

**Produktionstechnische Restriktionen mikrospezifischer  
Produktentwicklungsprozesse**

Restrictions of Production Engineering on micro-specific Product  
Development

A. Albers<sup>1</sup>; J. Marz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau (mkl),  
Universität Karlsruhe

**1 Einleitung**

Produktentwicklungsprozesse in der Mikrotechnik sind bisher in ihren spezifischen Merkmalen noch nicht ausreichend erfasst und beschrieben. Zu einander abgegrenzt werden derzeit einzelne Prozessschritte und Disziplinen in ihrer wissenschaftlichen Tiefe, allen voran die Produktion, betrachtet. Auch Aspekte der Qualitätssicherung und automatisierten Handhabung bedürfen stärker integrierender Ansätze. In Anbetracht der Tatsache, dass in naher Zukunft ein steigender Bedarf für mikrotechnische Produkte in mittleren bis großen Stückzahlen erwartet wird, mangelt es derzeit insbesondere in einer die Durchgängigkeit der Prozesskette urgeformter Mikroteile garantierenden, integrierten Sicht auf den Produktentwicklungsprozess. Schrittweise gilt es Prozess- und Technologiemerkmale der Prozessvorbereitung, Produktion und Werkstoff- und Bauteilprüfung in den für die Produktentstehung zentralen Schritt der Entwicklung vorzuverlagern. Dies zu leisten ist Aufgabe der Entwicklungsmethodik. Dazu wird am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau erforscht, wie die aus dem Allgemeinen Maschinenbau bekannten Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeuge der Produktentwicklung auf mikrospezifische Belange angepasst und erweitert werden können.

## 2 Produktionstechnische Restriktionen

In der Mikrotechnik wirken in besonderem Maße die produktionstechnischen Randbedingungen auf die Gestaltungsfreiheit der Systemkomponenten ein. Der Konstrukteur muss daher für einen effizienten, die geforderte Funktion optimal erfüllenden Bauteilentwurf in die Lage versetzt werden, mikrofertigungsgerecht zu entwickeln und zu konstruieren.

In einem ersten Schritt wurden dazu Technologiedatenblätter erstellt (Bild 1), um die charakteristischen geometrischen Maße und Werkzeugeigenschaften der Produktionsanlagen und die unter deren Einsatz realisierbaren Herstellgrößen (z.B. Strukturbreiten, Aspektverhältnisse) systematisch zu erheben. Unterschieden wurde dabei nach der Fertigungsverfahren und der Abformung, als den wesentlichen Produktionsschritten in der Herstellung urgeformter metallischer und keramischer Mikrobauteile.

### 2.1 Restriktionen der Fertigungsverfahren

Urförmende Produktionsprozesse setzen zunächst die Herstellung eines Formeinsatzes voraus. Mit der Zielsetzung eine wirtschaftliche Prozesskette für die industrielle Mittel- und Großserienfertigung zu etablieren und durch metallische und keramische Materialien hochbelastbare Mikrobauteilsysteme bereitzustellen, bieten abtragende und spanende Verfahren große Vorteile. Im Mittelpunkt der Formeinsatzherstellung der ersten Phase des Sonderforschungsbereichs stand das Mikrofräsen mit Mikroschafffräsern.

Verfahrensspezifische Charakteristika, die restriktiv auf den Bauteilentwurf einwirken, sind der Schaftdurchmesser des Fräasers, sowie daran gekoppelt die Schneidlänge des Fräasers. Toleranzen der Werkzeugmaschine, des Werkzeugs und der Prozessführung spielen ferner eine Rolle. Zu beachten sind auch Phänomene wie Gratbildung oder Werkzeugverschleiß – sofern dieser nicht prozessseitig kompensiert werden kann. Bild 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Technologiedatenblatt für das Verfahren Mikrofräsen.

	Technologischer Sachverhalt	Bedeutung für die Konstruktion	Anmerkungen
Strukturform	Durchmesser (mm) 4 (D1) bis 7 (D6)		Reduzierung der folgenden Faktoren: <ul style="list-style-type: none"> <li>Tragfähigkeit</li> <li>Verformbarkeit</li> <li>Verformbarkeit</li> <li>Verformbarkeit</li> </ul>
	Fasshöhe 2,3 mm		Maximale Strukturhöhe abhängig von Material und Form
	max. verlegbare Schicht 8 µm		Form mit Durchmesser 0,8 mm nicht realisierbar für die Mindeststrukturdimension 2 µm
	Durchmesser (mm) Schaft 40 (D100) Schneidteil 40 (D10) / 6 (D1)		Abhängigkeit von der Methode (z.B. Schmelz-, Schmelz- verfahren)
Durchmesser (mm) 0,2		Abhängigkeit von der Methode (z.B. Schmelz-, Schmelz- verfahren)	

