

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Dr.-Ing. Thomas Nagel / Dipl.-Ing. Sebastian Fraulob

Beitrag zur Entwicklung hochleistungsfähiger Zahnriemen- getriebe unter Nutzung von FEM

ABSTRACT

Zahnriemengetriebe sind als gleichförmig übersetzende Getriebe in vielfältigen Anwendungen bekannt, so z.B. zur Steuerung der Nockenwelle im Kfz oder als Linearachse in der Automatisierungstechnik. Für getriebetechnische Untersuchungen wurden neueste Simulationstools entwickelt und gemeinsam mit der Industrie getestet, um den hohen Aufwand an Material, Zeit und Personal bei der Produktentwicklung zu reduzieren und zugleich Reserven für die Optimierung zu erschließen. Hier bildet die Methode der „Finiten Elemente“ einen vielversprechenden Ansatz.

Zahnriemengetriebe werden in der Technik immer häufiger in hochbelasteten Applikationen der Antriebstechnik verwendet. Neben den zu gestaltenden Trends zu höheren Geschwindigkeiten und Leistungsdichten, verringerten Geräuscentwicklungen und erhöhter Übertragungsgenauigkeit, stehen berechenbare Aussagen zu Zuverlässigkeit und Verschleiß noch aus. Das Formulieren von Versagensmechanismen erweist sich aber gerade bei Zahnriemengetrieben als sehr kompliziert, da stets mehrere, verformbare Zähne gleichzeitig im Eingriff stehenden, der Zahnriemen selbst aus sehr unterschiedlichen Materialien aufgebaut ist und eine Vielzahl von Einflussfaktoren gleichzeitig wirken.

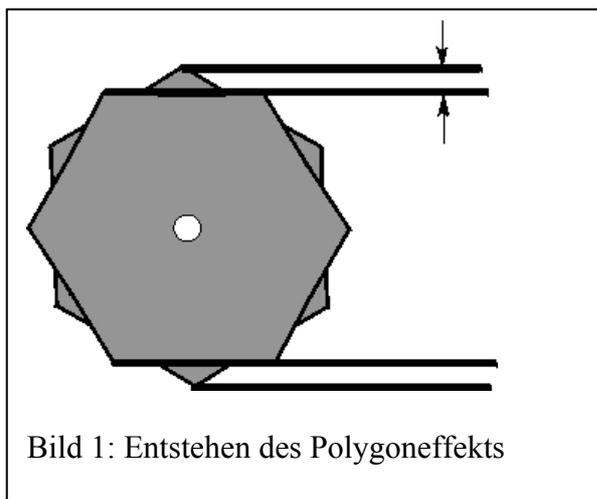
Die Methode der Finiten Elemente (FEM) und ihre Anwendung auf Zahnriemengetriebe ermöglicht eine Berechnung der im Inneren des Zahnriemens auftretenden Verformungen und somit die daraus abgeleiteten Kräfte sowie Spannungen. Aber auch das Verhalten der Grenzflächen von Riemen-Scheibe können untersucht werden, z.B. bezüglich Reibkräfte und -wege. Bei Betrachtung des gesamten Getriebes können damit kritische Bereiche erkannt, analysiert und optimiert werden. Deshalb werden seit Mitte 1999 am Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design (IFTE) intensive Forschungsarbeiten in enger Kooperation mit Riemenherstellern auf der einen Seite und interessierten Anwendern auf der anderen Seite durchgeführt. Im Ergebnis der Arbeiten entstanden komplette Getriebemodelle für Polyurethan- und Polychloroprene- bzw. HNBR-Zahnriemen, deren Eignung nachgewiesen werden konnte und die nun für die Produktentwicklung nutzbar sind. Projekte aus dem Kfz-Bereich (Nockenwelle, Lenkgetriebe), aus dem Bereich industrieller Sondergetriebe

sowie aus dem Bereich der Entwicklung neuer Hochleistungsprofile sind aktuelle Aufgaben, an denen das IFTE mit diesen neuen Modellen Anteil nimmt.

