

o. Prof. Dr. - Ing. Dr. h.c. A. Albers, Dipl.-Ing. N. Burkardt,
Dipl.-Ing. J. Marz, Dipl.-Ing. M. Ohmer
Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstrasse 12, Postfach 6980, 76128 Karlsruhe
Tel. (0721) 608 2371, Fax (0721) 608 6051

Danksagung

Die Arbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 499 „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauerteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“ gefördert.

Erarbeitung eines Toleranzkonzeptes und Implementierung in ein Mikro-Planetengeräte

Constituting a tolerance concept and implementation in a micro planetary gear

In vielen hochtechnologisierten aber auch konventionellen Anwendungsbereichen gewinnen Mikrosysteme eine immer bedeutendere Rolle. Für Systeme hoher Kompaktheit, Dezentralität und Leistungsdichte entwickelt sich ein zunehmender Bedarf an immer kleineren Antriebs- und Steuereinheiten bei steigender Belastbarkeit.

Die zur Herstellung von hochbelastbaren Mikrobauerteilen in mittleren bis hohen Stückzahlen geeigneten Fertigungs- und Abformverfahren wirken in besonderer Weise restriktiv auf die Bauteilgestaltung ein und erfordern neue Toleranzkonzepte.

Dieser Thematik angenommen hat sich der Sonderforschungsbereich SFB 499 „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauerteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“.

In a lot of high potential and conventional scopes of application micro systems get an increasing role. For systems of high compactness, decentralism and power density smaller power and control units are requested which are at the same time higher chargeable.

Since the production of highly chargeable micro parts within middle and high production range is concerned the relevant production and moulding techniques implicate special restrictions in the part design and lead to new concepts for tolerancing.

The DFG funded collaborative research centre 'Development, production and quality assurance of primary shaped micro components from metallic and ceramic materials' deals with this topic.

Mikroplanetengeräte eignen sich, auch aufgrund ihrer Bedeutung für den klassischen Maschinenbau, als ausgezeichnetes und anspruchvolles Demonstratorobjekt, um in neue Dimensionen des Maschinenbaus vorzudringen.

Der nachfolgende Beitrag behandelt die methodisch getriebene Entwicklung einer Mikroplanetengeräte unter besonderen restriktiven Anforderungen für das Design von Verzahnungen an der Grenze von Feinwerktechnik zur Mikrotechnik. Ausgehend von einem optimierten Startdesign, werden die aus einem Toleranzkonzept gefundenen Erkenntnisse auf das Getriebesystem übertragen und weiter hin zu einem anforderungsgerechten Mikro-Planetengeräte entwickelt.

1 Restriktionen durch Fertigungsvorbereitung und Abformung

Der Demonstrator Mikro-Planetengetriebe wird im Hinblick auf eine für Mittel- bis Großserienproduktion ausgerichtete Fertigungs- und Abformtechnologie hin entwickelt. Mikrozerspanend hergestellte Formeinsätze aus Hartmetall dienen als verschleißbeständige Kavitäten, in die mittels Pulverspritzguss als Feedstock aufbereitete Keramik – Bindergemische gespritzt werden (CIM = ceramic injection moulding). Vorherrschend aus diesen Prozessschritten entstammen technologische Restriktionen, die unmittelbar auf die Konzeption der Mikrobauteile einwirken.

Mit der Formeinsatzherstellung durch einen Mikroschafffräser sind minimale Strukturbreiten sowie zerspanbare Strukturiefen auf die derzeit mit 100 µm im Durchmesser kleinsten, für reproduzierbare Ergebnisse einsetzbaren Fräswerkzeuge begrenzt. Gemäß den Prozessschritten im Pulverspritzguss sind zur Erreichung der Zielbauteildimension Maßvorhalte aufgrund des Sinterschrumpfes zu berücksichtigen.

2 Fertigungs- und Abformtoleranzen

Mit dem Zerspanvorgang einhergehend treten Fertigungstoleranzen durch Werkzeug, Werkzeugmaschine und Prozessführung auf. Auch beim Kompaktieren des abgespritzten Bauteils vom Bräunling zum fertigen Zielbauteil mittels Sintern tritt eine Sinterschrumpfschwankung auf. Diese Abweichungen müssen erfasst und den zur Funktionserfüllung einer Mikro-Planetenradstufe zulässigen Toleranzen gegenübergestellt werden. Das so erstellte Toleranzkonzept wird zur anforderungsgerechten Auslegung einer Mikro-Planetenstufe herangezogen.

