der vorliegenden Arbeit neu entwickelte Vorgehensweise für die Erstellung des Bauteildesigns sowie des Formeinsatzlayouts unter der Verwendung von 3D-CAD Software ermöglicht die umfassende dreidimensionale visuelle Darstellung der einzelnen Prozessschritte und führt dadurch zu weniger Fehlern in der Design- und Layouterstellung. Darüber hinaus wurde eine Konstruktionsrichtlinie für die Bauteildesign- und Layouterstellung von LIGA2.X-Mikrobauteilen erarbeitet, welche jetzt als Grundlage für Konstruktionsingenieure zur Verfügung steht und eine wesentliche Erleichterung beziehungsweise Zeitersparnis bei der Erstellung des für die Herstellung der Röntgen-Zwischenmaske notwendigen 2D-Files bringt. Die in der Konstruktionsrichtlinie vorgeschlagene Durchführung von Füllstudien mittels Spritzgießsimulationssoftware führt zu einer optimierten Lage der

Kavität auf dem LIGA2.X-Formeinsatz im Hinblick auf den Mikrospritzgießprozess. Weiterhin ist eine neue Methode für die Anordnung der Bauteile auf der im LIGA-Verfahren zur Verfügung stehenden strukturierbaren Fläche (60 mm x 20 mm) Teil der Richtlinie, die es gestattet schnell eine für die Galvanoformung vorteilhafte Anordnung der Strukturen zu generieren. Ebenfalls enthalten sind verlorene Hilfsstrukturen, die innerhalb der Formeinsatzherstellung Rissausbildungen im Resist unterbrechen und die für eine, makroskopisch gesehen, homogene Galvanikfläche sorgen. Die Einführung von drei kreisrunden (Durchmesser 2 mm), fest in der Position vorgegebenen und für die LIGA-Technik neuartigen Referenzstrukturen, ermöglicht eine präzise Lage der Kavität auf den einzelnen LIGA2.X-Formeinsätzen. Diese Referenzstrukturen sind Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Herstellung von Bauteilen über das LIGA2.X-Verfahren. Des Weiteren wurde eine auf die Werkzeugtechnik des Mikrospritzgießens angepasste Außenkontur der Formeinsätze entwickelt und in der Layouterstellung berücksichtigt. Die neue zylindrische Form der LIGA2.X-Formeinsätze wirkt sich positiv auf den Einbau in das Spritzgießwerkzeug aus. Das in der Rückseite befindliche Gewinde (M1,6) und die Gesamthöhe von (4,5 mm) ermöglichen eine gute Handhabung beim Ein- und Ausbau der Formeinsätze sowie bei deren Charakterisierung. Eine zusammen mit einem Industriepartner entwickelte neue Prozessfolge für die Erzeugung der Formeinsatzaußenkontur mittels μ -mechanischer Bearbeitungsverfahren führt über die drei Referenzstrukturen und einer dazu passenden Antasthilfe zur präzisen Erfassung der Kavitätslage und dadurch zur spezifikationsgerechten Erzeugung der Außenkontur der LIGA2.X-Formeinsätze mit definierter Lage der Kavität.

Verschiedene Ansätze in der Werkzeugtechnik für das Mikrospritzgießen im Hinblick auf die Fertigung von endkonturnahen Mikrobauteilen wurden entwickelt und hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit verglichen. Ein neuartiges Konzept basierend auf einem Drei-Platten-Werkzeug für die Entformung von Mikrobauteilen beim Mikrospritzgießen ging

aus den Überlegungen hervor und konnte in drei Spritzgießwerkzeugen für unterschiedliche Mikrospritzgießsysteme realisiert werden. Mit Hilfe dieser Werkzeugkonzepte und Maschinen war es möglich, erstmals defektfreie und qualitativ hochwertige LIGA-Mikrobauteile mit einem Gewicht kleiner als 1 mg endkonturnah, nachbearbeitungsfrei und vereinzelt direkt über das Mikrospritzgießen herzustellen.

Anhand von verschiedenen Demonstratoren, wie zum Beispiel Zahnradstrukturen eines Planetengetriebes, Puzzlestrukturen oder Bauteilen mit komplexen Konturen, wurde das Potential des Verfahrens hinsichtlich der realisierbaren Bauteilkonturen aufgezeigt. Der qualitative Strukturverlust von LIGA2.X-Bauteilen von der Konstruktion bis zum fertigen spritzgegossenen Mikrobauteil wurde über den Demonstrator („Deutschland“) aufgezeigt. Darüber hinaus wurden an verschiedenen kommerziellen Mikrospritzgießsystemen unterschiedlicher Hersteller (Fa. Arburg GmbH + Co KG, Fa. Wittmann Battenfeld GmbH & Co.KG und Fa. Otto Männer GmbH) unter Verwendung der drei in der vorliegenden Arbeit realisierten Spritzgießwerkzeugen die Praxistauglichkeit des LIGA2.X-Verfahrens zur reproduzierbaren Massenproduktion von LIGA-Mikrobauteilen aufgezeigt. Ein voll automatischer Mikrospritzgießprozess mit isothermer Prozessführung und Zykluszeiten zwischen 20 s und 35 s wurde bei allen getesteten Systemen nachgewiesen.

Eine mittels statistischer Versuchsplanung durchgeführte Optimierung des LIGA2.X-Mikrospritzgießprozesses hat durch die Auswertung der Bauteilmasse als Zielgröße gezeigt, dass sich eine schnellere Einspritzgeschwindigkeit vorteilhaft auf die Bauteilqualität auswirkt. Darüber hinaus ist eine Tendenz zu erkennen, dass sich eine höhere Werkzeugtemperatur positiv auf die Zielgröße auswirkt.

Eine weitere statistische Versuchsplanung zur Verbesserung der Ausfallrate als Zielgröße bei der Erzeugung von kreisrunden Säulenstrukturen in LIGA-Formeinsätzen mittels Nickel-Galvanoformung hat ergeben, dass die untersuchten Einflussparameter keinen signifikanten Einfluss haben. In der Versuchsplanung wurden die Art des Galva-

nikstartgrundes (Titanoxid und Gold), die Stromdichte ($0,9 \text{ A/dm}^2$ und $1,8 \text{ A/dm}^2$) sowie die Anwendung eines zusätzlichen Trockenätzschrittes zur Verbesserung der Freientwicklung des Kavitätsgrundes untersucht. Die Behandlung über das Trockenätzen hatte jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Ausfallrate der kreisrunden Säulenstrukturen.

Die Einführung einer quantitativen Maßkontrolle in die LIGA2.X-Formeinsatzfertigung erlaubt es, die maßlichen Veränderungen im Prozess nachzuvollziehen. Die maßliche Erfassung innerhalb der Formeinsatzherstellung hat eine Bauteilkonturabhängigkeit aufgrund der thermischen Ausdehnung und des Quellens des Resists (PMMA) während der Galvanoformung nachgewiesen. Die Abweichung der gemessenen Formeinsatzstrukturen (kreisrunde Säulen und Lochstrukturen mit Durchmessern zwischen $200 \mu\text{m}$ und $2.442 \mu\text{m}$) zum Sollwert liegt in einem Bereich zwischen $-2,3 \mu\text{m}$ und $+3,8 \mu\text{m}$. Die messtechnisch erfassten Abweichungen der mikrospritzgegossenen Bauteile (an kreisrunden Bauteilkonturen: Säulen mit Durchmesser $560 \mu\text{m}$ und Löchern mit Durchmesser $580 \mu\text{m}$) aus Polyoxymethylen (POM *Hostaform*® *C9021*) zeigen einen reproduzierbaren Abformprozess auf und führen zu Werten für die thermische Schwindung von $1,6 \%$ für die Säulenstrukturen und $2,4 \%$ für die Lochstrukturen. Diese Werte liegen nahe dem im Datenblatt der Formmasse für die thermische Schwindung angegebenen Wert von $1,8 \%$.

Basierend auf den genannten Ergebnissen und Erfahrungen ist zusätzlich ein neues Werkzeugkonzept erarbeitet und realisiert worden, das die zuvor in der Prozessentwicklung des LIGA2.X-Mikrospritzgießprozesses aufgetretenen Probleme bei der Formteiltrennung vom Anguss (durch die auswerferlose Entformung über Abreißen) lösen kann. Das Werkzeug beinhaltet ein zum Patent angemeldetes innovatives Drehkonzept, welches in zukünftigen Arbeiten erprobt und qualifiziert werden muss.

Durch die erfolgreiche Entwicklung eines Verfahrens, das die industrietaugliche Fertigung von polymeren LIGA-Mikrobauteilen über das Mikrospritzgießen ermöglicht, konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Gesamtziel des Projektes nachdrücklich erreicht werden.

Das LIGA2.X-Verfahren steht jetzt dem KIT als fortschrittliches Herstellungsverfahren in der Mikrosystemtechnik zur Verfügung, sollte jedoch zukünftig einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess unterzogen und im Rahmen von konkreten industriellen Anwendungen weiter optimiert werden.

Im Hinblick auf einen routinemäßigen Einsatz des hier entwickelten Verfahrens zur industriellen Massenfertigung von endkonturnahen Mikrobauteilen ist eine weitere Erhöhung des Automatisierungsgrades erforderlich. Dazu zählen weitere Untersuchungen in der LIGA-Formeinsatzherstellung, wie zum Beispiel die Minimierung der Ausfallrate bei der Herstellung von kreisrunden Säulen in der Nickelgalvanik, die Erfassung von Messwerten sowie deren Auswertung und Implementierung in einer Datenbank, welche in der Zukunft zu einer Konstruktionshilfe für LIGA-Strukturen führen kann. Beim Mikrospritzgießen sollte vor allem die Entnahme der Mikrobauteile über kommerziell erhältliche Handlingsmodule implementiert und qualifiziert werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Ebert, K. H.; Ammer, D.; Hoffstetter, M.; Wintermantel, E. (2008): Mikrospritzgießen. In: *Medizintechnik Life Science Engineering*: Springer Berlin Heidelberg, S. 615–637. DOI: 10.1007/978-3-540-74925-7_27.
- [2] Becker, E. W.; Ehrfeld, W.; Münchmeyer, D.; Betz, H.; Heuberger, A.; Pongratz, S. et al. (1982): Production of separation-nozzle systems for uranium enrichment by a combination of X-ray lithography and galvanoplastics. In: *Naturwissenschaften* 69 (11), S. 520–523. DOI: 10.1007/bf00463495.
- [3] SFB 499: Homepage des Sonderforschungsbereich SFB 499. Online verfügbar unter <http://www.sfb499.de/>, zuletzt geprüft am 01.07.2014.
- [4] Prokop, J. (2010): Entwicklung von Spritzgießsonderverfahren zur Herstellung von Mikrobauteilen durch galvanische Replikation. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau.
- [5] Hansen, H. N.; Arentoft, M.; Tang, P. T.; Bissacco, G.; Tosello, G. (2009): Tooling Process Chains and Concepts. In: *Micromanufacturing Engineering and Technology*, S. 287–297. ISBN: 978-0-8155-1545-6.
- [6] Masuzawa, T. (2000): State of the Art of Micromachining. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 49 (2), S. 473–488. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63451-9.
- [7] Chae, J.; Park, S. S.; Freiheit, T. (2006): Investigation of micro-cutting operations. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (3–4), S. 313–332. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2005.05.015.

