

Methodisch unterstützter Entwurf mechanischer Mikrosysteme

Dipl.-Ing. Jochen Marz; Dipl.-Ing. Norbert Burkardt; Prof. Dr.-Ing. Albert Albers,
Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe, Deutschland

Kurzfassung

Neben der Faszination der Kleinheit spielen bei Mikrosystemen zunehmend Fragen der Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit eine Rolle. Urgeformte Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen bieten solche Perspektiven. Außer der Ertüchtigung der Produktionstechnologien und Erforschung werkstoffwissenschaftlicher Grundlagen ist die entwicklungsmethodische Durchdringung des Entwurfsprozesses von entscheidender Bedeutung für eine erfolgreiche Mikroproduktentwicklung. Dabei stellt die Entwurfsmethodik eine Verknüpfung zwischen den Kundenanforderungen und der produktionstechnischen Umsetzung dar. Es gilt Methoden und Werkzeuge zu finden, die den Entwickler und Konstrukteur bei der zielsystemgerechten Gestaltung unterstützen. Der vorliegende Beitrag beschreibt die Hauptmerkmale des Entwurfsprozesses für urchgeformte Mikrobauteile und Mikrosysteme. Als entwicklungsbegleitendes, methodisches Hilfsmittel werden sogenannte Konstruktionsregeln definiert. An dem konkreten Beispiel der Entwicklung eines Mikro-Planetengetriebes wird der Entwurfsprozess durchlaufen und der Einsatz der Konstruktionsregeln gezeigt.

1 Einleitung

An Mikrosysteme besteht seit langem nicht mehr nur alleine der Anspruch klein zu sein. Dem anfänglichen Wetteifern um die kleinst herstellbaren Strukturen, demonstriert an down-gescalten Produkten der Makrowelt, sind längst Forderungen nach wirtschaftlicher industrieller Produktion, hoher Betriebsdauer und Belastbarkeit gefolgt. Dieses „Erwachsenwerden“ der Mikrotechnik bringt allerdings zahlreiche Probleme mit sich und stellt Wissenschaft und Forschung vor neue Herausforderungen. So sind kostengünstige Herstellverfahren für eine prozesssichere und reproduzierbare Mittel- und Großserienfertigung zu finden. Hochbelastbare Werkstoffe wie Metalle und Keramiken sind zu entwickeln, Werkstoffgefügezustand und –kennwerte zu ermitteln und in ihren Eigenschaftsbeziehungen zu beschreiben. Spezifische Effekte wie z.B. Größeneffekte oder Werkstoffanisotropie sind in ihrer Ursache und Wirkung zu verstehen.

Neben all diesen Disziplinen ist die Frage nach dem Produkt zu stellen, das mit Kenntnis dieser Technologien und Beschreibungsansätzen hergestellt werden soll; d.h. wie kann ein Marktbedürfnis bzw. ein Kundenauftrag in ein innovatives, wettbewerbsfähiges Mikroprodukt umgesetzt werden. Dazu ist es notwendig, den Entwicklungsprozess methodisch zu durchdringen und dem Entwickler und Konstrukteur geeignete Methoden und Werkzeuge für einen effizienten Mikrosystementwurf an die Hand zu geben.

Mit dieser Gesamtzielsetzung beschäftigt sich der Karlsruher Sonderforschungsbereich „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urchgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“ (SFB 499). [7]

2 Entwurfsprozess

2.1 Hauptabschnitte des Entwurfsprozesses

Jeder Entwurfsprozess beginnt mit dem Festlegen der Definition des Zielsystems. Das Zielsystem wird gemeinsam mit dem Kunden erarbeitet und legt Anforderungen und Randbedingungen für das zu entwickelnde Produkt fest (siehe **Bild 1**).