3 Vorauslegung der Planetenstufe ohne Berücksichtigung der Toleranzen

In einer vorausgehenden Arbeit wurde von der methodisch getriebenen Entwicklung und Optimierung einer Planetenradstufe berichtet [1]. In einer noch toleranzfreien Untersuchung wurde hier durch systematische Variation vorhandener Merkmale und Parameter der Verzahnung eine Planetenradstufe höchster Miniaturisierung mit einem Überdeckungsgrad von gerade 1 ermittelt. Mit Zähnezahlen von 14 für die Sonne, 12 für die Planetenräder und – 37 für das Hohlrad konnte bei einem Eingriffswinkel von 23° und einem Modul von 116 µm ein zu erwartender Getriebeaussendurchmesser von 5 mm festgelegt werden. Um das Getriebe tatsächlich fertigen und abformen zu können, sollen nun die funktionsrelevanten Verzahnungstoleranzen aufgestellt und in einem weiteren Optimierungsschritt in die Getriebestufe implementiert werden.

4 Stand der Technik zu Toleranzkonzepten für Mikrobauteile

Zur Festlegung eines geeigneten Ansatzes für ein Toleranzkonzept werden bestehende Normen sowie realisierte Maschinensysteme und Akteure des allgemeinen Maschinenbaus, der Feinwerk- und Mikrotechnik herangezogen.

DIN ISO 286 stellt Vorschriften für die Tolerierung von Bauteilen des allgemeinen Maschinenbaus bereit. Im Geltungsbereich dieser Norm ist keine Untergrenze für das Nennmaß angegeben, allerdings gibt es eine weitere Norm, DIN 58700, die speziell für die Feinwerktechnik Toleranzen festlegt. Sie gilt für Nennmaße ab 1 mm aufwärts.

Für Zahnräder mit einem Modul über 1 mm gibt es in DIN 3961 sowie in den darauf aufbauenden Normen DIN 3962, DIN 3963, DIN 3964 und DIN 3967 klare und für umfassend viele Einsatzzwecke sowie Messmöglichkeiten Vorschriften zur Tolerierung von Zahnrädern.

DIN 58405 legt - weniger umfassend als DIN 3961 - Toleranzen für Zahnräder der Feinwerktechnik mit einem Modul bis hinab zu 0,2 mm und einem Kopfkreisdurchmesser von mindestens 3 mm fest. Das Planetenrad als kleinste Komponente der betrachteten Planetengetriebestufe liegt mit einem Modul von 0,116 mm und einem Kopfkreisdurchmesser von 1,624 mm jedoch unterhalb dieser Kleinstmaße, für die noch Tolerierungsvorschriften existieren.

Als wichtige Erkenntnis lässt sich daraus schließen, dass für Zahnräder der Mikrotechnik noch kein genormtes Toleranz- und Passungssystem existiert.

Eine Recherche über bereits realisierte, einzelne, spezifische Anwendungen ergab, dass die Art und Randbedingungen dieser Systeme zu unterschiedlich und die dort verwendeten Toleranzen noch nicht hinreichend statistisch abgesichert sind, um daraus eine gesicherte Toleranzaussage für die Neukonstruktion eines Mikrobauteilsystems abzuleiten. Lediglich für einzelne Bereiche der Konstruktion, zum Beispiel Mikrogleitlager, können Erfahrungen bereits existierender Systeme auf den Anwendungsfall übertragen werden.

Diese Analyse hat gezeigt, dass nach Stand der Technik keiner der beschriebenen Ansätze ein umfassendes Tolerierungskonzept für Getriebebauteile der Mikrotechnik bereitstellt.

5 Toleranznormen im Allgemeinen Maschinenbau und in der Feinwerktechnik

5.1 Allgemeine Toleranzen

Zunächst wurde das Vorgehen bei der Tolerierung von Bauteilen im allgemeinen Maschinenbau genauer untersucht. Hier gilt bis zu einem Nennmaß von 500 mm in weiten Bereichen laut DIN ISO 286 die Gleichung:

$$i = 0,45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0,001 \cdot D$$

wobei der Toleranzfaktor i , multipliziert mit einem weiteren Faktor, der von der IT-Qualität abhängt und tabellarisch festgelegt ist, die Toleranzfeldbreite des jeweiligen Grundtoleranzgrades ergibt.