- [8] Performance Micro Tool: Product Catalog. Online verfügbar unter <http://www.pmtnow.com/pdf/2012-PMT-Catalog.pdf>, zuletzt geprüft am 21.05.2014.
- [9] Egashira, K.; Hosono, S.; Takemoto, S.; Masao, Y. (2011): Fabrication and cutting performance of cemented tungsten carbide micro-cutting tools. In: *Precision Engineering* 35 (4), S. 547–553. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2011.06.002.
- [10] Fleischer, J.; Masuzawa, T.; Schmidt, J.; Knoll, M. (2004): New applications for micro-EDM. In: *Journal of Materials Processing Technology* 149 (1–3), S. 246–249. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.012.
- [11] Kern Microtechnik GmbH (2014): Kern Micro - Die Kompakte. Online verfügbar unter http://www.kern-microtech-nic.com/upload/media/kern_micro_pdf_deutsch.pdf, zuletzt geprüft am 21.05.2014.
- [12] Kugler GmbH (2014): Mikrobearbeitungszentren. Online verfügbar unter <http://www.kugler-precision.com/index.php?Mikrobearbeitungszentren>, zuletzt geprüft am 21.05.2014.
- [13] DMG MORI SEIKI Europe AG (2014): HSC 70 linear. Online verfügbar unter <http://de.dmgmori.com/produkte/fraemaschinen/high-speed-cutting-praezisionszentren/hsc/hsc-70-linear>, zuletzt geprüft am 21.05.2014.
- [14] Nano Corporation Ltd (2014): Super-small precision milling machine NANOWAVE MTS5R. Online verfügbar unter <http://nanowave-mts.com/product/mts5r.html>, zuletzt geprüft am 21.05.2014.

- [15] Okazaki, Y.; Mishima, N.; Ashida, K. (2005): Microfactory—Concept, History, and Developments. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126 (4), S. 837–844. DOI: 10.1115/1.1823491.
- [16] Li, H.; Lai, X.; Li, C.; Lin, Z.; Miao, J.; Ni, J. (2008): Development of meso-scale milling machine tool and its performance analysis. In: *Front. Mech. Eng. China* 3 (1), S. 59–65. DOI: 10.1007/s11465-008-0005-6.
- [17] Fleischer, J.; Kotschenreuther, J. (2007): The manufacturing of micro molds by conventional and energy-assisted processes. In: *Int J Adv Manuf Technol* 33 (1-2), S. 75–85. DOI: 10.1007/s00170-006-0596-1.
- [18] Ho, K. H.; Newman, S. T. (2003): State of the art electrical discharge machining (EDM). In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (13), S. 1287–1300. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00162-7.
- [19] Zeller, F.; Hösel, T.; Müller, C.; Reinecke, H. (2013): Microstructuring of non-conductive silicon carbide by electrical discharge machining. In: *Microsyst Technol*, S. 1–6. DOI: 10.1007/s00542-013-1965-y.
- [20] Uhlmann, E.; Piltz, S.; Doll, U. (2005): Machining of micro/miniature dies and moulds by electrical discharge machining—Recent development. In: *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2–3), S. 488–493. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.013.
- [21] Egashira, K.; Morita, Y.; Hattori, Y. (2010): Electrical discharge machining of submicron holes using ultrasmall-diameter electrodes. In: *CIRP-CAT 2007* 34 (1), S. 139–144. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2009.05.007.

- [22] Tosello, G.; Bissacco, G.; Tang, P. T.; Hansen, H. N.; Nielsen, P. C. (2008): High aspect ratio micro tool manufacturing for polymer replication using μ EDM of silicon, selective etching and electroforming. In: *Microsyst Technol* 14 (9-11), S. 1757–1764. DOI: 10.1007/s00542-008-0564-9.
- [23] Egashira, K.; Taniguchi, T. (2006): Planetary EDM of Micro Holes. In: *International Journal of Electrical Machining* 11, S. 15–18.
- [24] McGeough, J. A.; Leu, M. C.; Rajurkar, K. P.; De Silva, A. K. M.; Liu, Q. (2001): Electroforming Process and Application to Micro/Macro Manufacturing. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50 (2), S. 499–514. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62990-4.
- [25] Jelinek, T. W. (2013): Praktische Galvanotechnik. Ein Lehr- und Handbuch; mit 96 Tabellen im Text, einem speziellen Tabellen-Anhang und einer Übersicht Chemikalien für die Galvanotechnik. 7., aktualisierte Aufl. Bad Saulgau: Leuze (Lehrbuchreihe Galvanotechnik). ISBN: 978-3-87480-277-2.
- [26] Elsässer GmbH (2014). Online verfügbar unter <http://www.elsaesser.com/index.php?id=22>, zuletzt geprüft am 16.07.2014.
- [27] Sander, D.; Hoffmann, R.; Reiling, V.; Muller, J. (1995): Fabrication of metallic microstructures by electroplating using deep-etched silicon molds. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 4 (2), S. 81–86. DOI: 10.1109/84.388116.
- [28] Johansen, L. S.; Ginnerup, M.; Ravnkilde, J. T.; Tang, P. T.; Löchel, B. (2000): Electroforming of 3D microstructures on highly structured surfaces. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 83 (1–3), S. 156–160. DOI: 10.1016/S0924-4247(00)00346-0.

- [29] Mappes, T.; Worgull, M.; Hecke, M.; Mohr, J. (2008): Submicron polymer structures with X-ray lithography and hot embossing. In: *Microsyst Technol* 14 (9-11), S. 1721–1725. DOI: 10.1007/s00542-007-0499-6.
- [30] Son S. H.; Park, S.; Lee, W.; Lee, H. (2013): Manufacture of μ -PIM gear mold by electroforming of Fe–Ni and Fe–Ni–W alloys. In: *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 23 (2), S. 366–371. DOI: 10.1016/S1003-6326(13)62471-1.
- [31] Heneka, J.; Guttman, M.; Plewa, K.; Hanemann, T.; Mohr, J.; Saile, V. (2013): LIGA2.X Process for a Cost-Effective Mass Production of Single Polymeric LIGA Micro Parts. In: 10th International Workshop on High Aspect Ratio Micro and Nano System Technology (HARMST). Berlin, S. 83–84.
- [32] Schulz, J.; Bade, K.; Guttman, M.; Hahn, L.; Janssen, A.; Köhler, U. et al. (2004): Ensuring repeatability in LIGA mold insert fabrication. In: *Microsystem Technologies* 10 (5), S. 419-422. DOI: 10.1007/s00542-004-0424-1.
- [33] van Erps, J.; Wissmann, M.; Guttman, M.; Hartmann, M.; Mohr, J.; Debaes, C.; Thienpont, H. (2008): Hot Embossing of Microoptical Components Prototyped by Deep Proton Writing. In: *Photonics Technology Letters, IEEE* 20 (18), S. 1539–1541. DOI: 10.1109/lpt.2008.928836.
- [34] Tanabe, Y.; Nishikawa, H.; Seki, Y.; Satoh, T.; Ishii, Y.; Kamiya, T. et al. (2011): Electroforming of Ni mold for imprint lithography using high-aspect-ratio PMMA microstructures fabricated by proton beam writing. In: *Proceedings of the 36th International Conference on Micro- and Nano-Engineering (MNE) 36th International Conference on Micro- and Nano-Engineering (MNE)* 88 (8), S. 2145–2148. DOI: 10.1016/j.mee.2011.01.019.

- [35] Prokop, J.; Heneka, J.; Lorenz, J.; Moehwald, K.; Piotter, V.; Ritzhaupt-Kleissl, H.-J. et al. (2010): How mold inserts influence the replication of metallic microparts produced by electroplating into two-component templates. In: *Microsyst Technol* 16 (8-9), S. 1413–1418. DOI: 10.1007/s00542-010-1048-2.
- [36] Menz, W.; Mohr, J.; Oliver P. (2005): *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*. Weinheim: WILEY-VCH. ISBN: 3-527-30536-X.
- [37] Bacher, W.; Menz, W.; Mohr, J. (1994): The LIGA technique and its potential for microsystems. In: Bd. 3. *Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1994. IECON '94.*, 5-9 Sep 1994, S. 1466-1471 vol.3. DOI: 10.1109/IECON.1994.398030.
- [38] Menz, W.; Bacher, W.; Harmening, M.; Michel, A. (1991): The LIGA technique-A novel concept for microstructures and the combination with Si-technologies by injection molding. In: *Micro Electro Mechanical Systems, 1991, MEMS '91, Proceedings. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots*. IEEE, 30 Jan-2 Feb 1991, S. 69–73. DOI: 10.1109/MEMSYS.1991.114771
- [39] Bericht KFK 4832 (1991): *Ergebnissbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten 1990*. Kernforschungszentrum Karlsruhe. Institut für Mikrostrukturtechnik.
- [40] Strohrmann, M.; Bley, P.; Fromhein, O.; Mohr, J. (1994): Acceleration sensor with integrated compensation of temperature effects fabricated by the LIGA process. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 42 (1–3), S. 426–429. DOI: 10.1016/0924-4247(94)80026-X.
- [41] Mohr, J.; Burbaum, C.; Bley, P.; Menz, W.; Wallrabe, U. (1990): Movable Microstructures Manufactured by the LIGA Process as Basic Elements for Microsystems. In: H. Reichl (Hg.): *Micro System Technologies 90*: Springer Berlin Heidelberg, S. 529–537.

