

ZUM EINFLUSS GEOMETRISCHER ABWEICHUNGEN AUF DIE KINEMATIK VON WELLGETRIEBEN

Kristin Paetzold

Kurzfassung

Im Gegensatz zu klassischen Zahnradgetrieben erfolgt im Wellgetriebe die Kraft- und Bewegungsübertragung nicht über das Prinzip der Hebelwirkung sondern wird durch eine Deformationswelle erreicht, die im Getriebe umläuft. Die Kinematik solcher Getriebe lässt sich durch Hypozykloiden beschreiben, deren geometrische Dimensionen nur relativ kleine Werte erreichen, da sie vorrangig durch die Verzahnungsparameter einer kleinmoduligen Verzahnung geprägt sind. Entsprechend großen Einfluss auf den Bahnkurvenverlauf üben darum fertigungsbedingte und belastungsbedingte Faktoren aus. Bereits geringfügige Abweichungen in der Bauteilgeometrie bewirken Veränderungen in den Übertragungsfunktionen, was sich hauptsächlich auf den Wirkungsgrad des Getriebes niederschlägt und bis zum Versagen des Getriebes führen kann. Im vorliegenden Beitrag wird darum nach einer Beschreibung der Kinematik auf Besonderheiten in der Auslegung solcher Getriebe eingegangen.

1 Einleitung

Hochübersetzende Präzisionsgetriebe gewinnen sowohl in der Industrie als auch im Konsumgüterbereich an Bedeutung. In Kraftfahrzeugen z.B. findet man heute bis zu fünfzig Kleingetriebe, die vor allem als Stellgetriebe für Fensterheber, Sitzverstellungen, Zentralverriegelung oder Lüftung eingesetzt werden. Neben den hohen Übersetzungen sind auch genaue Winkelübertragungen und ein geringes Bauvolumen ausschlaggebend für viele Einsatzbereiche. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Universität Erlangen in Zusammenarbeit mit der Firma MOS (Oechsler AG Ansbach) mit einem Getriebekonzept, welches nach dem Wellgetriebeprinzip arbeitet. Das besondere am WAVE-DRIVE[®]-Getriebe ist der Einsatz von Kunststoff für alle Einzelteile. Die Funktion des WAVE-

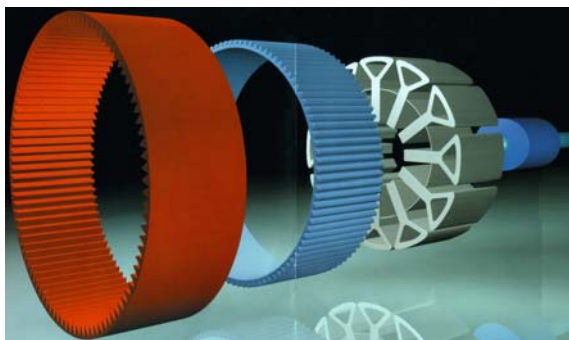


Bild 1: Prinzipieller Aufbau des WAVE-DRIVE[®]-Getriebes

DRIVE[®]-Getriebe wird im wesentlichen durch 4 Bauteilen bestimmt: dem Wellgenerator, dem Stößelrad, dem Flexband und dem gehäusefesten Abtriebshohlrad (Bild 1). Grundlage für die Realisierung des Wirkprinzipes (Bild 2) bildet ein verformbares Zahnband, das Flexband, welches durch den Wellgenerator (Wave-Generator) angetrieben wird und dessen unrunde Form eine Querwelle erzeugt, die über das Stößelrad auf das Flexband übertragen wird. Bei den gegenwärtigen Getriebevarianten hat der Wellgenerator eine elliptische Form, aber auch andere Formen z.B. Sinoiden oder freie Formen sind denkbar.