Bild 1: Realisierbare Herstellgrößen in der Fertigungsverfahren

### 2.2 Restriktionen der Abformung

Zu den Prozessen der Abformung zählen das Mikropulverspritzgießen ( $\mu$ PIM), das materialabhängig in CIM für Keramik und MIM für Metall unterschieden wird, sowie der Mikroguss. Für die angesprochene Mittel- und Großserientauglichkeit eignet sich vor allem das  $\mu$ PIM-Verfahren, da dort unmittelbar in den Formeinsatz abgeformt wird und gleichzeitig eine Vielzahl von Mikrostrukturen produziert werden kann. Für den Mikroguss müssen zunächst einbettfähige Modelle beispielsweise aus Kunststoff hergestellt werden. Das Arbeiten mit verlorenen Formen deckt hierbei spezifische Anwendungsfelder ab.

Randbedingungen aus dem  $\mu$ PIM ergeben sich aus der Notwendigkeit von Angusskanälen ausreichender Anzahl und Größe an Bauteilflächen, sowie von Angriffsflächen für Auswerferstifte zur Entformung. Maximal mögliche Fließlängen und Aspektverhältnisse als auch scharfe Querschnittsübergänge und -umlenkungen begrenzen die Formfüllung bzw. die Güte des Formfüllverhaltens. Insbesondere zu beachten ist der je nach

gewähltem Werkstoff auftretende nahezu lineare Schrumpfung während des Sinterprozesses.

Sind auch die bisher erhobenen Technologiedaten in ihrem Einfluss auf die Bauteilgestalt bekannt, so bleibt ihre Projektion auf Strukturmerkmale an Mikrobauteilen nach wie vor dem Problembewusstsein und der Erfahrung des Konstrukteurs überlassen. Um nun diese Verfahrensdaten und -informationen in den Konstruktionsprozess verwertbar und personenunabhängig einzubringen, wurden die Restriktionen konstruktionsrelevant interpretiert. Als methodisches Hilfsmittel wurden Konstruktionsregeln definiert und rechnergestützt bereitgestellt.

### 3 Konstruktionsregeln – Restriktionen konstruktionsrelevant interpretiert

Konstruktionsregeln sind konkrete Handlungsanweisungen für die mikrogerechte Bauteilgestaltung. Sie ergeben sich aus technologischen Grundanforderungen heraus.

Konstruktionsregeln eignen sich aufgrund ihres Konkretisierungsgrades insbesondere zur Umsetzung quantitativer Prozessparameter in geometrisch-mathematische Ausdrücke. Dadurch lassen sich die Daten in Datenbanken verwalten und zur Unterstützung des CAD-Entwurfs unmittelbar an das Konstruktionssystem ankoppeln. Aber auch in den Prozessschritten Produktplanung und -konzeption kann der Entwickler durch Hinweis auf restriktive Merkmale in seinen Entscheidungsprozessen geführt werden. Neben der technologiebezogenen Erschließung liegt ein Hauptaugenmerk auf der rechnergestützten prozessbegleitenden Bereitstellung von Konstruktionsregeln.

#### 3.1 Struktur zur Regeldarstellung

Um der Forderung einer rechnergestützten Abbildung der Konstruktionsregeln nachzukommen, wurde zur eindeutigen Identifikation ein Klassierungsschlüssel definiert. Danach setzt sich die Struktur zur

Regeldarstellung - der Regelschlüssel - zusammen aus der Regelklasse und einer Nummer (Bild 2).