- [42] Saile, V. (2009): Introduction: LIGA and Its Applications. In: *LIGA and Its Applications: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, S. 1–10. DOI: 10.1002/9783527622573.ch1.
- [43] Leßmöllmann, C. (1992): *Fertigungsgerechte Gestaltung von Mikrostrukturen für die LIGA-Technik*. Dissertation. Karlsruhe, Universität, Karlsruhe.
- [44] Gengenbach, U.; Sieber, I.; Wallrabe, U. (2009): Design for LIGA and Safe Manufacturing. In: *LIGA and its Applications*, S. 143–188. DOI: 10.1002/9783527622573.ch6.
- [45] Meyer, P. (2012): Fast and accurate X-ray lithography simulation enabled by using Monte Carlo method. New version of DoseSim. A software dedicated to deep X-ray lithography (LIGA). In: *Microsystem Technologies* 18 (12), S. 1971–1980.
- [46] Meyer, P.; Claverley, J.; Leach, R. (2012): Quality control for deep x-ray lithography (LIGA). A preliminary metrology study. In: *Microsyst Technol* 18 (4), S. 415–421. DOI: 10.1007/s00542-012-1448-6.
- [47] Malek, C. K.; Saile, V. (2004): Applications of LIGA technology to precision manufacturing of high-aspect-ratio micro-components and -systems. A review. In: *Microelectronics Journal* 35 (2), S. 131–143. DOI: 10.1016/j.mejo.2003.10.003.
- [48] Wallrabe, U.; Saile, V. (2006): LIGA Technology for R&D and Industrial Applications. In: J. Korvink und O. Paul (Hg.): *MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications*: Springer Berlin Heidelberg, S. 853–899.
- [49] Lorenz, H.; Despont, M.; Fahrni, N.; Brugger, J.; Vettiger, P.; Renaud, P. (1998): High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 64 (1), S. 33–39. DOI: 10.1016/S0924-4247(98)80055-1.

- [50] Fu, C.; Huang, H. (2007): Different methods for the fabrication of UV-LIGA molds using SU-8 with tapered de-molding angles 13 (3-4), S. 293–298. DOI: 10.1007/s00542-006-0197-9.
- [51] Genolet, G. (2013): LIGA and challenges of commercialization - it can be successful. In:; Bd. 10. 10th International Workshop on High Aspect Ratio Micro and Nano System Technology (HARMST). Berlin.
- [52] Staab, M.; Greiner, F.; Schlosser, M.; Schlaak, H. F. (2011): Applications of Novel High-Aspect-Ratio Ultrathick UV Photoresist for Microelectroplating. In: *Journal of Microelectrochemical Systems* 20 (4), S. 794–796. DOI: 10.1109/jmems.2011.2159098.
- [53] Young-Min, S.; Gamzina, D.; Barnett, L. R.; Yaghmaie, F.; Baig, A.; Luhmann, N. C. (2010): UV Lithography and Molding Fabrication of Ultrathick Micrometallic Structures Using a KMPP Photoresist. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 19 (3), S. 683–689. DOI: 10.1109/jmems.2010.2045880.
- [54] temicon GmbH (2014): temicon GmbH Homepage. Online verfügbar unter www.temicon.com, zuletzt geprüft am 01.07.2014.
- [55] Mimotec SA (2014): Mimotec SA. Online verfügbar unter <http://mimotec.ch/>, zuletzt geprüft am 04.06.2014.
- [56] Johannaber, F.; Michaeli, W. (2004): Handbuch Spritzgießen. 2. Aufl. München: Hanser. ISBN: 3-446-22966-3.
- [57] Worgull, M. (2009): Hot embossing. Theory and technology of microreplication. Oxford, UK [u.a.]: William Andrew (Micro & nano technologies ; 7). ISBN: 978-0-8155-1579-1 0-8155-1579-0.

- [58] Hecke, M.; Schomburg, W. K. (2004): Review on micro molding of thermoplastic polymers. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 14 (3), S. R1-R14.
- [59] Last, A. (2002): Viel Farbe aus wenig Licht: Mikrospektrometer. In: *Physik in unserer Zeit* 33 (2), S. 56–59. DOI: 10.1002/1521-3943(200203)33:2<56::AID-PIUZ56>3.0.CO;2-F.
- [60] Horst Scholz GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <http://www.scholz-htik.de/medizintechnik/produkte.html>, zuletzt geprüft am 03.06.2014.
- [61] Ruprecht, R.; Gietzelt, T.; Müller, K.; Piottter, V.; Haußelt, J. (2002): Injection molding of microstructured components from plastics, metals and ceramics. In: *Microsyst Technol* 8 (4-5), S. 351–358. DOI: 10.1007/s00542-001-0153-7.
- [62] Piottter, V.; Mueller, K.; Plewa, K.; Ruprecht, R.; Hausselt, J. (2002): Performance and simulation of thermoplastic micro injection molding. In: *Microsystem Technologies* 8 (6), S. 387-390. DOI: 10.1007/s00542-002-0178-6.
- [63] Jaroschek, C. (2013): Spritzgießen für Praktiker. 3., aktualis. u. erw. Aufl. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://swb.bsz-bw.de/DB=2.1/PPN?PPN=379687615>. ISBN: 3-446-43360-0.
- [64] Beaumont, J. P. (2012): Auslegung von Anguss und Angusskanal. Spritzgießwerkzeuge erfolgreich einsetzen. München: Hanser. ISBN: 978-3-446-42759-4 3-446-42759-7.
- [65] Michaeli, W.; Klaiber, F.; Schöngart, M. (2010): Variotherme Temperierung mit Laserstrahlung. In: *Kunststoffe* (8), S. 66–70.
- [66] Deckert, H. D. (2012): Beitrag zur Entwicklung eines hochdynamischen variothermen Temperiersystems für Spritzgießwerkzeuge. 48155 Münster: Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG. ISBN: 978-3-941003-64-4.

- [67] Xie, L.; Ziegmann, G. (2008): A visual mold with variotherm system for weld line study in micro injection molding. In: *Microsyst Technol* 14 (6), S. 809-814. DOI: 10.1007/s00542-008-0566-7.
- [68] Schinköthe, W.; Zülch, M. (2009): Temperierung von Spritzgusswerkzeugen durch vollständige integrierte induktive Beheizung. Abschlußbericht DFG-Forschungsvorhaben SCHI 457/9. Universität Stuttgart. Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF).
- [69] Gornik, C. (2004): Injection Moulding of Parts with Microstructured Surfaces for Medical Applications. In: *Macromol. Symp.* 217 (1), S. 365–374. DOI: 10.1002/masy.200451332.
- [70] Piotter, V.; Hanemann, T.; Ruprecht, R.; Haußelt, J. (1997): Injection molding and related techniques for fabrication of microstructures. In: *Microsystem Technologies* 3 (3), S. 129-133. DOI: 10.1007/s005420050069.
- [71] Griffiths, C. A.; Dimov, S. S.; Brousseau, E. B.; Hoyle, R. T. (2007): The effects of tool surface quality in micro-injection moulding. In: *Journal of Materials Processing Technology* 189 (1–3), S. 418–427. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.02.022.
- [72] Worgull, M. (2003): Analyse des Mikro-Heißprägeverfahrens. Dissertation. Universität Karlsruhe. Institut für Mikrostrukturtechnik.
- [73] Guo, Y.; Liu, G.; Xiong, Y.; Tian, Y. (2007): Study of the demolding process—implications for thermal stress, adhesion and friction control. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17 (1), S. 9. Online verfügbar unter <http://stacks.iop.org/0960-1317/17/i=1/a=002>.

- [74] Worgull, M.; Heckeke, M.; Schomburg, W. K. (2005): Large-scale hot embossing. In: *Microsyst Technol* 12 (1-2), S. 110-115. DOI: 10.1007/s00542-005-0012-z.
- [75] Wittmann Battenfeld GmbH: Microsystem 50. Online verfügbar unter http://www.battenfeld.ru/fileadmin/templates/docs/imm/microsystem_presentation.pdf, zuletzt geprüft am 04.12.2012.
- [76] Wittmann Battenfeld GmbH: MicroPower 5 – 15 t. Online verfügbar unter <http://www.wittmann-group.com/injection-molding/electric/micropower-5-15.html>, zuletzt geprüft am 28.07.2014.
- [77] Otto Männer GmbH (2012): männer micro-män 50. Vollelektrische Mikrospritzgießsystem. Online verfügbar unter <http://www.maenner-group.com/text2/233/de/heisskanal/micro-molding-systems/micro-maen-50.html>, zuletzt geprüft am 14.05.2013.
- [78] ARBURG GmbH Co KG: Micro-injection module. Online verfügbar unter http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Prospekte/ARBURG_micro_en_GB.pdf, zuletzt geprüft am 04.12.2012.
- [79] Young, W.-B. (2005): Effect of process parameters on injection compression molding of pickup lens. In: *Applied Mathematical Modelling* 29 (10), S. 955–971. DOI: 10.1016/j.apm.2005.02.004.
- [80] Wu, C.-H.; Chen, W.-S. (2006): Injection molding and injection compression molding of three-beam grating of DVD pickup lens. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 125 (2), S. 367–375. DOI: 10.1016/j.sna.2005.07.025.