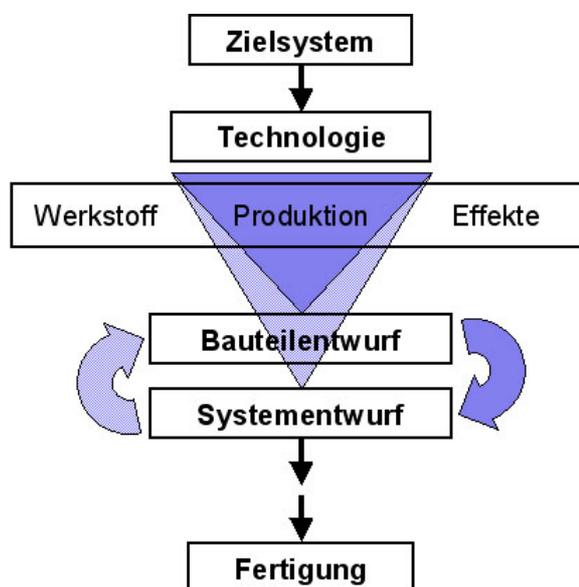


Bild 1 Mikrospezifischer Entwurfsprozess

In der konventionellen Entwicklung von Produkten und Systemen des Allgemeinen Maschinenbaus und der Feinwerktechnik [6] [8] würde nun eine konzeptionelle Phase folgen, in der für funktional gegliederte

Subsysteme prinzipielle Teillösungen erarbeitet und diese systematisch unter Einbeziehung von Bewertungsmethoden zur optimalen Prinzipiellösung kombiniert werden.

Bei der Entwicklung von Mikrosystemen ist das Herangehen vorrangig „technologiegetrieben“. Die konzeptionelle Arbeit hat in vielen Bereichen der Mikrosystemtechnik eher den Charakter einer Kombinatorik von miteinander verträglichen Gestaltelementen, die in einer individuell festgelegten Fertigungsprozesskette hergestellt werden können. Dabei wechselt das Vorgehen ständig zwischen der Sicht auf das Gesamtsystem und der kleinsten Struktureinheit („Meet-In-The-Middle-Strategie“) [5], unter Vorgabe des Gestaltungsraums für den Konstrukteur durch die Randbedingungen und Restriktionen der Produktionsprozesse. Aber auch weniger leicht in geometrischen Größen beschreibbare Merkmale nehmen Einfluss. Dazu zählen z.B. Charakteristika der einsetzbaren Werkstoffe oder von Effekten. Letztere können sich bei kleiner werdenden Dimensionen zu Störeffekten wandeln, sie können an Wirkung verlieren oder gar erst in Erscheinung treten und somit völlig neue Anwendungen erschließen. All diese „technologischen“ Aspekte gilt es also in die mikrogerechte Gestaltung von Bauteil und System einzubeziehen.

Dazu ist es notwendig das multitechnologische Wissen aus den angesprochenen Technologien unmittelbar im Entwurfsprozess dem Konstrukteur verfügbar zu machen. Dies wird über das methodische Hilfsmittel der Konstruktionsregeln erreicht.

2.2 Konstruktionsregeln

Konstruktionsregeln sind konkrete Handlungsanweisungen an den Konstrukteur. Sie ergeben sich aus technologischen Grundanforderungen heraus.

Konstruktionsregeln bilden ein methodisches Hilfsmittel für den Konstrukteur, durch welches Wissen verschiedener Disziplinen konstruktionsrelevant interpretiert in anweisender Form unmittelbar in den Entwurf eingebracht wird.

Sie finden ihren Ausgang in der *Detektion* potentieller Einflüsse einer Technologie auf die mikrogerechte Gestaltung. In einem *Extraktionsschritt* werden die Merkmale und Parameter dieser Technologie möglichst quantifizierbar aufgenommen. Danach werden diese Eigenschaften auf vorhandene und denkbare Bauteil- und Systemstrukturen projiziert und Grenzbeobachtungen noch realisierbarer Herstellgrößen angestellt, d.h. konstruktionsrelevant *interpretiert*. Nach einem eigens entwickelten Klassierungssystem werden die Interpretationen soweit wie möglich als allgemein gültige Regeln *formuliert*. Wichtig für die Anwendbarkeit der Regeln für den Konstrukteur und die Implementierung in rechnergestützte Systeme ist das *Spei-*

chern der Regeln in Datenbanken. Über Informationsportale und/oder unmittelbar in einer Applikation im 3D CAD werden die Konstruktionsregeln *bereitgestellt*. [3] [4]

Nachfolgend soll näher auf Konstruktionsregeln eingegangen werden, die sich bei der urformenden Mikrotechnik aus den Technologien zur Herstellung von Formeinsätzen und der Abformung ergeben haben.