Aufgrund des Beachtens getriebetechnischer Besonderheiten von Zahnriemen bei der Modellierung sind aus Experimenten bekannte Effekte, wie z.B. **Polygoneffekt** und **Einlaufkeil**, nun auch in der Simulation nachweis- und auswertbar. Damit gelingt es erstmalig, die **Belastungsverteilungen** an An- und Abtriebsscheibe detailliert und zeitabhängig zu beschreiben sowie die verrichtete **Reibarbeit** an den Riemenzähnen zu berechnen. Das wiederum sind die Voraussetzungen für das Entwickeln von spezifischen Verschleißmodellen und Versagensmechanismen. Doch auch ohne diese, noch zu entwerfenden Verschleißmodelle, sind die neuen Simulationen schon jetzt eine wertvolle Hilfe beim Untersuchen der Wirkungsweise vielfältiger Einflussfaktoren und fördern somit das Verständnis des komplexen Kraftwirkungsmechanismus zwischen Riemen und Scheibe. Insbesondere lassen sich nun die verschleißbestimmenden **Einzahnvorgänge** und die bedeutsamen **Flächenpressungen im Stegbereich** sowie die Umverteilung der Zahnkräfte untersuchen. Im Nachfolgenden sollen deshalb die einzelnen fettgedruckten Punkte detaillierter angesprochen werden.

1. Polygoneffekt

Der Polygoneffekt tritt an verzahnten Zahnscheiben auf und bewirkt ein sich ständiges Ändern des



momentanen Laufradius mit der Drehung der Scheibe (Bild 1). Das Zugmittel wird dadurch zu transversalen Trumschwingungen angeregt, was zu erhöhter Geräuschentwicklung führt. Dieser Effekt ist von Rollenketten hinlänglich bekannt, tritt aber auch bei anderen verzahnten Zugmittelgetrieben grundsätzlich auf. Um diesen Effekt zu verringern, können große Scheibenzähnezahlen, kleine Teilungen oder besonders günstige Profilgeometrien genutzt werden. Bei den Zahnriemen-

getrieben sind derartige günstige Profile die sogenannten Hochleistungsprofile, bei denen sich der Riemenzahn im Lückengrund der Scheiben abstützt und somit den Polygoneffekt soweit absenkt, dass er messtechnisch kaum noch nachgewiesen werden kann. Mit Hilfe der FE-Simulationen sind die unterschiedlichen Profilgeometrien auch bezüglich des Polygoneffekts auswertbar. Die Zugstranglage des AT-Profiles gibt Bild 2 wieder. Bild 3 zeigt die Ergebnisse für den Vergleich des in DIN7721 genormten T-Profiles mit dem Hochleistungsprofil AT als Abwicklungsdiagramm. Im Leerlauf sind deutliche Unterschiede erkennbar, die aus dem unterschiedlichen