- [81] Katoh, T.; Tokuno, R.; Zhang, Y.; Abe, M.; Akita, K.; Akamatsu, M. (2008): Micro injection molding for mass production using LIGA mold inserts. In: *Microsyst Technol* 14 (9-11), S. 1507-1514. DOI: 10.1007/s00542-007-0533-8.
- [82] Despa, M. S.; Kelly, K. W.; Collier, J. R. (1999): Injection molding of polymeric LIGA HARMS. In: *Microsystem Technologies* 6 (2), S. 60-66. DOI: 10.1007/s005420050176.
- [83] Wallrabe, U.; Dittrich, H.; Friedsam, G.; Hanemann, Th.; Mohr, J.; Müller, K. et al. (2002): Micromolded easy-assembly multi fiber connector: RibCon®. In: *Microsystem Technologies* 8 (2-3), S. 83-87. DOI: 10.1007/s00542-001-0140-z.
- [84] Dunkel K.; H.-D. Bauer; W. Ehrfeld; J. Hoßfeld; L. Weber; G. Hörcher; G. Müller (1998): Injection-moulded fibre ribbon connectors for parallel optical links fabricated by the LIGA technique. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 8 (4), S. 301–306. Online verfügbar unter <http://stacks.iop.org/0960-1317/8/i=4/a=007>.
- [85] Saile, V.; Wallrabe, U.; Tabata, O.; Korvink, J. G. (2009): Advanced Micro and Nanosystems, Volume 7 - LIGA and its Applications: John Wiley & Sons. ISBN: 978-3-527-31698-4.
- [86] Werner Götz (2004): Mikrospritzguss mit dem Microsystem von Battenfeld. Zwergenprozession. Hg. v. Plastverarbeiter 55 Jahrgang (2004) Nr 1. Online verfügbar unter http://www.scholzhhtik.de/fileadmin/downloads/presse_battenfeld_01-04.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2014.
- [87] Bourdon, R.; RKT Rödinger Kunststoff-Technik GmbH: Miniaturization and Microstructures in Tooling and Moulding. Online verfügbar unter

- http://media.nmm.de/06/mi_v10_rodinger_16305306.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2014.
- [88] Berliner Elektronenspeicherung-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung m.b.H. BESSY: Anwenderzentrum für Mikrotechnik (AZM). Online verfügbar unter https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/oea/web/pr_webseite/druckschriften/info_s/bessy/azm_imagefolder_2007.pdf, zuletzt geprüft am 28.07.2014.
- [89] National University of Singapore: Singapore Synchrotron Light Source. LiMiNT - Lithography for Micro- and NanoTechnology. Online verfügbar unter <http://ssls.nus.edu.sg/facility/limint.html>, zuletzt geprüft am 28.07.2014.
- [90] U.S. Department of Energy Office of Science by Lawrence Berkeley National Laboratory: Advanced Light Source. Beamline 3.2.1 Commercial deep-etch x-ray lithography (LIGA). Online verfügbar unter <http://www-als.lbl.gov/index.php/holding/97-321.html>, zuletzt geprüft am 28.07.2014.
- [91] Center for Advanced Microstructures & Devices; Louisiana State University: Beamlines. Online verfügbar unter <http://www.camd.lsu.edu/beamlines.htm>, zuletzt geprüft am 28.07.2014.
- [92] KIT: X-ray Lithography. Online verfügbar unter <http://www.anka.kit.edu/1354.php>, zuletzt geprüft am 28.07.2014.
- [93] Guttman, M. (2009): Metallabscheidung. SFB 499-Abschlussbericht. Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) (PB 202-93).

- [94] Wulfsberg, J. P.; Lehmann, J. (2003): Spanntechnik für die Mikrofertigung. In: *Werkstatttechnik online* (03-2003).
- [95] Gietzelt, T.; Schulz, J. (2012): Neues Verfahren zur Herstellung keramischer Mikrobauteile aus Zirkonoxid durch Mikropulver-spritzgießen. In: *Galvanotechnik* 3/2012.
- [96] Honza, E.; Kruchem, M.; Plewa, K.; Piotter, V. (2012): A comparative study of Micro Powder Injection Moulding (MicroPIM) and simultaneous Micro Powder Injection Compression Moulding (MicroPICM). In: *Powder Injection Moulding International* 6 (2).
- [97] Kolew, A. (2012): Heißprägen von Verbundfolien für mikrofluidische Anwendungen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (Schriften des Instituts für Mikrostrukturtechnik am Karlsruher Institut für Technologie). ISBN: 978-3-86644-888-9.
- [98] Heneka, J.; Guttman, M.; Plewa, K.; Mohr, J.; Hanemann, T.; Saile, V. (2013): "LIGA2.X" process for mass production of single polymeric LIGA micro parts. In: *Microsyst Technol*, S. 1–6. DOI: 10.1007/s00542-013-2015-5.
- [99] ANKA Synchrotron Radiation Facility (2013): ANKA Instrumentation Book 2012. Online verfügbar unter https://www.anka.kit.edu/downloads_anka/instrumentation_books/Instrumentationbook-2012.pdf, zuletzt geprüft am 01.07.2014.
- [100] Tabata, O.; You, H.; Matsuzuka, N.; Yamaji, T.; Uemura, S.; Dama, I. (2002): Moving mask deep X-ray lithography system with multi stage for 3-D microfabrication. In: *Microsyst Technol* 8 (2-3), S. 93–98. DOI: 10.1007/s00542-001-0168-0.
- [101] Kenntner, J. (2013): Herstellung von Gitterstrukturen mit Aspektverhältnis 100 für die Phasenkontrastbildung in einem Talbot-Interferometer. Karlsruher Institut für Technologie.

Schriften des Instituts für Mikrostrukturtechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

- [102] Guttman, M.; Schulz, J.; Saile, V. (2005): Lithographic fabrication of Mold Inserts. In: *Advanced Micro and Nanosystems, Vol. 3, Microengineering of Metals and Ceramics*, S. 187–219.
- [103] Achenbach, S.; Boerner, M.; Kinuta, S.; Bacher, W.; Mohr, J.; Saile, V.; Saotome, Y. (2007): Structure quality in deep X-ray lithography applying commercial polyimide-based masks. In: *Microsyst Technol* 13 (3), S. 349–353. DOI: 10.1007/s00542-006-0223-y.
- [104] KIT: ANKA - die Synchrotronstrahlungsquelle am KIT. Online verfügbar unter <http://www.anka.kit.edu/2184.php>, zuletzt geprüft am 14.01.2014.
- [105] KIT (2014): ANKA X-ray Lithography LIGA 1. Online verfügbar unter <http://www.anka.kit.edu/984.php>, zuletzt geprüft am 14.01.2014.
- [106] KIT: ANKA X-ray lithography LIGA 2. Online verfügbar unter <http://www.anka.kit.edu/985.php>, zuletzt geprüft am 14.01.2014.
- [107] Meyer, P.; Mäder, O.; Saile, V.; Schulz, J. (2009): Comparison of measurement methods for microsystem components. Application to microstructures made by the deep x-ray lithography process (x-ray LIGA). In: *Measurement Science and Technology* 20 (8). DOI: 10.1088/0957-0233/20/8/084024.
- [108] Mäder, O.; Meyer, P.; Saile, V.; Schulz, J. (2009): Metrology study of high precision mm parts made by the deep x-ray lithography (LIGA) technique. In: *Measurement Science and Technology* 20 (2). DOI: 10.1088/0957-0233/20/2/025107.

- [109] Gondik, S. L. (1962): Microscope for measuring small diameter holes and their concentricity. In: *Meas Tech* 5 (8), S. 648–649. DOI: 10.1007/bf01008413.
- [110] Loechel, B.; Goettert, J.; Gruetzner, G.; Bednarzik, M.; Waberski, C.; Ahrens, G. et al. (2008): Extreme aspect ratio NiFe gear wheels for the production of commercially available Micro Harmonic Drive® gears. In: *Microsyst Technol* 14 (9-11), S. 1675–1681. DOI: 10.1007/s00542-008-0607-2.
- [111] Griffiths, S. K.; J. A. W. Crowell; Kistler, B. L.; Dryden, A. S. (2004): Dimensional errors in LIGA-produced metal structures due to thermal expansion and swelling of PMMA. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 14 (11), S. 1548–1557.
- [112] Ruzzu, A.; Matthis, B. (2002): Swelling of PMMA-structures in aqueous solutions and room temperature Ni-electroforming. In: *Microsystem Technologies* 8 (2-3), S. 116-119. DOI: 10.1007/s00542-001-0138-6.
- [113] Malloy, Robert A. (2011): Plastic part design for injection molding. An introduction. 2. ed. Munich [u.a.]: Hanser. Online verfügbar unter <http://swb.bsz-bw.de/DB=2.1/PPN?PPN=260748137>. ISBN: 978-1-56990-436-7.
- [114] Gundlach, C. (2004): Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung. Kassel. Online verfügbar unter <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-068-6.volltext.frei.pdf>, zuletzt aktualisiert am 01.07.2014.
- [115] Ronniger, C. U.: Homepage CRGRAPH. Online verfügbar unter <http://crgraph.de/>, zuletzt geprüft am 01.07.2014.
- [116] Sartorius.AG: Die Basic^{plus}. Der Wägestandard im Labor. Online verfügbar unter <http://www.windaus.de/pdf/99/prbp.pdf>, zuletzt geprüft am 24.02.2014.

- [117] Norm DIN EN ISO 4288, 04-1998: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit.
- [118] Norm DIN EN ISO 3274, 04.1998: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten.
- [119] Fischer, Ulrich (Hg.) (2011): Tabellenbuch Metall. 45., neu bearb. u. erw. Aufl. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel (Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe). Online verfügbar unter <http://swb.bsz-bw.de/DB=2.1/PPN?PPN=347234720>.
- [120] Leyendecker, K.; Bacher, W.; Bade, K.; Stark, W. (1995): Untersuchungen zum Stofftransport bei der Galvanoformung von Li-GA-Mikrostrukturen. Wissenschaftlicher Bericht FZKA 5594. Forschungszentrum Karlsruhe. Institut für Mikrostrukturtechnik.
- [121] Evonik Röhm GmbH: Lieferprogramm Formmassen PLEXIGLAS® PLEXALLOY® PLEXIFIX® PLEXIMID® CYROLITE®. Online verfügbar unter http://www.plexiglas.de/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/PLEXIGLAS-Molding-Compounds/de/06094LPFormmassende_screen.pdf, zuletzt geprüft am 01.07.2014.
- [122] Chemie Wirtschaftsförderungs-GmbH: CAMPUS® Datenblatt PLEXIGLAS® 6N - PMMA Evonik Industries AG. Online verfügbar unter <http://www.campusplastics.com/material/pdf/203519/PLEXIGLAS6N?sLg=de>, zuletzt geprüft am 01.07.2014.