2.2.1 Restriktionen der Fertigungsvorbereitung

Urformende Produktionsprozesse erfordern zunächst die Herstellung einer Form – eines Formeinsatzes. Um dem Ziel einer wirtschaftlichen, mittel- und großserientauglichen Fertigung von Mikrobauteilen aus metallischen und keramischen Werkstoffen nachzukommen, bieten abtragende und spanende Verfahren der mechanischen Mikrofertigung Vorteile gegenüber Lithographie basierten Verfahren. Im Zentrum der Arbeiten im SFB stand bisher die Herstellung von Formeinsätzen mittels 3-Achs Mikrofräsen.

Zur Herstellung 3-dimensionaler Mikrostrukturen werden hier u. a. Mikroschafffräser eingesetzt. Zu extrahierende verfahrensspezifische Parameter sind beispielsweise der Schaftdurchmesser des Werkzeugs und die daran gekoppelte Schneidlänge. Konstruktionsrelevant interpretiert bedeutet dies, dass keine Formeinsatzstrukturen schmaler als der Fräserdurchmesser zuzüglich der Frästoleranzen bzw. tiefer als die maximale Spannutenlänge gefertigt werden können. Bei weiterer Überlegung wird klar, dass durch den runden Querschnitt auch keine vertikalen Innenkanten möglich sind, d.h. sämtliche Formeinsatzinnenkanten – gleichbedeutend mit Bauteilaussenkanten - sind mit einem Mindestrundungsradius zu versehen.

All diese Parameter und Eigenschaften werden in sogenannten Technologiedatenblättern systematisch erfasst und konstruktionsrelevant interpretiert (**Bild 2**).

	Technologischer Sachverhalt	Bedeutung für die Konstruktion	Auswirkungen
Schafffräser	1) Durchmesser (mm) Größenzulassung (mm)	$\phi \pm 0,10$ $\Delta = +0,05$	→ Reduzierung der maximalen Flankentlänge → Tragfähigkeit sinkt → Gleichmäßigkeit/Strukturverträglichkeit → Reduzierung der Zahnradbreite
	2) Spannutenlänge	Fräseffektivlänge mit verlängertem Schaft = 8 x d	→ Fräser mit Durchmesser $\phi = 0,6$ mm aufhöhen für eine Minuspantografie dimension zu groß
	3) Toleranzen (mm)	Schaft Schneidteil $\pm 0,1 / -0,008$ $\pm 0,01 / -0,01$	
	4) Minimale Wandstärke	nicht zu unterschätzen	
5) Oberflächenrauheit (µm)	$R_a = 2$		
6) Fräskühnung			

Bild 2 Technologiedatenblatt 3-Achs Mikrofräsen

2.2.2 Restriktionen der Abformung

Die Abformung der Mikrobauteile erfolgt im Mikro-Pulverspritzguss (μ PIM), der materialabhängig den Metall- und den Keramikspritzguss unterscheidet, und im Mikroguss. Das μ PIM-Verfahren nutzt die Formeinsätze, um unmittelbar den metallischen oder keramischen Feedstock dort hinein abzuformen. Für den Mikroguss müssen zunächst einbettfähige Modelle, z.B. aus Kunststoff gefertigt werden. Nach erfolgtem Abguss können die Bauteile aus den verlorenen Formen geborgen werden.