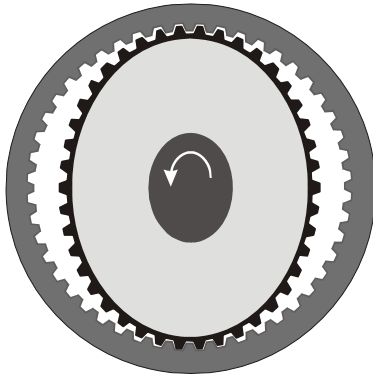


Bild 2: Wirkprinzip von Wellgetrieben

Die Drehzahlumwandlung wird bestimmt durch die Zähnezahldifferenz zwischen dem Hohlrad und dem Flexband. Da diese sehr klein ist ($z_{\text{hohl}} - z_{\text{flex}} = 2$) können Übersetzungen von 1:50 bis 1:5000 (bei mehrstufigen Getrieben) erreicht werden. Die Ermittlung des Übersetzungsverhältnisses und des Wirkungsgrades erfolgt nach der Theorie der Planetengetriebe, da Wellgetriebe einen Spezialfall von Planetengetrieben darstellen. Das ist auch die Basis für das hohe Potenzial bei der getriebetechnischen und geometrische Gestaltungsfreiheit. Aufgrund des besonderen Wirkprinzipes ist beim WAVE-DRIVE®-Getriebe kein klassisches Abwälzen der Verzahnung aufeinander zu beobachten, stattdessen bewegen sich die Zähne translatorisch ineinander.

2 Die Kinematik der Wellgetriebe

Zur Beschreibung dieser Kreis-Schub-Bewegung wird der Bewegungsablauf aufgeteilt. Zum einen führt das Zahnband eine durch die Form des Wellengenerators definierte Bewegung aus, die sich in einem körperfesten a-b-Koordinatensystem durch die Funktionen $a(\varphi)$ und $b(\varphi)$ darstellen lässt. Dabei soll im folgenden davon ausgegangen werden, dass der Wellengenerator elliptisch geformt ist. Bei der Bestimmung der Bewegungsgleichungen infolge der Deformation des Flexbandes geht man von einer neutralen Faser in diesem aus. Für die Berechnung sind nur Punkte am Zahnkopf interessant, so dass die Normale im Punkt C um einen Winkel $\theta(\varphi)$ gekippt wird (Bild 3a).

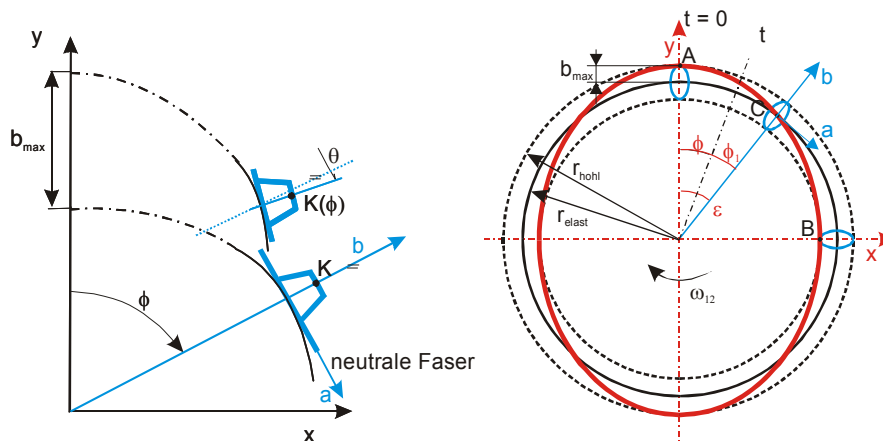


Bild 3: a) körperfestes a-b-Koordinatensystem b) gestellfestes x-y-Koordinatensystem

Die durch die Ellipse hervorgerufene Deformation bewegt sich als Querwelle im gehäusefesten Hohlrad um. Darum wird ein gehäusefestes x-y-Koordinatensystem definiert (Bild 3b) in welches die Funktionen $a(\varphi)$ und $b(\varphi)$ transformiert werden:

$$\begin{bmatrix} x(\varphi) \\ y(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a(\varphi) \\ b(\varphi) \end{bmatrix}$$

Über den Winkel α fließt dabei das Übersetzungsverhältnis in die Gleichungen ein.