- [123] Michaeli, W.; Gärtner, R. (2006): New Demolding Concepts for the Injection Molding of Microstructures. In: *Journal of Polymer Engineering* Band 26 (Heft 2-4), S. 161–178. DOI: 10.1515/POLYENG.2006.26.2-4.161.
- [124] Spath, D.; Bös, K. (1994): Integration der Qualitäts- und Prüfplanung in die Produktentwicklung und Arbeitsplanung. VDI Bericht Nr. 1106 (1994). In: *VDI Berichte*, S. 335–351.
- [125] Fleischer, J.; Lanza, G. (2009): Qualitätsmangement. Skript der Vorlesung Qualitätsmanagement am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- [126] Temponi, C.; Yen, J.; Amos Tiao, W. (1999): House of quality: A fuzzy logic-based requirements analysis. In: *European Journal of Operational Research* 117 (2), S. 340–354. DOI: 10.1016/S0377-2217(98)00275-6.
- [127] Heneka, J.; Borens, S.; Prokop, J.: Verfahren und Vorrichtung für ein Mikrospritzgusswerkzeug. Veröffentlichungsnr: DE 10 2012 103 720 A1.
- [128] Krahn, H.; Eh, D.; Vogel, H. (2008): 1000 Konstruktionsbeispiele für den Werkzeug- und Formenbau beim Spritzgießen. 1. Aufl. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://swb.bsz-bw.de/DB=2.1/PPN?PPN=265816017>. ISBN: 3-446-41243-3.
- [129] Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co KG: DC- Kleinstmotoren 41 mNm. Serie 3242 ... CR. Online verfügbar unter https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/DE_3242_CR_DFF.PDF, zuletzt geprüft am 01.07.2014.

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Darstellung der Herstellverfahren für metallische 2,5D und 3D μ -Formeinsatzkavitäten.	6
Abb. 2.2:	Aufteilung der Mikroreplikationsverfahren nach deren charakteristischen Temperaturbereichen bei der Verarbeitung von polymerer Formmasse	15
Abb. 2.3:	Schematische Darstellung der drei wesentlichen Prozessschritte im Standardspritzgießprozess	18
Abb. 2.4:	Charakteristischer Verlauf des Werkzeuginnendruckes während eines Spritzgießzyklus.....	19
Abb. 2.5:	Schematische Darstellung des Werkzeugtemperaturverlaufs bei vario-thermer Prozessführung.....	20
Abb. 2.6:	Schematische Darstellung unterschiedlicher Kavitätsqualitäten hinsichtlich ihrer Entformungseigenschaften (1 Kavität mit glatten Seitenwänden und Entformungsschrägen ► sehr gute Entformungseigenschaften; 2 glatte und lotrechte Seitenwände ► gute Entformungseigenschaften; 3 glatte Seitenwände und Hinterschnitt der Seitenwände ► schlechte Entformungseigenschaften (bei zu großer Abweichung von der Lotrechten keine Entformung möglich); 4 Hinterschnitte durch Riefen oder Beschädigungen ► schlechte bis sehr schlechte Entformungseigenschaften abhängig von der Tiefe und Häufigkeit der Hinterschnitte)	22
Abb. 2.7:	Schematische Darstellung der charakteristischen Prozessschritte des Spritzprägezykluses unter Verwendung eines Tauchkantenwerkzeuges	26

- Abb. 3.1: **a** Drittes und letztes Formeinsatz-Layout im SFB 499 mit 593 Strukturelementen auf der stukturierbaren Fläche von 60 mm x 20 mm; **b** Verwendbarer LIGA-Formeinsatz im SFB 499 28
- Abb. 3.2: Abbildung eines SFB 499 Abformteils aus Polycarbonat (PC) sowie Darstellung der Strukturqualität abhängig von der Position auf der Trägerplatte 32
- Abb. 3.3: Schematischer Ablauf des LIGA2.X-Prozesses 34
- Abb. 3.4: **a** 2D Skizze der Außenkontur einer Puzzle-Struktur; **b** 2D Skizze eines zylindrischen Strukturelements innerhalb der Außenkontur; **c** Fertiges Bauteil im 3D-CAD 37
- Abb. 3.5: **a** Füllstudie mit dem Spritzgießsimulationsprogramm *Sigmasoft*[®] zur Optimierung der Einspritzpunktlage auf dem Bauteil; **b** Festlegung des späteren Einspritzpunktes in der 2D Skizze des Bauteils 38
- Abb. 3.6: **a** Formeinsatz-Dummy, dient als Grundlage zur Erstellung der virtuellen LIGA2.X-Formeinsätze; **b** 3D Modell des zu erzeugenden Bauteils; **c** Bemaßung des Formeinsatzdummys für Bauteile mit maximalen lateralen Dimensionen kleiner 2,5 mm; **d** Kombination aus a und c zum fertigen, virtuellen Formeinsatz 39
- Abb. 3.7: Skizze zum Vorgehen bei der virtuellen Anordnung der Bauteile, Hilfsstrukturen und Referenzstrukturen auf dem Substrat mit Hilfe eines Positionsgitters 42
- Abb. 3.8: 3D-CAD-Modell der virtuell erstellten NISP vor der Formeinsatzherstellung 42
- Abb. 3.9: **a** 2D-CAD-Layout im .dxf-Format als Grundlage für die Umwandlung in ein E-Beam-kompatibles-Format; **b** Detailansicht in der .dxf-Datei; **c** 2D Layout umgewandelt in ein .gds-Format (hier werden die im .dxf-Format definierten Strukturen in Flächen umgewandelt), **d** Detailansicht einer Struktur im E-

Beam-Format, in denen Flächenbereiche in verschiedene Bereiche mit unterschiedlicher Schreibstrategien (Grob- bzw. Feinlayer) eingeteilt werden.....	43
Abb. 3.10: a Siliziumwafer mit Goldabsorberstrukturen; b Zwischenmaske während des Aushärtens des Klebstoffes zum Aufkleben des Maskenrahmens, c Fertige Zwischenmaske, d REM-Aufnahme einer Struktur auf der Maskenmembran.....	46
Abb. 3.11: a Arbeitsmaske, hergestellt, mit 4 “-Siliziumwafer als Substrat (AM SI); b REM-Aufnahme einer Goldabsorberstruktur auf der Maskenmembran	48
Abb. 3.12: a Arbeitsmaske hergestellt mit Invarsubstrat (AM IN); b REM-Aufnahme einer Goldabsorberstruktur auf der Maskenmembran, c Nasschemisches Ätzen des Invar zur Freilegung der Maskenmembran, d Fertig geätzte Arbeitsmaske mit freiliegender Maskenmembran.....	49
Abb. 3.13: a Kleberoboter für das reproduzierbare Aufkleben der PMMA-Resistplättchen auf das Kupfer-Substrat; b Halterungen des <i>JenOptik DexKFK</i> Röntgenscanners mit eingebauter Arbeitsmaske und Substrat; c Entwickelte Resiststrukturen; d Puzzlestruktur nach der Freientwicklung.....	51
Abb. 3.14: a NISP bei der Entfernung der Ti/TiO _x Galvanikstartschicht über nasschemisches Ätzen; b NISP nach der Entfernung des Resists.....	52
Abb. 3.15: Darstellung des für die Vereinzelung von LIGA2-X-Formeinsätzen entwickelten Prozesses: a NISP mit geschützten Strukturen; b Antasthilfe; c Erfassen der Position der Strukturen in x-, y- und z-Richtung; d Hinterseite der aufgespannten Nickelstrukturplatte mit eingebrachten M1,6 Gewinden; e Umgespannte NISP (Vorderseite) in eine speziell	

	gefertigte Spannvorrichtung; f Eingespannte Nickelstrukturplatte mit aufgesetzter Antasthilfe zur Erfassung der Position der Strukturen in x- und y-Richtung; g Fräsen der ersten Stufe; h Fertig gefräste NISP mit den Stufen \varnothing 3 mm /1,5 mm tief sowie der Startlöcher für den anschließenden Erodierprozess 56	56
Abb. 3.16:	a Vereinzlung der NISP über Drahterodieren; b Vermessen der erodierten Formeinsätze zur Bestimmung eines Korrekturfaktors für die weitere Vereinzlung 57	57
Abb. 3.17:	Darstellung der LIGA2.X-Formeinsätze..... 58	58
Abb. 3.18:	Schematische Skizze des LIGA2.X-Werkzeugkonzept für die MS 50..... 60	60
Abb. 3.19:	Darstellung des Werkzeugkonzeptes für die MS 50 61	61
Abb. 3.20:	Schematische Skizze des LIGA2.X-Werkzeugkonzeptes für die <i>micro-män</i> 50 62	62
Abb. 3.21:	Darstellung des Werkzeugkonzeptes für die <i>micro-män</i> 50..... 62	62
Abb. 3.22:	MS 50 2K-Mikrospritzgießsystem mit aufgebautem Werkzeug für die LIGA2.X-Abformungen 65	65
Abb. 3.23:	Beispiele für die auf den MS 50, hergestellten LIGA2.X-Abformteile 66	66
Abb. 3.24:	Schematische Darstellung des Entlüftungsvorganges während des LIGA2.X-Abformprozesses 67	67
Abb. 3.25:	<i>micro-män</i> 50 mit dem für die LIGA2.X-Abformungen verwendeten Werkzeug 69	69
Abb. 3.26:	Beispiele für abgeformte Bauteile mit dem <i>micro-män</i> 50 Mikrospritzgießsystem 70	70
Abb. 3.27:	a Angusssystem bei der Abformung mit der <i>micro-män</i> 50; b Angusssystem bei der Abformung mit der MS 50 72	72
Abb. 4.1:	a Messprinzip der CMM mit Fasertaster [107]; b Taktile Messung von Resiststrukturen (PMMA) mit der CMM (Werth Video Check IP-400) mit Fasertaster c	

	Aufnahme des Fasertasters in Eigenleuchtmodus bei der Messung einer \varnothing 200 μ m Resiststruktur (PMMA)	78
Abb. 4.2:	Ablaufdiagramm der quantitativen Messwerterfassung innerhalb der LIGA-Prozesskette: a Messwerterfassung innerhalb der NISP-Herstellung; b Messwerterfassung innerhalb der Replikation	84
Abb. 4.3:	a Planetengetriebe des LIGA2.0-Layouts; b Rotorstruktur des LIGA2.0-Layouts	85
Abb. 4.4:	Layout LIGA2.0 mit grün gekennzeichneten Strukturen, die für die Vermessung herangezogen wurden (Bp, Bn, Bl, Bd, Co, Db und Eo)	85
Abb. 4.5:	a Schematische Darstellung der NISP- / DLB-Herstellung; b : Aufnahme eines Direkt-LIGA-Bauteiles auf Kupfersubstrat (LIGA2.0); c Aufnahme einer NISP (LIGA2.0)	86
Abb. 4.6:	Schematische Darstellung der strukturabhängigen Abweichung, verursacht durch thermische Ausdehnung und Quellen (Feuchtigkeitsaufnahme) des PMMA-Resists (der untersuchten Getriebestrukturen). a für galvanisch erzeugte Säulenstrukturen und b für galvanisch erzeugte Lochstrukturen	89
Abb. 4.7:	Darstellung der messtechnisch ermittelten Daten der beiden Getriebestrukturen; Sonnenrad Bl (Diagramme: A1, A2 und A3); Hohlrad Bp (Diagramme: A2, B2 und C2)	91
Abb. 4.8:	Schematische Darstellung der bauteilkonturabhängigen Abweichung von Strukturseitenwänden in der Fertigung der NISP am Beispiel der beiden untersuchten Getriebestrukturen	94
Abb. 4.9:	Werte der Abweichungen der Strukturen auf den beiden vermessenen NISP-Proben und den beiden DLB-Proben	95