Randbedingungen des μ PIM ergeben sich aus der Notwendigkeit, Angusskanäle in ausreichender Anzahl und Größe an Bauteilflächen anzubringen, sowie Angriffsflächen für Auswerferstifte vorzusehen. Maximal erzielbare Fließlängen- und Aspektverhältnisse als auch scharfe Querschnittsübergänge und -umlenkungen begrenzen das Formfüllverhalten und die Abformqualität. Besonders berücksichtigt werden muss der je nach Werkstoff auftretende Schrumpf während des Sinterns. De Fakto lassen sich so gegenüber den Formeinsatzmaßen um den Sinterschrumpf kleinere Strukturen herstellen, gleichzeitig müssen Schrumpftoleranzen von $\pm 0,4\%$ berücksichtigt werden.

2.2.3 Produktionstechnische Konstruktionsregeln

Für die oben beschriebenen Verfahren zur Formeinsatzherstellung und Bauteilabformung bestehen prinzipiell unterschiedliche Regelsätze, allerdings können diese geometrisch miteinander verknüpft sein. So finden sich durch die Herstellrestriktionen beeinflusste Strukturdetails des Formeinsatzes auch am abgeformten Bauteil wieder, wobei die Geometriemaße um den Sinterschrumpf skalieren und durch die Abformung komplementäre Strukturen entstehen. Diesen Sachverhalt bildet die Nomenklatur des Klassierungsschlüssels ab: **KR_AA_BBB_C_DDD**.

Dabei beschreiben die Buchstaben „AA“ die Bauteilart auf die sich die Regel bezieht, also „Formeinsatz“ oder abgeformtes und gesintertes „Modell“. Darauf folgen Angaben zur Produktionstechnik mit näherer Spezifikation von Werkzeug- und Werkstoffgruppe. Findet eine Regel auf mehrere verschiedene Produktionstechniken oder Werkzeug- bzw. Werkstoffgruppen Anwendung, stehen statt der Kennbuchstaben die Einträge „xxx“ bzw. „x“. Abgeschlossen wird die Regel mit einer für die jeweilige Regelzusammensetzung fortlaufenden Nummer. Im nachfolgenden **Bild 3** sind einige Konstruktionsregeln für das Formeinsatzherstellungsverfahren 3-Achs Mikrofräsen und für die Abformung nach dem Mikropulverspritzgießen aufgelistet.