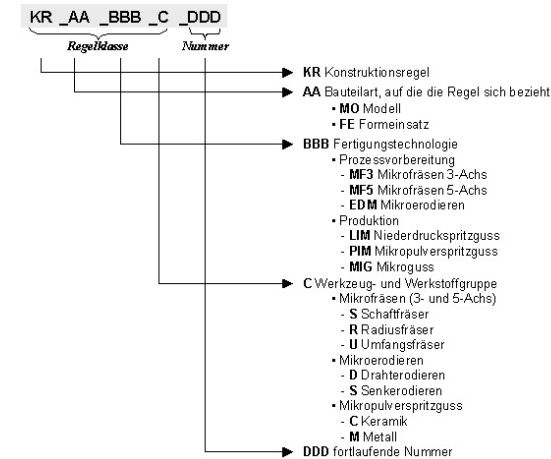


Bild 2: Klassierungsschlüssel für Konstruktionsregeln

In der Regelklasse enthalten ist die Bauteilart, auf die sich die Regel bezieht, in Abhängigkeit derer Angaben zur Fertigungstechnologie und näheren Spezifikation der Werkzeug- und Werkstoffgruppe folgen. Findet eine Regel auf mehrere Produktionstechniken oder Werkzeug- bzw. Werkstoffgruppen Anwendung, stehen statt der aufgelisteten Kennbuchstaben die Einträge „xxx“ bzw. „x“. Für die Bauteilart ist dies nicht möglich, da der Regelinhalt eindeutig dem Formeinsatz oder dem Modell zugeordnet werden muss. Daher existieren prinzipiell unterschiedliche Datensätze an Konstruktionsregeln für Form und Modell, allerdings sind diese geometrisch eindeutig miteinander verknüpft. Restriktionen aus der Formeinsatzherstellung betreffen automatisch auch das abgeformte Bauteil und umgekehrt. Ein Unterschied besteht allerdings in den geometrischen Eigenschaften. So wird das Bauteil durch den Abformprozess zum einen durch den Sinterschrumpfung skaliert, zum anderen entstehen komplementäre Abbildungen; aus einer Bohrung im Formeinsatz wird ein Zylinder mit

geringerer Höhe und Durchmesser im Modell. Diese Unterscheidung nach Bauteilart stellt es dem Konstrukteur somit frei, ob er nun das Modell des Mikrobauteils oder den dazugehörigen Formeinsatz entwickelt.

### 3.2 Beispiel technologiebezogener Konstruktionsregeln

Beispielhaft sei die Konstruktionsregel **KR\_FE\_MF3\_x\_002** erläutert. Sie bezieht sich auf den Formeinsatz als Bauteilart und gilt für die prozessvorbereitende Fertigungstechnologie des 3-Achs Mikrofräsens. Sie zeigt mit dem Eintrag „x“ ihre Gültigkeit für mehrere Werkzeuggruppen (Schaft- und Radiusfräser) an und ist die zweite ihrer Regelklassenzusammensetzung. In einer mathematischen Beziehung ausgedrückt lautet sie:

$$R_{\text{Innenkante}} \geq d_{\text{Fräser}} / 2 + T_{\text{Fräs}}$$

Durch den runden Querschnitt eines Fräsers können keine scharfen Innenkanten oder –radien, die kleiner als der Fräserradius zuzüglich der Frästoleranzen sind, hergestellt werden. Für die konkrete Bauteilgeometrie eines Mikrozahnrades (Bild 3) bedeutet dies eine Kopfkantenrundung von mindestens 50 µm bei dem derzeit kleinsten für reproduzierbare Ergebnisse einsetzbaren Schaftfräser mit einem Schaftdurchmesser von 100 µm. Dies zieht einen Verlust an tragender Flankenlänge nach sich, wodurch die zur Funktionserfüllung geforderte Profilüberdeckung sinkt.

## 4 Rechnergestützte Bereitstellung von Konstruktionsregeln

Um die Konstruktionsregeln rechnergestützt bereitzustellen, wurde mit dem Aufbau einer wissensbasierten Konstruktionsumgebung begonnen. Sowohl eine Informationskomponente als auch ein 3D CAD-System mit einem KBE (Knowledge-Based Engineering) – Modul sind darin integriert, die beide auf eine einheitliche Datenbasis zurückgreifen.

### 4.1 Die Informationskomponente: Konstruktions- und Methodikdatenbank (KoMeth)

Dem Entwickler und Konstrukteur steht mit „KoMeth“ eine Wissensdatenbank zur Verfügung, in der er über verschiedene Zugriffsmethoden die für seinen Anwendungsfall spezifischen Konstruktionsregeln abrufen kann. Aufgeführt sind Regelschlüssel, Name und mathematische Formulierung. Veranschaulicht wird dies anhand von Skizzen, Beschreibungen sowie CAD- und realen Bildern (Bild 3).

The screenshot displays the 'Konstruktionsregeln' (Construction Rules) interface. At the top, there is a search bar containing the rule ID 'KR FE MF3 x 002'. Below this, the rule details are shown: 'Name: Mikrofräsung des Innenkantenverrundung', 'Formel:  $R_{\text{Innenkantenverrundung}} \geq d_{\text{Fräser}} / 2 + T_{\text{Fräs}}$ ', and a 'Skizze' section with a 2D drawing of a hole with chamfered edges. A 'Beschreibung' section contains text explaining the rule's application in micro-machining. Below the description is a technical drawing with dimensions: 'Produktionsgenauigkeit: 2 µm', 'Längshöhe des Innenspanns: 2 µm', 'Längshöhe des Flanschs: 2 µm', 'Abstand zum Flansch: 2 µm', and 'Längshöhe des Innenspanns: 2 µm'. A 'Graphik' section shows a 3D CAD model and a real image of a micro-gear with a 200 µm scale bar. The 'Anwendung' section is titled 'Kopfkantenrundung an Mikrozahnradern'. The interface also features a sidebar with navigation options like 'Suche', 'Konstruktionsregeln', 'Dokumente', 'Fräsung', 'Fräsen', 'K. Management', 'Konstruktionsregeln', 'Suche', and 'Anwendung'.