Abb. 4.10: Layout LIGA2.1 mit den in grün gekennzeichneten Strukturen, die für die Vermessung herangezogen wurden	98
Abb. 4.11: CAD-Darstellung der beiden Puzzleteile und der dazugehörigen LIGA2.X Formeinsätzen. Kennzeichnung der Messstellen sowie deren im Bauteildesign festgelegter Sollwert: a Puzzle-Verteilerstück; b Puzzle-Verbindungsstück	99
Abb. 4.12: Ergebnisdiagramme der vermessenen Formeinsatzkavitäten (A1,B1) sowie der abgeformten Bauteile (A2,B2) für die beiden Durchmesser 580 μm und 560 μm	101
Abb. 4.13: Ergebnisdiagramme der ermittelten Messwerte an den Formeinsätzen und Messstellen: a A7-S5; b A3-S1 ...	106
Abb. 4.14: Differenz der gemessenen Werte an den spritzgegossenen Bauteilen - den gemessenen Werten an den Formeinsatzstrukturen	107
Abb. 4.15: Gesamtverzug resultierend aus dem Spritzgießprozess POM <i>Hostaform® C9021</i> (verwendete Software <i>Sigmasoft®</i>); Puzzleverbindungsstück: a Gesamtverzugsergebnis; b Gesamtverzugsergebnis mit Multiplikationsfaktor 5	108
Abb. 5.1: Planmatrix und Antwortmatrix eines 2^3 -Versuchsplanes addiert mit drei Zentralpunktversuchen	116
Abb. 5.2: REM- und Fotoaufnahmen der Endlospuzzleteile (Formeinsätze und Formteile, Layout LIGA2.1)	118
Abb. 5.3: Darstellung der Ergebnisse der DOE mit Hilfe von Einflussdiagrammen	125
Abb. 5.4: Dokumentation des Qualitätsverlustes in der Konturgenauigkeit innerhalb des LIGA2.X-Prozesses	129

Abb. 5.5: Schematische Darstellung der Rechteck-Prüfstruktur zur Erfassung der Seitenwandqualität in LIGA2.X-Formeinsätzen	130
Abb. 5.6: Layout LIGA2.3 mit grün gekennzeichneten Strukturen, die für die Vermessung der Seitenwandrauigkeit herangezogen wurden	131
Abb. 5.7: Qualitative Auswertung der LIGA-Seitenwandqualität mit dem REM; links: Originalaufnahmen; rechts: mit <i>Adobe Photoshop CS6</i> bearbeiteten Aufnahmen zur besseren Darstellung	132
Abb. 5.8: NISP; Layout LIGA2.3; Ausschnitt A : Drahterodierter Prüfkörper zur Bestimmung der Seitenwandrauigkeit.....	133
Abb. 5.9: Auswertung des Flächenscans mit dem <i>MicroProf</i> [®] und der Software <i>Marc III</i> von der Fa. FRT, der sRa Wert (der gesamten Fläche 0,25 mm ²) beträgt 21 nm	134
Abb. 5.10: a Darstellung der Tribologie eines 90 µm x 90 µm Ausschnittes der LIGA-Seitenwand, aufgenommen mit dem AFM <i>Dimension Icon</i> der Fa. Bruker Nano GmbH; b Kameraaufnahme der LIGA-Seitenwand.....	134
Abb. 5.11: Beispiele für defekte kreisrunde Säulenstrukturen innerhalb der LIGA2.0-Formeinsatzfertigung	136
Abb. 5.12: a LIGA2.0-Layout; b Aufnahme einer der acht zur Auswertung der Ausfallrate hergestellten Proben.....	137
Abb. 5.13: Einflussdiagramm der Ausfallrate bei der galvanischen Abscheidung kreisrunder Säulenstrukturen	143
Abb. 5.14 Ausweichformen für die Herstellung von kreisrunden Säulenstrukturen in der Nickelgalvanik.....	144
Abb. 6.1: Aufnahmen der werkzeugbedingten Defekte auf LIGA2.X-Bauteilen hergestellt mit den MS 50-Maschinen	147
Abb. 6.2: 3D-CAD-Entwurf der Schneidevorrichtung zur Trennung des Angusses vom abgeformten Bauteil.....	151

- Abb. 6.3: Finales Werkzeugkonzept, in dem die drei Konzepte Abreißen, Abdrehen und Abschneiden vereint sind 151
- Abb. 6.4: Darstellung der in das Spritzgießwerkzeug LIGA2.X integrierten Abdrehvorrichtung: **a** schematisch im 3D-CAD, **b** Aufnahme von unten; **c** Aufnahme von vorne 153
- Abb. 6.5: Darstellung der wechselbaren Einsätze zur schnellen Anpassung des Anschnittdurchmessers: **a** schematisch im 3D-CAD, **b** Aufnahme zweier Einsätze mit unterschiedlichem Anschnittdurchmesser; **c** Aufnahme der düsenseitigen Werkzeugplatte, in die die Einsätze eingebaut werden 153
- Abb. 6.6: Darstellung der wechselbaren Einsätze unter Verwendung eines Bajonettverschlusses für einen schnellen Tausch von LIGA2.X-Formeinsätzen: **a** schematisch, **b** Aufnahme der beiden Formeinsatzhalter mit LIGA2.X-Formeinsätzen; **c** Aufnahme der auswerferseitigen Werkzeugplatte, in die die Formeinsatzhalter eingebaut werden 154
- Abb. 6.7: Darstellung der vorgesehenen Zentrierungen für die Verwendung eines Handlingsystems: **a** Schematisch im 3D-CAD, **b** Aufnahme der auswerferseitigen Werkzeugplatte mit zwei HASCO-Zentriereinheiten; **c** Konzept eines möglichen Handlingsystems zur Entnahme von LIGA2.X-Bauteilen über Unterdruck 155
- Abb. 6.8: Schematische Darstellung im 3D-CAD: **a** des Evakuierungskonzeptes, **b** LIGA2.X-Formeinsatz mit Dichtung als Teil des Evakuierungskonzeptes; **c** Kühlkanalsystem des LIGA2.X-Werkzeuges (in rot ist der kavitätsnahe Kühlkreislauf hervorgehoben) 157
- Abb. 6.9: Darstellung der Tellerfederpakete für die Gewährleistung einer definierten Werkzeugöffnungsbewegung: **a** Schematisch im 3D-CAD, **b** Aufnahme eines Federpaketes, **c** Aufnahme

der Auswerferseitigen Werkzeugplatte mit den eingebauten Federpaketen	158
Abb. 6.10: LIGA2.X-Werkzeug: a 3D-CAD-Darstellung; b Aufnahme des fertiggestellten Werkzeuges.....	159
Abb. 6.11: Arburg 420 C des IAM-WPT am KIT: a Spritzgießmaschine; b Detail-darstellung des aufgespannten LIGA2.X-Werkzeuges	160

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Einteilung des Mikrospritzgießens anhand der charakteristischen Merkmale der hergestellten Bauteile	16
Tabelle 3.1:	Auflistung der im SFB 499 erstellten LIGA-Formeinsatz-Layouts	28
Tabelle 3.2:	Beispiele der bei der Formeinsatzfertigung innerhalb des SFB 499 aufgetretenen Defekte [93]	29
Tabelle 3.3:	Grundparameter bei den LIGA2.X-Abformungen auf der 2K-MS 50	68
Tabelle 3.4:	Grundparameter bei den LIGA2.X Abformungen auf dem <i>micro-män 50</i> Mikrospritzgießsystem	69
Tabelle 3.5:	Hauptprozessschritte in der LIGA2.X-Formeinsatzherstellung	74
Tabelle 4.1:	Auflistung der verschiedenen Zeitpunkte, an denen eine Messwerterfassung in der LIGA2.X - Prozesskette durchgeführt wird sowie das jeweils verwendete Messmittel	81
Tabelle 4.2:	Auflistung des Betrags der maßlichen Abweichungen innerhalb der Prozessschritte	93
Tabelle 4.3:	Messwerte und deren Abweichung zum jeweiligen Sollwert der vermessenen, galvanisch erzeugten NISP und Direkt-LIGA-Bauteile.....	97
Tabelle 4.4:	Messwerte und deren Abweichung der spritzgegossenen Bauteile zum jeweiligen Formeinsatz an den verschiedenen Messstellen der beiden Puzzleile	110
Tabelle 4.5:	Maßvorhalte für Kreisstrukturen innerhalb der NISP-Fertigung und Mikrobauteil-Herstellung (POM); Werte basierend auf den in der vorliegenden Arbeit erlangten Erkenntnissen.....	113

Tabelle 5.1:	Parameter der Faktorstufen des Einflussfaktors E1 (Einspritzgeschwindigkeit V_E)	121
Tabelle 5.2:	Parameter der Faktorstufen des Einflussfaktors E2 (Werkzeugtemperatur T_W)	122
Tabelle 5.3:	Parameter der Faktorstufen des Einflussfaktors E3 (Werkzeugöffnungsgeschwindigkeit W_V)	122
Tabelle 5.4:	Zielgröße und Einflussgrößen und deren Parameter in den unterschiedlichen Faktorstufen	123
Tabelle 5.5:	Prozessparameter Einflussfaktor E1 reaktives Ionenätzen.....	138
Tabelle 5.6:	Prozessparameter Einflussfaktor E2 Goldstartschicht	140
Tabelle 5.7:	Prozessparameter Einflussfaktor E3 Stromdichte	140
Tabelle 5.8:	Zusammenfassung der Prozessparameter E1 bis E3 ..	141
Tabelle 6.1:	Vorstellung der drei favorisierten Konzepte zur Realisierung der Entformung und Angusstrennung bei der Herstellung von LIGA2.X-Bauteilen	148
Tabelle 6.2:	Ergebnisse der durchgeführten QFD-Analyse zur Entscheidungshilfe	150
Tabelle 6.3:	Grundparameter der Abformversuche mittels der Arburg 420 C unter Verwendung von LIGA2.X- Formeinsätzen.....	161
Tabelle 6.4:	Erste Ergebnisse der LIGA2.X-Bauteile hergestellt mit der Arburg 420C-Spritzgießmaschine im Vergleich zu den Bauteilen hergestellt mittels der MS 50-Maschinen	162