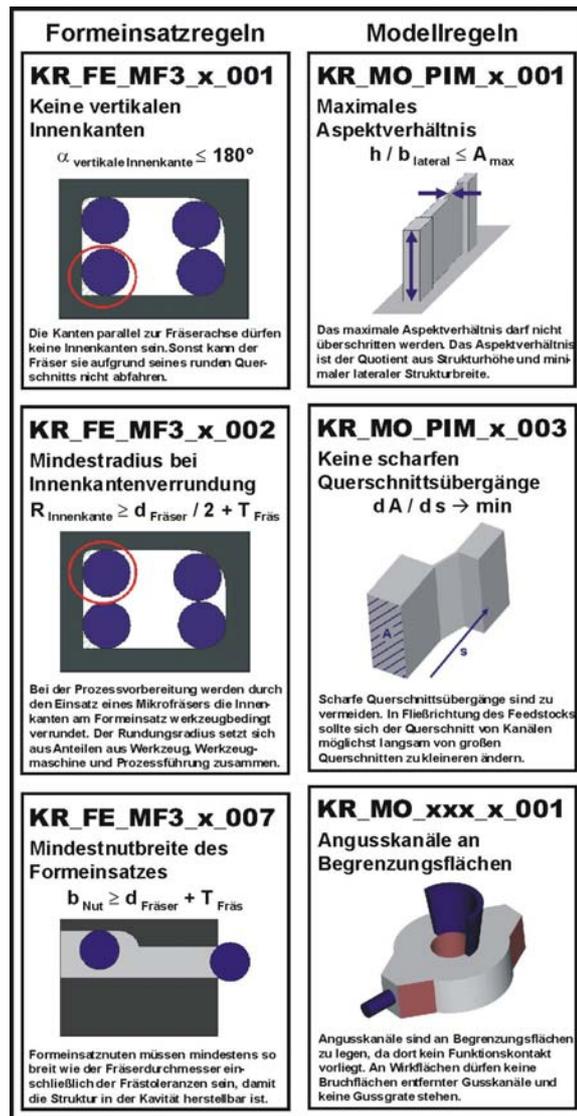


Bild 3 Produktionstechnische Konstruktionsregeln

3 Mikro-Planetengeriebe

3.1 Zielsystem

Das Mikro-Planetengeriebe verfolgt im SFB die wissenschaftliche Zielsetzung, als Demonstrator eines hochbelastbaren, mechanischen Mikrosystems die Forschungsinhalte verschiedener am SFB beteiligter Disziplinen abzubilden. Daraus ergibt sich, dass keine vollständige Zielsystemdefinition im klassischen Sinne festgelegt werden konnte. Zum Großteil liegen zum derzeitigen Zeitpunkt noch keine Erkenntnisse über genaue Merkmale und quantifizierte Daten vor. So bringen beispielsweise erst zukünftig anstehende Prüf-

standsversuche Aufschluss über die genauen Leistungsdaten des Getriebes.

Es soll ein Mikro-Planetengetriebe entwickelt werden, das wirtschaftlich in Mittel- bis Großserie mit Produktionstechniken der mechanischen und urformenden Mikrofertigung hergestellt werden kann und hohe Momentenübertragung und Lebensdauer ermöglicht. Hierzu wird eine Zahnflankenform gewählt, die Drehmoment und Drehzahl unempfindlich gegenüber Achsabstandsänderungen konstant überträgt. Das Getriebe soll unter gegebenen Randbedingungen den kleinst möglichen Durchmesser aufweisen.

3.2 Technologie

Bevor mit der eigentlichen Entwurfstätigkeit gestartet werden kann, sind zunächst die technologischen Randbedingungen zu klären. Nachfolgend sollen v. a. die produktionstechnischen Anforderungen wie sie in Konstruktionsregeln formuliert werden konnten (vergl. **Bild 3**), betrachtet werden. Mit der Entscheidung die Formeinsätze mittels Mikrofräsen mit einem Schaftfräser herzustellen und als hochbelastbaren Werkstoff Keramik und somit als Abformverfahren das Mikropulverspritzgießen zu wählen, kann eine Selektion zutreffender Konstruktionsregeln erfolgen. Dieses Regelwissen wird nun über unterschiedliche Abstraktionsstufen und Systemgliederungsebenen hinweg auf den Entwurfsgegenstand angewendet.

3.3 Entwurf

Der Entwurf startet mit dem Blick auf das Gesamtsystem und die Bauteile gleichermaßen. Zunächst ist auf Systemebene zu skizzieren, welches prinzipielle Layout das Planetengetriebe haben soll. Erste Prinzipskizzen des Gesamtlayouts bis hin zu funktionsbestimmenden Gestaltelementen, wie z.B. des einzelnen Zahns werden mit Wissen aus Konstruktionsregeln verglichen und somit erste gestalterische Konkretisierungsmöglichkeiten vorgedacht. Dabei fällt auf, dass insbesondere die Mikrofrästechnologie die Gestaltungsfreiheit von Formeinsatzstrukturen einschränkt, was Rückwirkungen für das gesamte System mit sich bringt.

Dieses Springen zwischen System- und Bauteilebene, einschließlich weiterer dazwischen liegender Betrachtungsebenen, zieht sich durch die komplette Entwurfsphase. Iterationsschleifen werden dabei insbesondere durch das Einbringen neuer technologischer Wissensbausteine ausgelöst, wie sie Konstruktionsregeln in sich bergen.

3.3.1 Bauteil

Als vorherrschend restriktiver Sachverhalt bei der Formeinsatzherstellung wird die Verrundung von Innenkanten aufgrund des kreisförmigen Querschnitts des Mikrofräswerkzeuges gesehen.