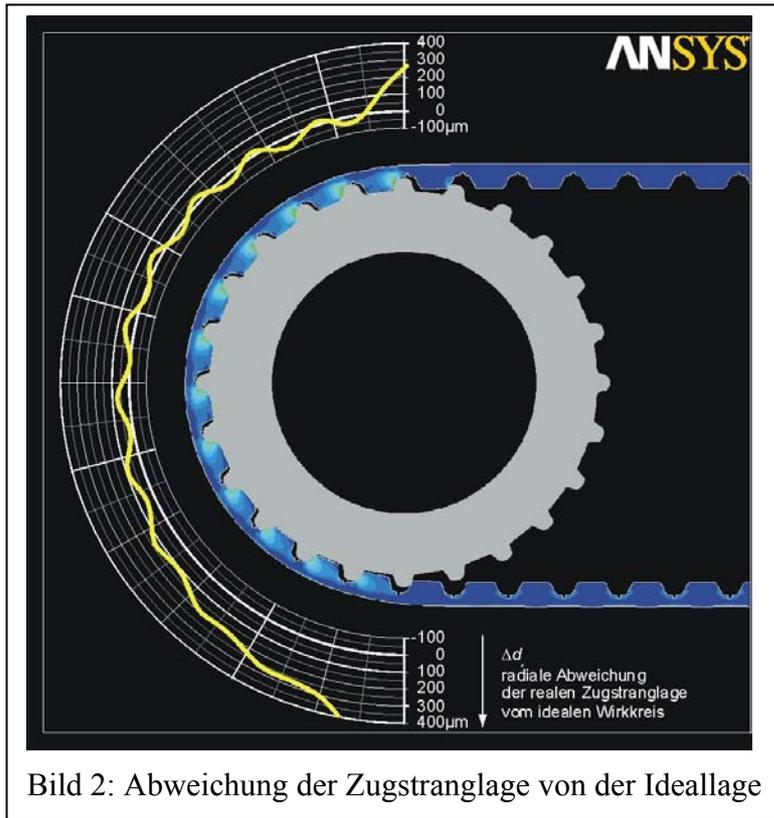


Bild 2: Abweichung der Zugstrangle von der Ideallage

Abstützcharakter der Zähne herühren. Bei Nennbelastung verändert sich die Lage des Zugstrangs auf dem Umschlingungsbogen grundlegend. Durch den Zugkraftabbau im Zugstrang ändert sich, bedingt durch die endliche radiale Steifigkeit, auch der Zugstrangabstand von der Scheibenoberfläche. Dieser Effekt ist relativ klein und an der Antriebsscheibe messtechnisch kaum nachweisbar. An der Abtriebsscheibe hingegen ist dieser Effekt deutlich größer und als „Einlaufkeil“ hinlänglich bekannt.

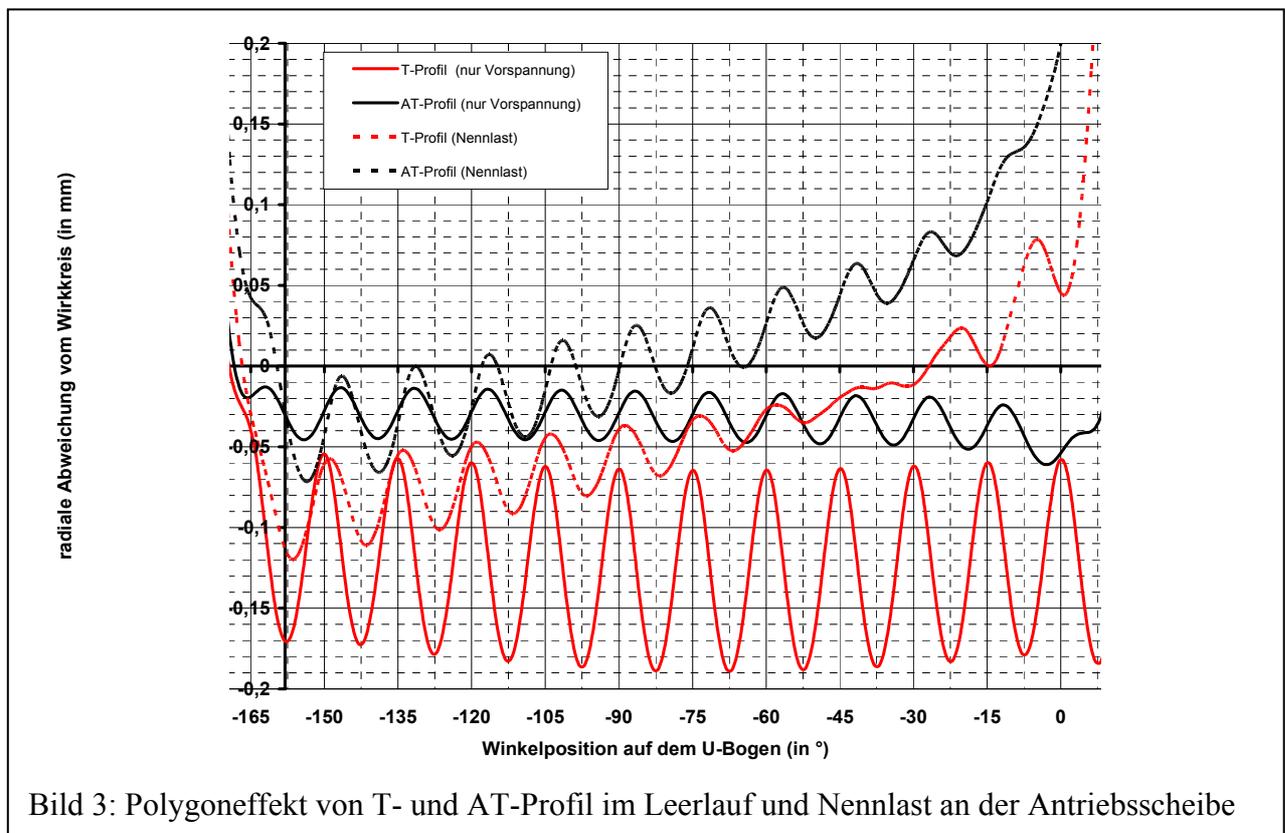


Bild 3: Polygoneffekt von T- und AT-Profil im Leerlauf und Nennlast an der Antriebsscheibe

2. Einlaufkeil

Als „Einlaufkeil“ wird das Herausdrücken des Riemens aus der Verzahnung der Scheibe bezeichnet, der insbesondere bei zu kleinen Vorspannkraften beim Einlauf des Riemens in die Abtriebs-
scheibe auftritt. Bild 4 zeigt ein Simulationsbild und ein reales Getriebefoto zweier Hochleistungs-
profile bei zu geringer Vorspannkraft.