Als Ergebnis erhält man die für Wellgetriebe typischen Hypozykloiden, die den Zahneingriff prägen (Bild 4b). Als eine Schlüsselgröße für die Bahnkurven erweist sich die maximale radiale Deformation b_{max} . Bei einer gegebenen Zähnezahldifferenz und unter Berücksichtigung

von geometrischen Verhältnissen zwischen dem Flexband und dem Hohlrad ergibt sich, daß für eine optimale Bewegungsübertragung der Modul m gleich der maximalen radialen Deformation sein soll. Auf dieser Basis wird eine Vergleichsvariable λ eingeführt:

$$\lambda = b_{max} / m$$

Wird b_{max} kleiner gewählt als der Modul, verkürzen sich die Hypozykloiden (Bild 4c) im Extremfall kann der Zahneingriff nicht mehr gewährleistet werden, es kommt zum Übereinschlagen des Hohlrades über das Flexband. Wird b_{max} dagegen größer als der Modul gewählt, erhält man überstreckte Hypozykloiden (Bild 4a). Dabei vergrößert sich der Kontaktbereich zwischen Flexband und Hohlrad, was zu einer größeren Gleitreibung führt und entsprechend Einfluss auf den Wirkungsgrad nimmt. Als optimal hat es sich erwiesen, wenn λ zwischen 0,95 und 1,2 liegt [1,2].

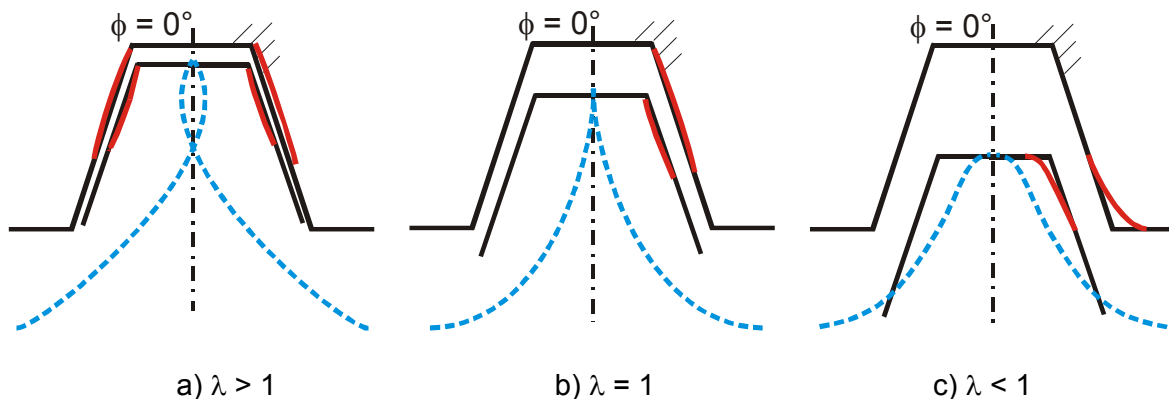


Bild 4: Darstellung der Bahnkurven in Abhängigkeit von λ

3 Der Einfluss von Fertigung und Belastung auf die Kinematik

Aufgrund der gegebenen Zähnezahldifferenz genügen als Ausgangspunkt für die Getriebe-gestaltung das gewünschte Übersetzungsverhältnis und die Baugröße. Übersetzungen von kleiner als 1:50 haben sich dabei als problematisch erwiesen, weil der dann erforderliche Modul so groß wird, dass im Flexband die Biegespannungen zu hoch werden.

Fehlermöglichkeit	Ort der Entstehung	Folgen für Getriebe
veränderter Bahnkurvenverlauf	Formabweichungen des Wellgenerators	verändertes Gleitverhalten; Zahnkopferferenzen, abweichende Kinematik
veränderte radiale Deformation	Schwankungen in charakteristischen Ellipsenradien	verkürzte oder überzogene Hypozykloide, erhöhte Gleitreibung in der Verzahnung oder Übereinschlagen
veränderte Eindringtiefe	am Flexband: Banddicke und Verzahnung; am Hohlrad: Verzahnung, Höhe der Stößelräder	Verkleben oder Übereinschlagen der Verzahnung
Verzug der Bauteile	allen Bauteilen, vorrangig Gehäuse	Zahnkopferferenzen