Projiziert man dies Strukturdetail „Rundung“ auf die einzelnen Bauteile des Mikro-Planetengetriebes, so sind v. a. die verzahnten Komponenten, allen voran das Planetenrad als kleinstes Zahnrad, betroffen (vergl. **Bild 4**).

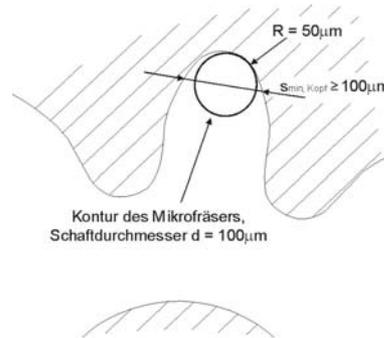


Bild 4 Strukturdetail „Kopfkantenrundung“ am Bauteil Planetenrad

Am Zahnkopf ist die Erzeugung einer scharfen Kopfkante nicht möglich (KR_FE_MF3_x_001). Die Kopfkantenrundung darf ferner ein Mindestmaß nicht unterschreiten. Dies setzt sich gemäß KR_FE_MF3_x_002 zusammen aus dem Fräserradius zuzüglich der Frästoleranzen. Überdies gibt KR_FE_MF3_x_007 vor, eine Mindestzahndicke einzuhalten, damit das Fräswerkzeug in den Zahn einfahren kann. Die selbe Konstruktionsregel verlangt eine ausreichende Wandstärke des Zahnkranzes.

Auch aus Sicht der Abformung ergeben sich Handlungsanweisungen an den Konstrukteur. So bestimmt die Wandstärke des Zahnkranzes die Grünlingsgestaltfestigkeit beim Auswerfen des gespritzten Bauteils. Zum Füllen der Kavität im Mikro-Pulverspritzguss werden Anguss- und Verteilersysteme benutzt. KR_MO-xxx_x_001 verlangt unabhängig vom Abformverfahren und Werkstoff, dass die Angüsse nicht an im Funktionskontakt stehende Bauteilwirkflächen gelegt werden, wie dies an der Zahnflanke oder an stirnseitigen, axialen Gleitflächen der Fall wäre.

Zur Auslegung der Verzahnung genügt es nun nicht, jede einzelne Komponente des Getriebes zu berechnen. Nicht zuletzt bedingt die Rundung der Kopfkante einen erheblichen Verlust an tragender Flankenlänge und somit der für Drehmoment- und Drehzahlkonstanz notwendigen Profilüberdeckung, ein Kriterium, das bei der Suche nach einem Mikro-Planetengetriebe mit größt möglichem Miniaturisierungsgrad entscheidend für die Funktionserfüllung ist.

3.3.2 Subsystem

Im nächsten Schritt galt es nun die unter Berücksichtigung der durch Konstruktionsregeln bedingten Gestaltvorgaben erzielbaren grundlegenden Verzahnungsgrößen (Modul, Zähnezahlen, Eingriffswinkel, Profilverschiebungen) festzulegen. Zur Verringerung der Komplexität wurde zunächst nur das Subsystem aus Sonnenrad und Planetenrad betrachtet. Unter systematischer Variation der vorhandenen Verzahnungsgrößen wurden Stirnradpaarungen ermittelt, die möglichst kleine äußere Abmessungen (Summe des Achsabstands und der Kopfkreisradien) bei gleichzeitiger Profilüberdeckung von mindestens 1 ergaben. [1] Anzumerken sei, dass es sich hier erst um Vorentwurfsvarianten handelte, in die noch keine Tolerierung einbezogen wurde. Bevor dies erfolgt, soll zunächst ein Vorentwurf einer kompletten Planetenradstufe vorliegen, da dort wie auch beim späteren Gesamtsystem neben den Verzahnungsabweichungen auch andere Maß-, Form- und Lagetoleranzen eine Rolle spielen.

3.3.3 System

Über die Zähnezahlabedingung für Planetengetriebe wurden die zuvor ausgewählten Stirnradstufen um das Hohlräder mit der kleinst möglichen Zähnezahlabergänzt. In einer weiteren Untersuchung wurden v. a. die Profilverschiebungsfaktoren und der Eingriffswinkel variiert und Grobentwürfe von kompletten Planetenradstufen ermittelt.