Aufbauend auf dieser Grundgleichung wurde untersucht, wie diese Vorgehensweise in ähnlicher, angepasster Form auf die Mikrotechnik übertragen werden kann. Ein zentrales Problem hierbei ist, dass der Graph dieser Funktion im Bereich kleiner Nennmaße immer steiler verläuft, d.h. mit kleiner werdendem Nennmaß wird der Quotient aus Toleranzfeldbreite und Nennmaß immer größer.

Will man die Grundgleichung, was mathematisch zunächst keinerlei Probleme darstellt, auf kleinere Nennmaßbereiche anwenden, so steht das sich hierbei ergebende Resultat in keinerlei Verhältnis zu den bereits gemachten Erfahrungen bei der Produktion herkömmlicher Mikrobauteile. Eine Abwandlung der Formel für i wäre zu diesem Zeitpunkt noch reine Spekulation, da zur Zeit noch zu wenige Erfahrungswerte für den hier interessierenden Nennmaßbereich unter 3 mm vorliegen.

5.2 Toleranzen der Feinwerktechnik

DIN 58700, die allgemeine Toleranzen für Bauteile der Feinwerktechnik festlegt, erweitert den in DIN ISO 286 angegebenen Geltungsbereich auf einen für den vorliegenden Fall unwesentlich kleineren Nennmaßbereich bis hinunter zu 1 mm. Dabei folgt das Festlegen der Toleranzfeldauswahl im Prinzip dem Vorgehen wie in der DIN ISO 286, wobei hier die Abmaßtabelle durch die Untergliederung in engere Nennmaßbereiche dem präziseren Anspruch der Feinwerktechnik Rechnung trägt.

5.3 Spezifische Toleranzen für Verzahnungen

5.3.1 Verzahnungstoleranzen des allgemeinen Maschinenbaus

Da DIN 3961, die Toleranzgrößen für Zahnräder des allgemeinen Maschinenbaus festlegt, auf der DIN ISO 286 aufbaut, ist nicht zu erwarten, dass die dort angegebenen Toleranzen ohne weitere Korrektur auf Mikrobauteile erweitert werden können.

5.3.2 Verzahnungstoleranzen der Feinwerktechnik

DIN 58405 legt Toleranzen für Zahnräder ab einem Modul von 0,2 mm und einem Kopfkreisdurchmesser beginnend ab 3 mm fest. Es werden nicht – wie in DIN 3961 – verschiedene Prüfgruppen für die zu tolerierenden Maße bereitgestellt. Die Funktion des Getriebes legt die Getriebepassung fest. Die Maße, die toleriert werden, sind für alle Getriebepassungen identisch und in DIN 58405 tabelliert.

Da wie oben erwähnt keine der beiden Toleranznormen auf den vorliegenden Fall einer Mikroplanetenstufe anwendbar ist, wurde ein Ansatz zur Fortführung des Getriebepasssystems der Feinwerktechnik angedacht.

6 Ansatz zur Tolerierung von Mikrozahnrädern

Als Ansatz für ein Toleranzkonzept wurde eine größendimensionsbezogene Extrapolation über den unteren Nennmaßbereich der Feinwerktechnik hinaus vorgenommen, da gemäß der spezifischen technologischen Gegebenheiten im SFB 499 die relevanten Verzahnungsgrößen nur knapp unterhalb derer der DIN 58405 für Zahnräder der Feinwerktechnik liegen.

Zunächst wurde für jede der zu tolerierenden Verzahnungsgrößen ein Diagramm erstellt, in dem die vorgeschriebenen Abmaße über dem Nennmaß aufgetragen wurden. Da die Toleranzen in der Norm immer für einen Nennmaßbereich gelten, wurde als relevantes Maß hier, wie auch in DIN ISO 286 üblich, der geometrische Mittelwert zwischen dem größten und dem kleinsten Maß, für das dieser Bereich gültig ist, angenommen. Über diesem Wert wurde die in der Norm tabellarisch angegebene Toleranz bzw. die angegebenen Abmaße aufgetragen.

Anschließend wurde durch die gegebenen Punkte eine Ausgleichskurve ermittelt und diese nachfolgend für kleinere Maßbereiche extrapoliert. Anhand dieser Kurve kann nun eine erste Abschätzung über die Größenordnung der neu zu bestimmenden Toleranz getroffen werden.