Tabelle 1: Mögliche Fehler der Kinematik infolge geometrischer Schwankungen

Für die Module der Verzahnung wählt man i.a. sehr kleine Werte bis ca. 0,8 mm, wobei die Grenze nach unten fertigungsbedingt ist. Diese Modulbereiche ziehen entsprechend geringe radiale Deformationen nach sich, Schwankungen in der Getriebegeometrie wirken sich ent-

sprechend stark auf die Kinematik aus. Welche Fehler dabei auftreten können, ist in Tabelle 1 aufgeführt, sie führen i.a. zu Wirkungsgradverlusten. Die Analyse zeigt, dass mögliche geometrische Ungenauigkeiten zu Veränderungen der Eindringtiefe, veränderten Zahnflankenweiten oder zu veränderten Bahnkurven führen. Die oben beschriebenen Bahnkurven erhält man nur im unbelasteten Zustand des Getriebes, in Folge der Belastung durch ein Abtriebsdrehmoment bzw. bereits bei entsprechend hohen Drehzahlen verändert sich die Kinematik. Gravierender als die Einflüsse auf die Bahnkurven, die durch Durchbiegungen, Verdrehwinkel etc. auftreten, sind Verschleißerscheinungen. Hier ist durch die Wahl der Gleitpaarung anzustreben die Verschleißraten zu minimieren. Ursache für den Verschleiß ist die hohe Reibleistung, die nicht komplett abgeführt werden kann und mit der Laufzeit zu Aufschmelzungen der Kunststoffteile führt. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Verschleißraten hauptsächlich durch die Drehzahl determiniert werden, Bild 5.

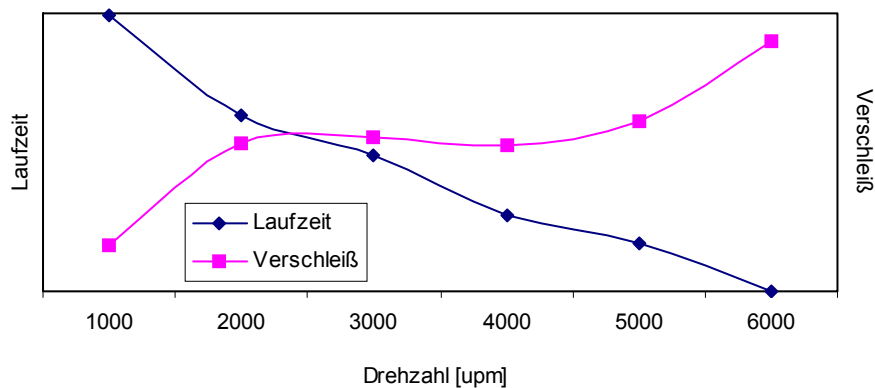


Bild 5: Einfluss des Verschleißes auf die Kinematik des Getriebes

Neben belastungsbedingten Einflüssen auf die Kinematik spielen auch fertigungsbedingte Abweichungen in der Geometrie der Bauteile eine wichtige Rolle. Eine hochpräzise Fertigung ist zwingende Voraussetzung für die Getriebefunktion und stellt eine große Herausforderung sowohl auf konstruktionstechnischer als auch auf fertigungstechnischer Ebene dar. Der Konstrukteur muß berücksichtigen, dass sowohl die Werkzeugfertigung als auch der Spritzgussprozess selbst toleranzbehaftet ist. Für einen Großteil der Kunststoffe sind in der DIN 16901 (Kunststoffformteile, Toleranzen und Abnahmebedingungen) [4] die wichtigsten Toleranzen und Maßabweichungen angegeben. Bei Bauteilgrößen bis 50 mm sind demnach immerhin noch Toleranzen von $\pm 0,33$ mm zulässig. Am Wellgenerator mit einem Nennmaß von ca. 17 mm betragen die Toleranzen noch $\pm 0,08$ mm. Das sind Werte, die für ein Wellgetriebe mit einem Modul von 0,5 mm schwerwiegende Folgen haben können.

Die größten Schwierigkeiten bereiten dabei die Schwindungen des Kunststoffes im Spritzprozess. Zwar kann der Konstrukteur den Schwund in der Konstruktion berücksichtigen, aber er arbeitet mit linearen Schwundmaßen, die im Spritzgussverfahren selbst so nicht erreicht werden können. Um trotzdem hochpräzise Bauteile zu erhalten ist i.a. das Know-How und die Erfahrungen des Herstellers der Kunststoffteile gefragt. Auch die Formgenauigkeit der einzelnen Bauteile ist dabei stark von einer gleichmäßigen Schwindung abhängig. Hier treten vor allem am Gehäuse Widersprüche zwischen einer fertigungs- und einer belastungsge rechten Auslegung der Bauteile auf.