11 Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

.dxf	Dateiformat der Fa. Autodesk zum Austausch von CAD-Daten
.gds	Dateiformat das der Kategorie von CAD-Dateien angehört
μ	mikro
2,5D	zweieinhalbdimensional
2D	zweidimensional
2K	zwei Komponenten
3D	dreidimensional
A	Ausfallrate
AFM	Atomic Force Microscope
AM	Arbeitsmaske
AM AU	Goldabsorberstrukturen auf der Arbeitsmaske
ANKA	Synchrotronstrahlungsquelle des KIT
Au	Gold
BDG	BDG-Spüllösung (bestehend aus 80 Vol-% Diethylen- glykolmonobuthylether und 20 Vol-% Di-Wasser, Reinstwasser)
BPO	Benzoylperoxid
C	Kohlenstoff
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge Couples Device
CD	Compact Disc
CMM	Coordinate Measuring Machine
COC	Cyclo-Olefin-Copolymere
COG	Chrom on Gold
Cr	Chrom
DC	Direct Current

DI	deionisiert
DLB	Direkt-LIGA-Bauteil
DMA	Dimethylanilin
DoE	Design of Experiments
DVD	Digital Video Disc
EDM	Electrical Discharge Machining
E-Feld	Elektrisches Feld
FIB	Focused Ion Beam
FRT	Fries Research & Technology GmbH
GG	Entwickler Lösung (bestehend aus 60 Vol.-% Diethylenglykolmonobutylether, 20 vol.-% Morpholin, 5 vol.-% Ethanolamin und 15 Vol.-% DI-Wasser, Reinstwasser) benannt nach Ghica und Glashauser
HF	Flussäure
HNO ₃	Salpetersäure
IAM-WPT	Isntitut für Angewandte Materialien- Werkstoffprozesstechnik
IMT	Institut für Mikrostrukturtechnik
IN	Invar
k	Standardabweichung
KFK	Kernforschungszentrum Karlsruhe
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KOH	Kaliumhydroxid
LIGA	Lithographie, Galvanoformung und Abformung
m	Masse
MEMO	Methacryloxypropyltrimethoxysilan
MIBK	Methylisobutylketon
MS 50	Microsystem 50 (Mikrospritzgießsystem)
NISP	Nickelstrukturplatte
O ₂	Sauerstoff
OM	Optisches Mikroskop
PE	Polyethylen
PIM	Powder Injection Molding

PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen
pVT	Druck p, spezifisches Volumen v, Temperatur T
QFD	Quality Function Deployment
Ra	arithmetischer Mittenrauwert
RE	Resiststruktur
REM	Rasterelektronenmikroskop
RIE	Reactive Ion Etching
RIM	Reaction Injection Molding
RKT	Rodinger Kunststofftechnik GmbH
SFB 499	Sonderforschungsbereich 499 (Mikrounformen)
Si	Silizium
Ti	Titan
TiO _x	Titanoxid
T _w	Werkzeugtemperatur
U	Messunsicherheit
UV	Ultraviolett
V _E	Einspritzgeschwindigkeit
V _w	Werkzeugöffnungsgeschwindigkeit
WC	Wolframcarbide
WEDM	Wire Electrical Discharge Maching
WFP	Werth Fiber Probe
ZM	Zwischenmaske
ZM AU	Goldabsorberstrukturen auf der Zwischenmaske
α	Winkelabweichung von der Lotrechten bei galvanisch erzeugten Außenkonturen
β	Winkelabweichung von der Lotrechten bei galvanisch erzeugten Innenkonturen
λ _c	Grenzwellenlänge

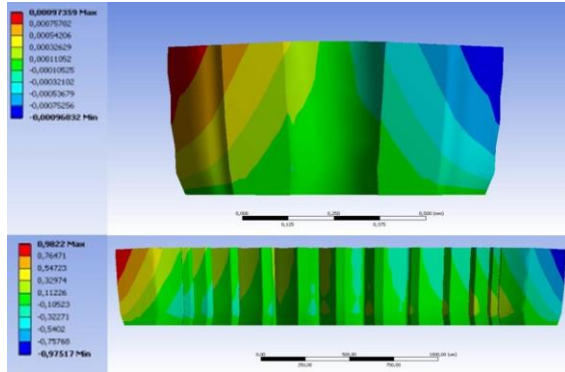
Formelzeichen

k	Versuchsparameter
m	Anzahl der Stufen der DoE
n	Anzahl der Versuche
NISP _{berechnet}	Berechneter Wert in NISP-Strukturen zur Berechnung der Seitenwandabweichung von der Lotrechten
RE	Messwert der Resiststrukturen
DLB _{Nr.x}	Messwert der DLB-Proben mit der Nr. x
$\delta_{\text{Formmasse}}$	Wert der Abweichung resultierend aus den Eigenschaften der verwendeten Formmasse wie zum Beispiel der Rheologie
δ_{Galvanik}	Wert der Gesamtabweichung verursacht durch die Galvanoformung
$\delta_{\text{Geometrie}}$	Längenabweichung Abweichung resultierend aus dem geometriebedingtem Verzug der Formteile durch den Replikationsprozess
δ_{Litho}	Wert der Gesamtabweichung verursacht durch die Lithographieschritte in der LIGA-Prozesskette
$\delta_{\text{Litho AM}}$	Wert der Abweichung verursacht durch Lithographieverfahren in der Arbeitsmasken-Herstellung
$\delta_{\text{Litho NISP/DLB}}$	Wert der Abweichungen verursacht durch Lithographieverfahren in der NISP- und DLB-Herstellung
$\delta_{\text{Litho ZM}}$	Abweichungen verursacht durch Lithographieverfahren in der Zwischen-masken-Herstellung
δ_{Quellen}	Wert der Abweichung resultierend aus der Wasseraufnahme des Resists während der Galvanoformung
$\delta_{\text{NISP/DLB}}$	Wert der Gesamtabweichung von LIGA-Strukturen aus Metall
δ_{Prozess}	Wert der prozessbedingten Abweichungen
$\delta_{\text{Schwindung}}$	Wert der Abweichung im Rahmen des Replikationsprozesses mit thermoplastischen Formmassen resultierend aus der thermischen Schwindung

$\delta_{\text{Spritzgießen}}$	Wert der Abweichungen resultierend aus dem Mikrospritzgießprozess
δ_{Temp}	Wert der Abweichung resultierend aus der thermischen Ausdehnung des Resits während der Galvanoformung

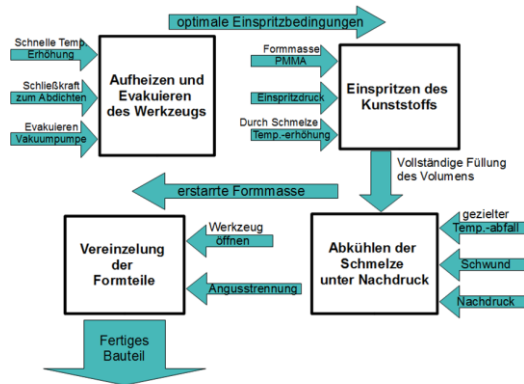
Anhang

A.1 Ansys Simulation thermische Ausdehnung PMMA-Resist



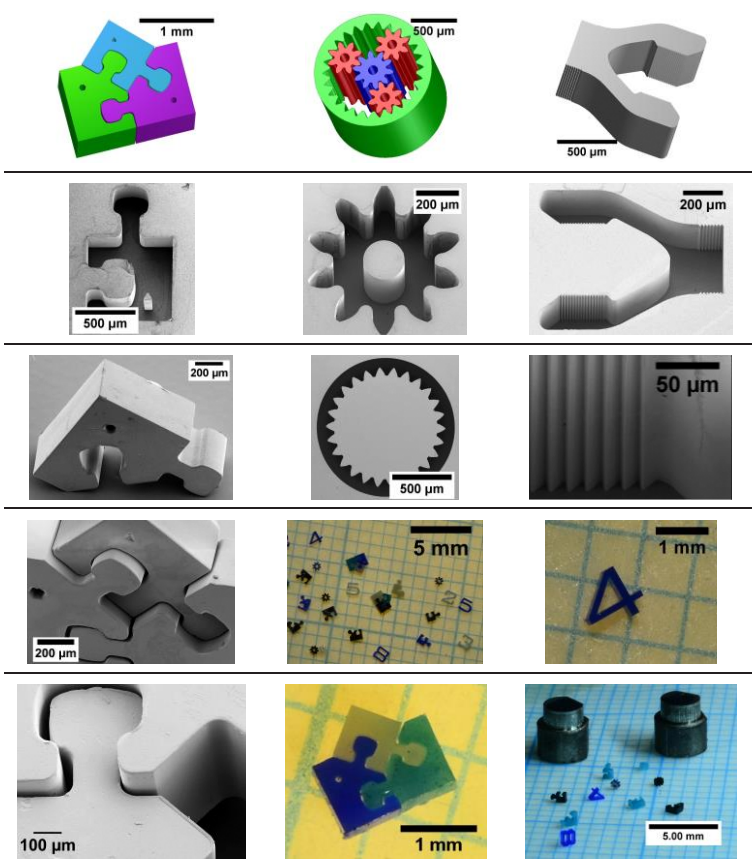
Geometrische Änderung von PMMA durch die Temperaturänderung während der Galvanoformung $\Delta T=32^{\circ}\text{C}$.