Da der hier interessierende Maßbereich nicht weit unterhalb des Geltungsbereichs dieser Norm liegt, kann davon ausgegangen werden, dass die Größenordnung der sich dabei ergebenden Werte für ein erstes Tolerierungskonzept ausreichend genau ist (Bild 1).

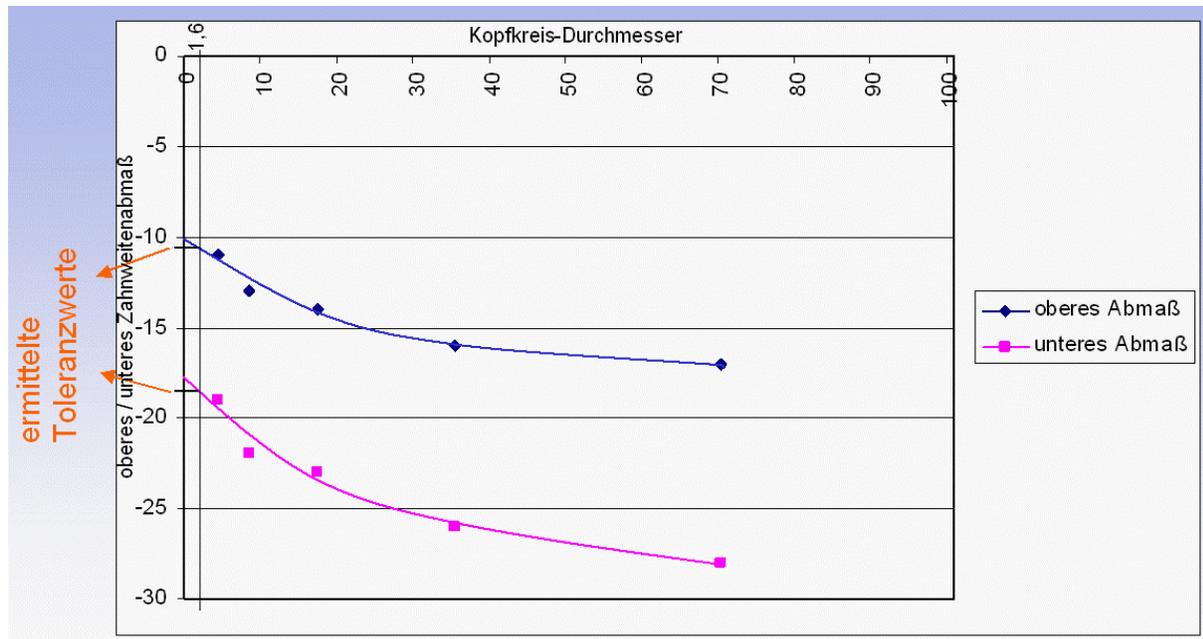


Bild 1. Extrapolation der Zahnweitenabmaße auf Basis DIN 58405

Auf diese Weise erhält man zum Beispiel Zahnweitenabmaße von $-11 \mu\text{m}$ und $-18 \mu\text{m}$ für die Planetenräder der betrachteten Getriebestufe in Verzahnungsqualität 6.

In wie weit diese Toleranzen noch korrigiert werden müssen, wird sich erst nach einer statistisch aussagekräftigen Anzahl von Versuchen mit gefertigten und genau vermessenen Zahnrädern herausstellen.

6.1 Bewertung des Extrapolationsansatzes

Diese Art der Extrapolation der Toleranzwerte lässt sich jedoch nicht beliebig fortsetzen. Entfernt man sich zu weit von dem Bereich, über den gesicherte Aussagen bestehen, kann der Verlauf der zu extrapolierenden Kurve nicht mehr genau genug abgeschätzt werden, um auf diese Weise auch nur eine ungefähre Aussage über die festzulegende Toleranz machen zu können. Allerdings ist es möglich, sich durch das Sammeln von Erfahrungen in dem momentan betrachteten Durchmesserbereich gesichertere Aussagen über Toleranzen zu verschaffen und sich somit schrittweise nach unten vorzutasten.

Diese Strategie als sogenannter Top-Down-Ansatz kann sich als sinnvoll erweisen, weil er „nach dem technischen Stand als fertigungstechnisch beherrschbar einzustufen“ ist [16].