4 Anforderungen an den Konstrukteur

Der Konstrukteur hat die Aufgabe, bei der Auslegung die Richtlinien zum kunststoffgerechten Konstruieren einzuhalten [3]. Die Verwendung von Kunststoff und die Verarbeitung im Spritzgussprozess bieten dem Konstrukteur auch einen hohen Freiheitsgrad bei der Bauteilgestaltung, was sich gerade auf die Verzahnungsgeometrie positiv auswirkt und gezielt genutzt werden kann. Diese Freiheit in der Formgebung erlaubt es, die Funktionserfüllung auch bei Störungen durch äußere Einflüsse zu gewährleisten. Die Fehleranalyse verdeutlicht, dass der Ausgleich von Ungenauigkeiten vorrangig über die Gestaltung der Verzahnung erfolgen muß. Hierzu zählen das Kopf- und Fußspiel, die Zahnflankenweite im Hohlrad, das Zahnflankenspiel, der Zahnflankenwinkel und die Einlaufradien am Zahnfuß und Zahnkopf. Die Verzahnungen werden i.a. so ausgelegt, dass die λ -Werte zwischen 1,05 und 1,2 liegen, wodurch die Hypozykloiden überzogen werden (Bild 4a), vor allem um Belastungseinflüsse zu berücksichtigen, da durch die Belastung das Flexband aus der Hohlradverzahnung herausgezogen wird.

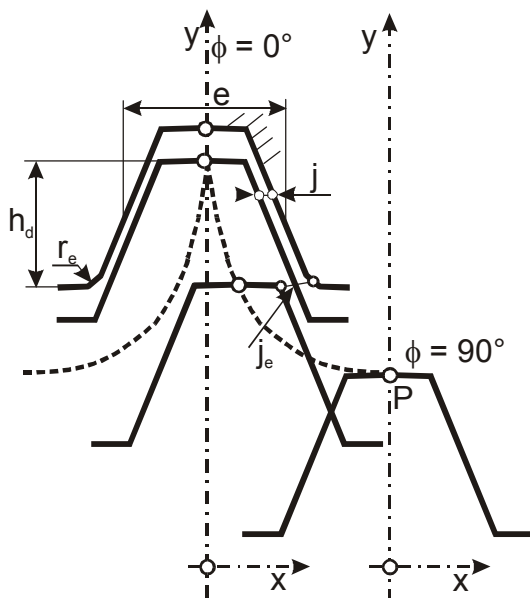


Bild 6: Geometrische Größen am Zahneingriff

Das wichtigste Bauteil für die Erzeugung der Kinematik ist der Wellgenerator. Er sollte darum zum einen so präzise wie möglich und zum anderen möglichst robust gegen Belastungseinflüsse ausgelegt werden. Hierbei spielt vor allem die Verschleißfestigkeit eine sehr große Rolle. Während ein Verschleiß am Stößelfuß lediglich die Eindringtiefe h_d verändert, hat der Verschleiß am Wellgenerator nachhaltigen Einfluss auf den Bahnkurvenverlauf. Die Eindringtiefe lässt sich dabei am leichtesten korrigieren, indem das Kopf- bzw. Fußspiel entsprechend bestimmt wird. Formabweichungen, die hauptsächlich am Wellgenerator auftreten können, aber auch durch Bauteilverzug z.B. am Gehäuse auftreten führen dagegen zu Veränderungen im Bahnkurvenverlauf. Die Folge davon sind hauptsächlich Zahnkopffinterferenzen, die sich über die Zahngeometrie kompensieren lassen. Der einfachste Ansatz für einen sauberen Zahneingriff ist es, am Zahnkopf Einlaufkurven r_e (einfache Radien) zu definieren. Für die besondere Kinematik haben sich geradflankige Verzahnungen als optimal erwiesen, wodurch mit steigendem Flankenwinkel die Gefahr für Zahnkopffinterferenzen sinkt. Beim Zahnflankenwinkel dagegen fließt auch eine Gleitoptimierung in die Gestaltung ein, wofür eher steile Flanken benötigt werden.