Bild 3: KoMeth – Konstruktions- und Methodikdatenbank

#### 4.2 Die Entwurfskomponente: KBE-Modul im 3D CAD-System Unigraphics V18.0

Für die Anwendung von Konstruktionsregeln auf den Entwurfsprozess wurde das KBE-Modul des 3D CAD-Systems Unigraphics V18.0 [4] um spezifische Funktionalitäten erweitert.

Zu Beginn wird der Konstrukteur aufgefordert Bauteilart, Fertigungs- und Werkstoffgruppe festzulegen. Das Programm extrahiert nach dem Ansatz der Begrenzungselemente (boundary representation – B-rep) [3] Kanten und Flächen sowie Beziehungen zwischen diesen aus dem dreidimensionalen Produktmodell. Die erhaltenen geometrischen Kennwerte und die um fertigungstechnische Parameter konkretisierten Regeln werden zu Elementregeln verknüpft. Diese Elementregeln werden im Modul UG/KF (Unigraphics / Knowledge Fusion) überprüft und Regelverletzungen in einem Dialogfenster angezeigt (Bild 4).

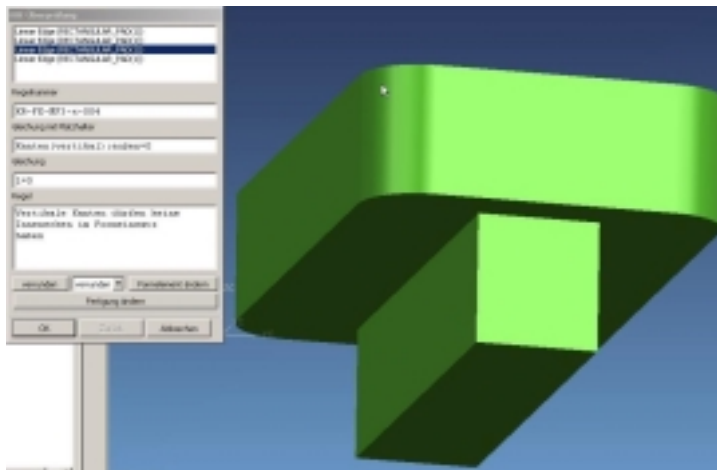


Bild 4: Wissensbasierte Entwurfsumgebung (Dialogfenster mit Regelverletzungen)

#### 5 Zusammenfassung

Produktionstechnische Restriktionen wurden in ihrem Einfluss auf den Produktentwicklungsprozess urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen aufgezeigt. Konstruktionsrelevant interpretiert finden sie als Konstruktionsregeln Eingang in die mikrofertigungsgerechte Entwicklung und Konstruktion. Die Konstruktionsregeln lassen sich insbesondere nach der Bauteilart, auf die sie sich beziehen, sowie nach der Herstelltechnologie klassieren und in einer Datenbank ablegen. Ihre rechnergestützte Bereitstellung wurde einerseits über das Informationsportal „KoMeth“ und zum anderen für die wissensbasierte Konstruktion im 3 D CAD-System Unigraphics erbracht. Beide Komponenten werden zukünftig verstärkt in einer wissensbasierten Konstruktionsumgebung integriert.

#### 6 Literatur

- [1] Albers, A., Burkardt, N., Marz, J. Restrictions in the design of gear wheel components and drives for micro technology. Microsystem Technologies accepted 24 september 2001, still to be published. 2002. Berlin Heidelberg, Springer.
- [2] Albers, A., Marz, J., Burkardt, N. Entwicklungsmethodik bei Konzeption und Entwurf eines Mikro-Planetengeriebtes. 47.Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 23.-26.September 2002.
- [3] Cherian, R. P., Midha, P. S., Smith, L. N., Pipe, A. G. Knowledge based and adaptive computational techniques for concurrent design of powder metallurgy parts. Advances in Engineering Software Band 32, S. 455-465. 2001.
- [4] Unigraphics CAD/CAM/CAE-System für die durchgängige virtuelle Produktentwicklung (VPD). 2002.  
<http://www.ugsolutions.de/produkte/unigraphics.shtml>