Ein weiterer Vorteil des schrittweisen Vortastens ist, dass hierbei Erfahrungen gesammelt werden, die die gesamte Bandbreite des Bereiches zwischen der unteren Grenze der Feinwerktechnik-Normen und dem aktuellen Stand der Forschung abdecken. Würde man einen komplett neuen Ansatz für die Tolerierung von Bauteilen mit Abmessungen im Mikrometerbereich entwickeln, bestünde die Gefahr, dass zwischen den Bereichen, für die

es bereits Tolerierungsvorschriften und Erfahrungswerte gibt, "graue Zonen" entstehen, für die keiner der bereits bestehenden Ansätze gilt.

Bei dieser Vorgehensweise ist auch zu beachten und bei jedem Schritt erneut zu überprüfen, dass mit kleiner werdenden Abmaßen Effekte betrachtet werden müssen, die bei einer bisherigen Verzahnung vernachlässigt werden konnten bzw. völlig andere Auswirkungen hatten. So werden zum Beispiel Ungenauigkeiten, die an den Flanken von Zahnrädern des allgemeinen Maschinenbaus zu Oberflächenrauigkeiten zählen, bei Zahnrädern mit Abmessungen im Mikrometerbereich zu schwerwiegenden Profilabweichungen, die nicht nur das Laufverhalten und den Wirkungsgrad beeinflussen, sondern über die Funktionalität des gesamten Getriebes entscheiden können.

6.2 Probleme bei der Umsetzung des Extrapolationsansatzes

Ein wesentliches Problem bei der Produktion von Mikrozahnrad-Komponenten mittels der eingangs beschriebenen Verfahren Mikrofräsen und Mikro-Pulverspritzgießen stellen die momentan erreichbaren Fertigungstoleranzen dar. Verfahrenabhängig unterscheidet man grundlegend verschiedene Arten von Fertigungstoleranzen.

Die erste Art ist die Ungenauigkeit, mit der die Form beim Fräsen hergestellt werden kann. Sie ist abhängig von der Genauigkeit der verwendeten Maschine und beträgt derzeit bis zu 20 μm . Wichtig ist hier, dass diese Ungenauigkeit ein absoluter Wert ist, der unabhängig von der Größe des zu fertigenden Bauteils ist.

Die zweite Art ist die Ungenauigkeit, die durch unterschiedlich starken Sinterschrumpf entsteht. Sie beträgt $\pm 0,4\%$, ist also ein relativer Wert, der sich auf die Abmessungen des Bauteils bezieht.

Da die Fertigungstoleranzen, die im betrachteten Größenbereich für die Zahnräder festgelegt werden, unterproportional mit der Bauteilgröße wachsen, ergibt sich folgende Situation (Bild 2):

Um mit der derzeit eingesetzten Frästechnologie die Fertigungstoleranzen einhalten zu können, muss das zu fertigende Bauteil eine gewisse Mindestgröße aufweisen. Das kleinste Zahnrad, bei dem die engste Fertigungstoleranz mindestens 20 μm beträgt, hat laut DIN 58405 einen Kopfkreisdurchmesser von mindestens 200 mm, liegt also mehr als zwei Größenordnungen über dem momentan angestrebten Durchmesser, der seinerseits auch wieder lediglich eine Zwischenstufe bei der Miniaturisierung darstellen soll.

Da die Ungenauigkeiten durch den Sinterschrumpf proportional mit der Bauteilgröße abnehmen, muss im Gegenzug hierzu das Bauteil eine gewisse Höchstgröße unterschreiten, damit die vorgegebenen Fertigungstoleranzen eingehalten werden können. Dies kommt dem Ziel einer steten Miniaturisierung des Demonstrators entgegen. Die Grenze ab derer diese Bedingung erfüllt ist, liegt lediglich um den Faktor 0,87 unter der derzeit angestrebten Größe für den ersten Prototyp.