A.2 Funktionsstruktur Spritzgießwerkzeug

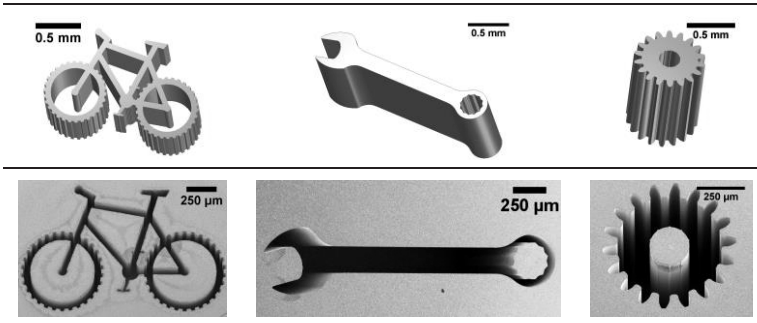


A.4 Auswahl aus den in der LIGA2.X-Prozessentwicklung entstandenen Demonstratoren (CAD-Modelle; Formeinsatzkavitäten, Formteile)

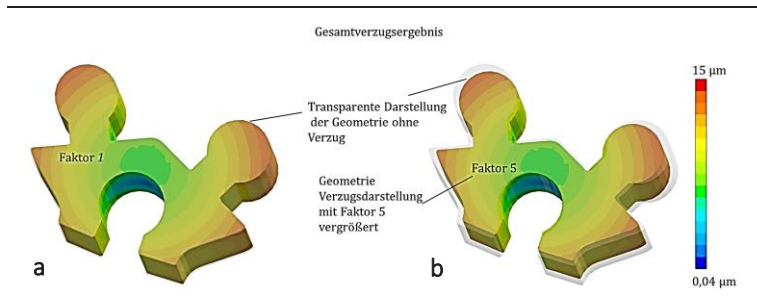
LIGA2.0-Layout



LIGA2.1-Layout



A.5 Simulation des Gesamtverzugs am Puzzle-Verteilerstück



Gesamtverzug resultierend aus dem Spritzgießprozess (verwendete Software *Sigmasoft*[®]); Puzzleverteilerstück: **a** Gesamtverzugsresultat; **b** Gesamtverzugsresultat mit Multiplikationsfaktor 5

A.6 Studentische Arbeiten

Name	Titel	Jahr
Stefan Borens	Entwicklung eines Werkzeugkonzeptes zum spritzgießen von LIGA-Formeinsätzen	2012
Yannik Krieger Martin Dreher	Entwicklung eines Handlingsystems für das Mikrospritzgießen von LIGA-Mikrobauteilen	2012
Volker Maurer	Entwicklung und Erprobung einer Vermessungssystematik für die Fertigung von LIGA-Formeinsätzen	2012
Andreas Erb	Durchführung einer vollständigen Maßverfolgung innerhalb der LIGA-Prozesses	2012
Andreas Runck	Werkzeugentwicklung mit Hilfe der Spritzgusssimulation für die Replikation von LIGA-Mikrobauteilen	2013
Valerie Siller	Untersuchungen zur Nickelgalvanoformung von kreisrunden Säulen mit hohen Aspektverhältnissen	2013
Raphael Kruchem	Untersuchung der Maßhaltigkeit von endkonturnahen μ -Formteilen hergestellt mittels LIGA2.X-Verfahren	2014

Obenstehende Liste beinhaltet die studentischen Arbeiten, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit wissenschaftlich betreut wurden. Teile aus einigen Arbeiten dieser Liste wurden für die Erstellung der vorliegenden Dissertation genutzt. Ich möchte mich an dieser Stelle herzlich bei den genannten Studenten bedanken.

Herausgeber: Institut für Mikrostrukturtechnik

Die Bände sind unter www.ksp.kit.edu als PDF frei verfügbar
oder als Druckausgabe zu bestellen.

- Band 1** Georg Obermaier
Research-to-Business Beziehungen: Technologietransfer durch
Kommunikation von Werten (Barrieren, Erfolgsfaktoren und
Strategien). 2009
ISBN 978-3-86644-448-5
- Band 2** Thomas Grund
Entwicklung von Kunststoff-Mikroventilen im Batch-Verfahren. 2010
ISBN 978-3-86644-496-6
- Band 3** Sven Schüle
Modular adaptive mikrooptische Systeme in Kombination
mit Mikroaktoren. 2010
ISBN 978-3-86644-529-1
- Band 4** Markus Simon
Röntgenlinsen mit großer Apertur. 2010
ISBN 978-3-86644-530-7
- Band 5** K. Phillip Schierjott
Miniaturisierte Kapillarelektrophorese zur kontinuierlichen Über-
wachung von Kationen und Anionen in Prozessströmen. 2010
ISBN 978-3-86644-523-9
- Band 6** Stephanie Kißling
Chemische und elektrochemische Methoden zur Oberflächenbe-
arbeitung von galvanogeformten Nickel-Mikrostrukturen. 2010
ISBN 978-3-86644-548-2

- Band 7** Friederike J. Gruhl
Oberflächenmodifikation von Surface Acoustic Wave (SAW)
Biosensoren für biomedizinische Anwendungen. 2010
ISBN 978-3-86644-543-7
- Band 8** Laura Zimmermann
Dreidimensional nanostrukturierte und superhydrophobe
mikrofluidische Systeme zur Tröpfchengenerierung und
-handhabung. 2011
ISBN 978-3-86644-634-2
- Band 9** Martina Reinhardt
Funktionalisierte, polymere Mikrostrukturen für die
dreidimensionale Zellkultur. 2011
ISBN 978-3-86644-616-8
- Band 10** Mauno Schelb
Integrierte Sensoren mit photonischen Kristallen auf
Polymerbasis. 2012
ISBN 978-3-86644-813-1
- Band 11** Daniel Auernhammer
Integrierte Lagesensorik für ein adaptives mikrooptisches
Ablensystem. 2012
ISBN 978-3-86644-829-2
- Band 12** Nils Z. Danckwardt
Pumpfreier Magnetpartikeltransport in einem Mikroreaktions-
system: Konzeption, Simulation und Machbarkeitsnachweis. 2012
ISBN 978-3-86644-846-9
- Band 13** Alexander Kolew
Heißprägen von Verbundfolien für mikrofluidische
Anwendungen. 2012
ISBN 978-3-86644-888-9

ISSN 1869-5183

- Band 14 Marko Brammer
Modulare Optoelektronische Mikrofluidische Backplane. 2012
ISBN 978-3-86644-920-6
- Band 15 Christiane Neumann
Entwicklung einer Plattform zur individuellen Ansteuerung von
Mikroventilen und Aktoren auf der Grundlage eines Phasenüber-
ganges zum Einsatz in der Mikrofluidik. 2013
ISBN 978-3-86644-975-6
- Band 16 Julian Hartbaum
Magnetisches Nanoaktorsystem. 2013
ISBN 978-3-86644-981-7
- Band 17 Johannes Kenntner
Herstellung von Gitterstrukturen mit Aspektverhältnis 100 für die
Phasenkontrastbildgebung in einem Talbot-Interferometer. 2013
ISBN 978-3-7315-0016-2
- Band 18 Kristina Kreppenhofer
Modular Biomicrofluidics - Mikrofluidikchips im Baukastensystem
für Anwendungen aus der Zellbiologie. 2013
ISBN 978-3-7315-0036-0
- Band 19 Ansgar Waldbaur
Entwicklung eines maskenlosen Fotolithographiesystems zum
Einsatz im Rapid Prototyping in der Mikrofluidik und zur gezielten
Oberflächenfunktionalisierung. 2013
ISBN 978-3-7315-0119-0
- Band 20 Christof Megnin
Formgedächtnis-Mikroventile für eine fluidische Plattform. 2013
ISBN 978-3-7315-0121-3

- Band 21** Srinivasa Reddy Yeduru
Development of Microactuators Based on
the Magnetic Shape Memory Effect. 2013
ISBN 978-3-7315-0125-1
- Band 22** Michael Röhrig
Fabrication and Analysis of Bio-Inspired Smart Surfaces. 2014
ISBN 978-3-7315-0163-3
- Band 23** Taleieh Rajabi
Entwicklung eines mikrofluidischen Zweikammer-
Chipsystems mit integrierter Sensorik für die Anwendung
in der Tumorforschung. 2014
ISBN 978-3-7315-0220-3
- Band 24** Frieder Märkle
Laserbasierte Verfahren zur Herstellung hochdichter
Peptidarrays. 2014
ISBN 978-3-7315-0222-7
- Band 25** Tobias Meier
Magnetoresistive and Thermoresistive Scanning
Probe Microscopy with Applications in Micro- and
Nanotechnology. 2014
ISBN 978-3-7315-0253-1
- Band 26** Felix Marschall
Entwicklung eines Röntgenmikroskops für
Photonenenergien von 15 keV bis 30 keV. 2014
ISBN 978-3-7315-0263-0
- Band 27** Leonardo Pires Carneiro
Development of an Electrochemical Biosensor Platform and a
Suitable Low-Impedance Surface Modification Strategy. 2014
ISBN 978-3-7315-0272-2

ISSN 1869-5183

- Band 28** Sebastian Mathias Schillo
Prozessentwicklung für die Automatisierung der Herstellung
und Anwendung von hochdichten Peptidmicroarrays. 2014
ISBN 978-3-7315-0274-6
- Band 29** Nicole E. Steidle
Micro- and Nanostructured Microfluidic Devices for Localized
Protein Immobilization and Other Biomedical Applications. 2014
ISBN 978-3-7315-0297-5
- Band 30** Jochen Heneka
Prozessentwicklung eines industrietauglichen Verfahrens zur
Fertigung von vereinzelt LIGA-Mikrobauteilen. 2015
ISBN 978-3-7315-0326-2

JOCHEN HENEKA

Prozessentwicklung eines industrietauglichen

Verfahrens zur Fertigung von vereinzelt

LIGA-Mikrobauteilen

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines industrietauglichen Verfahrens, mit dem Ziel endkonturnahe, vereinzelt Mikrobauteile auf Basis der LIGA-Technik herzustellen. Diese Mikrobauteile sollen dazu beitragen neue innovative Ideen in erfolgreiche Produkte umzusetzen und auf dem Markt zu platzieren. Bestehende Einschränkungen der LIGA-Technik bei der Herstellung einzelner polymerer Bauteile, werden mit Hilfe neuartiger Konzepte in der Werkzeugtechnik für die Mikroreplikation, dem Einsatz von mikromechanischen Fertigungsverfahren zur Erzeugung der Außenstruktur der LIGA-Formeinsätze und der Einführung einer messmittelgestützten Prozesskontrolle überwunden.

ISSN 1869-5183

ISBN 978-3-7315-0326-2