Einen bedeutenden Einfluss auf die Dimension und das Laufverhalten von Mikrosystemen haben Toleranzen durch Ungenauigkeiten in den Produktionsprozessen. Wo im Allgemeinen Maschinenbau Ungenauigkeiten an Zahnflanken zu Oberflächenrauigkeiten zählen, kommt es bei Zahnrädern im Mikrometerbereich zu schwerwiegenden Profilabweichungen, die bis hin zur Funktionsuntüchtigkeit des gesamten Getriebes führen können. Da für Mikrogetriebe kein Normwerk über Verzahnungstoleranzen existiert, wurden in einem Top-Down-Ansatz die Toleranzwerte für die relevanten Verzahnungsabweichungen über die Untergrenze der Norm für feinwerktechnische Getriebe extrapoliert. Eine Markterhebung von realisierten Mikrosystemen ergab ferner Richtwerte zur Tolerierung verschiedener anderer Maschinenelemente, so z.B. Gleitlager. [2]

Unter Einbezug der ermittelten Verzahnungstoleranzen für die verzahnten Komponenten und der Maßtoleranzen für das Gesamtsystem, ergab sich hinsichtlich dem Ziel eines Mikro-Planetengeriebtes höchsten Miniaturisierungsgrades bei Verwendung der beschriebenen Urformtechniken folgendes Gesamtsystem (siehe auch **Bild 5**):

Außendurchmesser	7 mm
Modul	0,169 mm
Eingriffswinkel	26°
Zähnezahlen	14 / 12 / -37
Werkstoff	Zirkonoxid

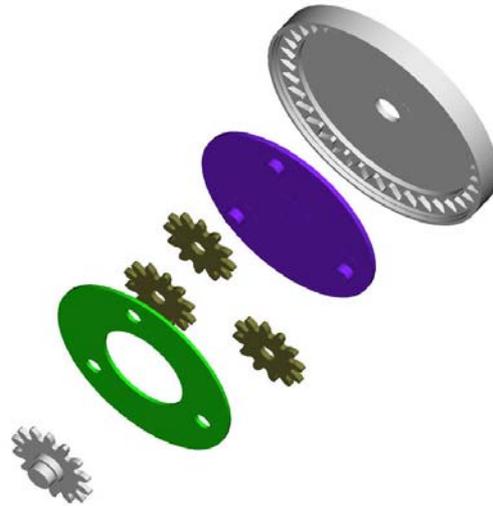


Bild 5 Gesamtentwurf des Mikro-Planetengeriebtes

4 Literatur

- [1] Albers, A.; Burkardt, N.; Marz, J.: Restrictions in the design of gear wheel components and drives for micro technology. *Microsystem Technologies* 9 (2003) 3, pp. 192 – 196
- [2] Albers, A.; Burkardt, N.; Marz, J.; Ohmer, M.: Erarbeitung eines Toleranzkonzeptes und Implementierung in ein Mikro-Planetengeriebte. *Konstruktion* 11/12-2001, S. 38-41
- [3] Albers, A.; Marz, J.: Knowledge-based Design Environment for primary shaped Micro Parts. 5th International Workshop on HARMST, June 15 – 17 2003, Monterey, California USA
- [4] Albers, A.; Marz, J.: Produktionstechnische Restriktionen mikrospezifischer Produktentwicklungsprozesse. Essen: Vulkan-Verlag 2003, S. 151 – 159
- [5] Müller-Glaser, K. D.: Moderner Entwurf von Mikrosystemen. *e&i*, 114. Jg. (1997), H. 9, S. 475 – 482
- [6] Pahl, G.; Beitz, W.: *Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung*. 4. Aufl.: Springer-Verlag, 1997
- [7] Sonderforschungsbereich 499: Mikrouformen. <http://www.sfb499.de>, Stand 11/2003
- [8] VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: Beuth-Verlag GmbH, 1993