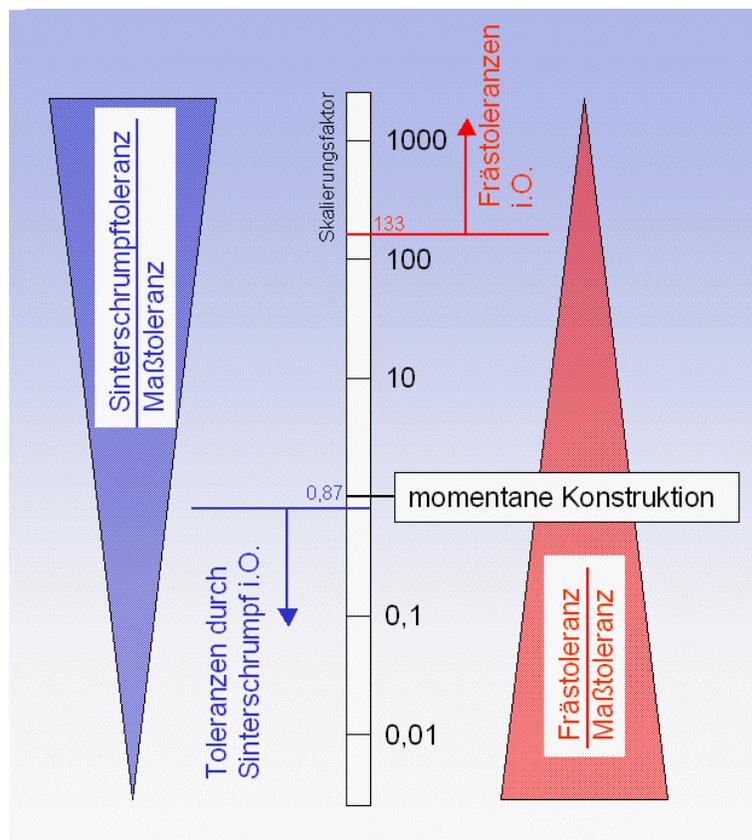


Bild 2. Verschiedene Toleranzarten und deren Auswirkung auf die Bauteildimension

Eines der Hauptprobleme bei dieser Toleranzbetrachtung ist, dass die beiden Bereiche, in denen die geforderten Toleranzen durch die Fertigungsverfahren Fräsen bzw. Sintern eingehalten werden können, sich überlappen sollten, um eine Massenproduktion ohne Auslesepaarung von Bauteilen zu ermöglichen.

Bild 2 macht auch klar deutlich, dass – wenn lediglich die beiden oben genannten Fertigungsungenauigkeiten betrachtet werden - bei weiterer Miniaturisierung der Bauteile immer die Ungenauigkeiten, die durch das Fräsen des Formeinsatzes entstehen, für die Begrenzung der Bauteilgröße ausschlaggebend sein werden. Je weiter die Größe der Bauteile herunterskaliert wird, umso unerheblicher ist die Schwankung des Sinterschrumpfes im Vergleich zu den Ungenauigkeiten durch das Fräsverfahren.

7 Implementierung der Toleranzen

Bei der Implementierung der Toleranzen in das unter den technologischen Randbedingungen auf $\varepsilon = 1$ optimierte Getriebe wurde in zwei Schritten vorgegangen. Zunächst blieb die Achsabstandstoleranz unberücksichtigt, da der Achsabstand vom Betrag her deutlich größer ist als andere zu tolerierende Abmessungen und somit stärkere Auswirkungen auf die Gesamtgröße des Getriebes hat.

Um die durch die Einbeziehung der Toleranzen fallende Profilüberdeckung wieder auf den Wert $\varepsilon = 1$ zu heben, bietet sich eine weitere Erhöhung des Eingriffswinkels unter Anpassung der Profilverschiebungsfaktoren an. Stößt diese Maßnahme an die Grenzen für die Profilverschiebung zur Vermeidung von Hinterschnitt oder Spitzwerden der Zähne, ist der

Modul zu erhöhen. Zu beachten ist hierbei immer das Optimierungsziel, ein Getriebe mit größtmöglichem Miniaturisierungsgrad zu finden. Bild 3 stellt die erzielbaren Profilüberdeckungen für verschiedene Eingriffswinkel und Moduln dar.