Ein veränderter Zahnflankenbedarf kann durch eine entsprechende Gestaltung (Verbreiterung) der Zahnflanken im Hohlrad unter Beachtung der Zahnfußspannungen realisiert werden [1]. Damit werden gleichzeitig Belastungseinflüsse sehr gut abgefedert. Statt der Zahnflanken kann auch das Zahnflankenspiel j geringfügig angepasst werden, wobei hier eine Optimierung erforderlich ist. Neben der Kompensationsfunktion kann auch der Eingriffsbereich der Verzahnung korrigiert werden. Je mehr Zähne im Eingriff sind, desto kleiner werden die Belastungen im Zahn, aber gleichzeitig ist der Gleitreibungsanteil relativ hoch. Eine Auslegung erfordert demnach genaue Kenntnisse der Belastung und setzt umfangreich Berechnungen voraus.

Ein veränderter Zahnflankenbedarf kann durch eine entsprechende Gestaltung (Verbreiterung) der Zahnflanken im Hohlrad unter Beachtung der Zahnfußspannungen realisiert werden [1]. Damit werden gleichzeitig Belastungseinflüsse sehr gut abgefedert. Statt der Zahnflanken kann auch das Zahnflankenspiel j geringfügig angepasst werden, wobei hier eine Optimierung erforderlich ist. Neben der Kompensationsfunktion kann auch der Eingriffsbereich der Verzahnung korrigiert werden. Je mehr Zähne im Eingriff sind, desto kleiner werden die Belastungen im Zahn, aber gleichzeitig ist der Gleitreibungsanteil relativ hoch. Eine Auslegung erfordert demnach genaue Kenntnisse der Belastung und setzt umfangreich Berechnungen voraus.

5 Rechnergestützte Auslegung von Wellgetrieben

Die Auslegung von Wellgetrieben unterscheidet sich grundlegend von der klassischer Zahnradgetriebe. Es ist daher sinnvoll, dem Konstrukteur ein rechnergestütztes Werkzeug zur Verfügung zu stellen, das ihn bei der interferenzfreien Auslegung der Verzahnung eines Wellgetriebes unterstützt. Im Mittelpunkt steht dabei die graphische Simulation des Zahneingriffes mit veränderlichen Parametern. Als Parameter sind die Geometrie der Verzahnung, sowie die zu erwartenden Belastungen wichtig. Darüber hinaus muss die Möglichkeit zur Analyse von Fertigungseinflüssen bestehen.

Am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik wird derzeit ein Auslegungstool für Wellgetriebe entwickelt. Als Implementierungsplattform dient dabei die plattformunabhängige objektorientierte Programmiersprache JAVA. Neben dem Vorteil der Plattformunabhängigkeit bietet JAVA umfangreiche Funktionalität zur graphischen Simulation. In einer ersten Ausbaustufe erfolgt die Darstellung der Simulation zweidimensional. Eine vollständig dreidimensionale Modellierung und Simulation der Eingriffsverhältnisse wird in späteren Versionen angestrebt.

6 Zusammenfassung

Die Kraft- und Bewegungsübertragung im Wellgetriebe weicht sehr stark von der in einem klassischen Zahnradgetriebe ab. Daraus folgt veränderter und angepasster Auslegungsprozess für Wellgetriebe. Da die Kinematik von der kleinmoduligen Verzahnung geprägt wird, gewinnen Belastungseinflüsse und Fertigungsungenauigkeiten einen hohen Stellenwert. Der Beitrag versucht, mögliche Fehlerquellen, deren Entstehung und den Entstehungsort zu beschreiben, um dann gezielte Hinweise darüber geben zu können, wie die Kinematik möglichst robust gestaltet werden kann.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Ivanov, M.N.: „Volnovye Zubčatye Peredači“; Moskva Vysšaja Skola 1981.
- [2] Kunad, G., Leistner, F.: „Wellgetriebe - Funktion Bauformen und Kinematik“
Wiss. Zeitschrift der TH Otto von Guericke Magdeburg 26 (1982) Heft 6, S. 67-73.
- [3] Meerkamm, H.: „Fertigungsgerechtes Konstruieren“, Skriptum zur Vorlesung. Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, 2000.
- [4] DIN 16901: Kunststoffformteile, Toleranzen und Abnahmebedingungen für Maße.

Kristin Paetzold
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg
Martensstraße 9
91058 Erlangen
Tel.: ++49 9131 / 85 23220
Fax: 49 9131 / 85 23223
email: paetzold@mfk.uni-erlangen.de
<http://www.mfk.uni-erlangen.de>