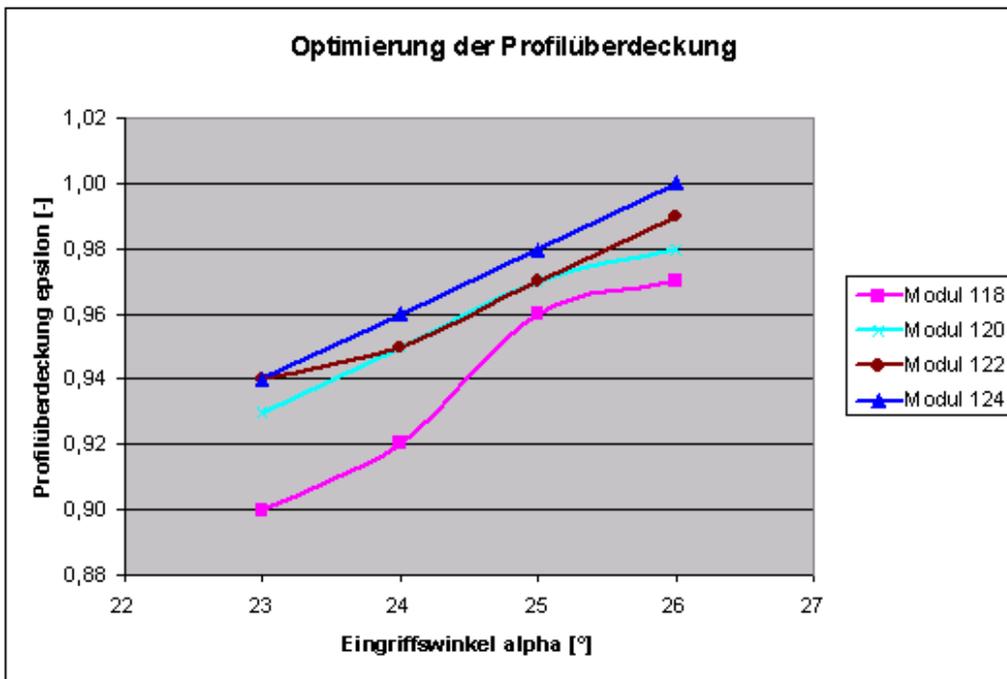


Bild 3. Variation von Verzahnungsparametern zur Optimierung der Profilüberdeckung

Erst bei einem Modul von 124 μm und dem für sinnvolle Verzahnungsberechnungen nicht überschreitbaren Eingriffswinkel von 26° kann eine Gesamtüberdeckung von $\varepsilon = 1$ erreicht werden.

Die Achsabstands-Abmaße wurden aus den extrapolierten Wertetabellen der Feinwerktechniknorm entnommen. Ferner wurde bei der Festlegung der Abmaße die Überlegung mit einbezogen, dass die mit Nabenbohrungen versehenen Planetenräder auf Achszapfen laufen und sich folglich dort eine Gleitlagerstelle ausbildet. Aus der Untersuchung zum Stand der Technik von Toleranzkonzepten fordert [15] für funktionstüchtige Mikro-Gleitlager ein Mindestlagerspiel von $4 \mu\text{m}$. Außerdem soll zur Vermeidung von Drehzahl- und Drehmomentschwankungen unter der ungünstigsten Kombination und Anordnung paarender Zahnräder wenigstens 1 Zahn während der ganzen Zeit im Eingriff sein. D.h., kommt es zur Kombination eines Planetenträgers mit oberem Abmaß und einem Planeten mit unterem Nabenbohrungsabmaß durch den Sinterschrumpf, so soll der untere Wert der effektiven Profilüberdeckung gerade 1 betragen.

Wie Bild 4 für die kritischere effektive Profilüberdeckung zwischen der Außenradpaarung Sonne – Planet zeigt, ist diese Forderung nur mit einer erheblichen Steigerung des Moduls möglich. Die Getriebestufe bei Erreichen der Forderung weist eine Gesamtprofilüberdeckung von 1,12 auf. Dies bestätigt den dominanten Einfluss der Achsabstandstoleranz gegenüber den anderen Verzahnungstoleranzen; ein Getriebe unter den gegebenen Randbedingungen muss also mit einem $\Delta\varepsilon \approx 0,15$ ausgelegt werden, um den Toleranzanforderungen gerecht zu werden und das Verzahnungsgesetz zu erfüllen.

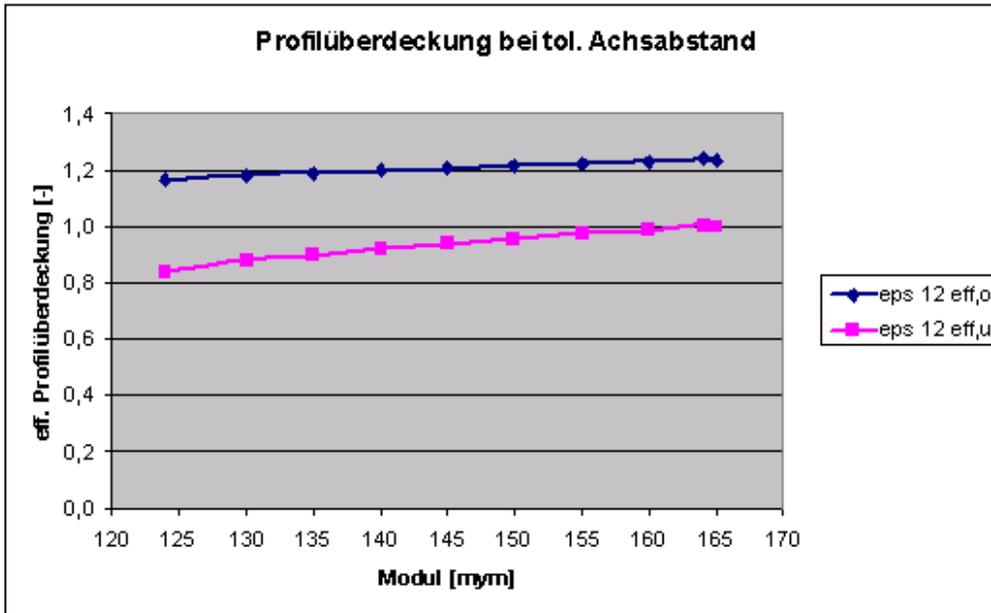


Bild 4. Einfluss des Moduls auf die Profilüberdeckung bei toleriertem Achsabstand

8 Zusammenfassung

Der hier gezeigte Ansatz für ein Tolerierungskonzept für mikrotechnische Getriebebauteile verfolgt den Ansatz einer Fortführung und weiteren Skalierung konventioneller Tolerierungssysteme des allgemeinen Maschinenbaus und der Feinwerktechnik (Top-Down-Ansatz). Bei weiterer und auch geplanter Miniaturisierung der Getriebekomponenten ist jedoch eine Grenze erkennbar, die den Übergang zu einem völlig neuen Tolerierungsansatz für Mikrobeuteile bis hinunter in den Sub-Mikrometerbereich erforderlich macht.

Diese Grenze wird im wesentlichen definiert sein durch neue bzw. zunehmend dominierende mikrotechnische Effekte. Als mittel- bis langfristiges Ziel wäre analog dem allgemeinen Maschinenbau und der Feinwerktechnik ein Normenwerk für die Mikrotechnik zu schaffen.

Literatur

- 1 Albers A., Burkardt N., Marz J.: >Restrictions in the design of gear wheel components and drives for micro technology< (noch nicht veröffentlicht)
- 2 DIN ISO 286: >ISO-System für Grenzmaße und Passungen<
- 3 DIN 3961: >Toleranzen für Stirnradverzahnungen<
- 4 DIN 3962: >Toleranzen für Stirnradverzahnungen<
- 5 DIN 3963: >Toleranzen für Stirnradverzahnungen<
- 6 DIN 3964: >Achsabstandsmaße und Achslagetoleranzen von Gehäusen für Stirnradgetriebe<
- 7 DIN 3967: >Getriebe-Passsystem: Flankenspiel, Zahndickenabmaße, Zahndickentoleranzen<
- 8 DIN 3990: >Tragfähigkeitsberechnung von Gerad- und Schrägstirnrädern<
- 9 DIN 58400: >Bezugsprofil für Evolventenverzahnungen an Stirnrädern für die Feinwerktechnik<
- 10 DIN 58405: >Stirnradgetriebe der Feinwerktechnik<
- 11 DIN 58700: >Toleranzfeldauswahl für die Feinwerktechnik<
- 12 Krause W.: >Konstruktionselemente der Feinmechanik<, 2. Aufl. München/Wien, Carl Hanser Verlag 1993.
- 13 Niemann G., Winter H.: >Maschinenelemente< Band II, 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo 1983.
- 14 Roth, K.: >Zahnradtechnik< Band I, Band II, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1989.
- 15 Thürigen Ch.: >Zahnradgetriebe für Mikromotoren<, Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 1, Nr. 326, Düsseldorf: VDI Verlag 2000.
- 16 Westkämper E.: >Miniaturisierung der Produktions- und Messtechnik<, Carl Hanser Verlag, München, f&m 109 (2001) 9; 56-59