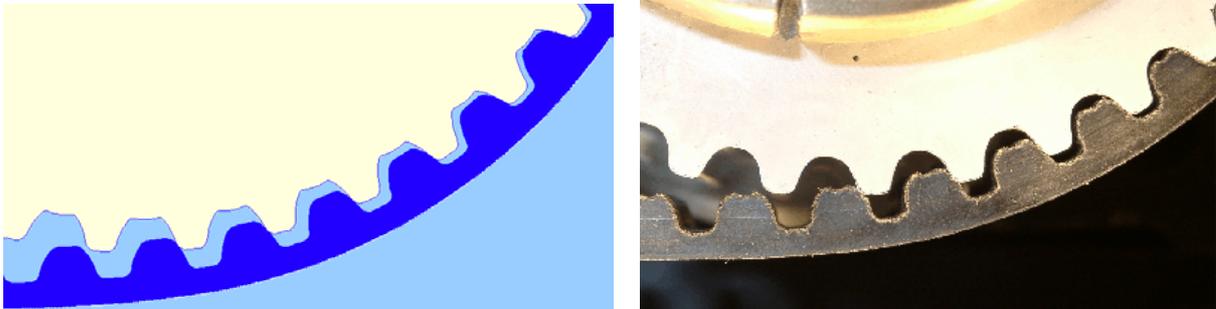


Bild 4: Einlaufkeile verschiedener Hochleistungsprofile

Wenn dieser Einlaufkeil zu groß wird, kann es zur Schädigung des Riemens oder gar zum Überspringen der Verzahnungen kommen. Dies muss durch die Wahl der richtigen Vorspannkraft sicher ausgeschlossen werden. Dabei sind sowohl zu große als auch zu kleine Vorspannkraften kritisch. Da viele Faktoren gleichzeitig Einfluss auf das Entstehen eines Einlaufkeils nehmen, ist es nicht einfach, die optimale Vorspannkraft für jedes Getriebe festzulegen. Eine Reihe von aktuellen Untersuchungen, die sowohl messtechnisch als auch simulationstechnisch durchgeführt werden, dienen der Ursachenforschung, deren Ergebnisse in die Erhöhung der Sicherheit bei der Getriebeauslegung durch eine optimale Vorspannkraft führen sollen.

3. Belastungsverteilung

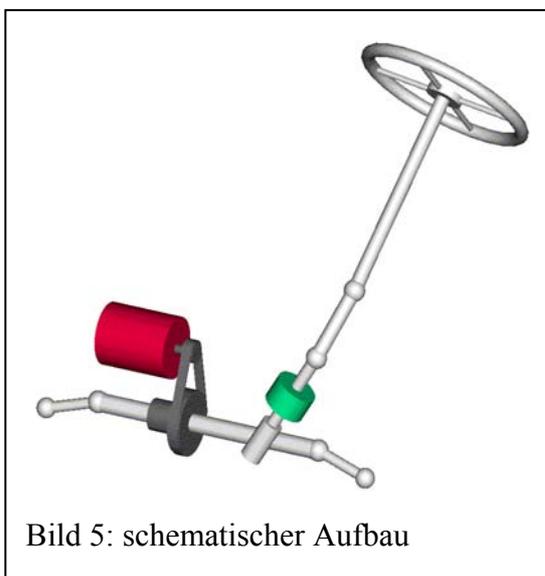


Bild 5: schematischer Aufbau

Unter Belastungsverteilung versteht man die Aufteilung der Gesamtbelastung auf die einzelnen, im Eingriff befindlichen Zahnpaare. Es ist in der Praxis nicht zu erwarten, dass die einzelnen Zahnpaare alle gleich groß belastet werden. Der Kraftabbau im Zugstrang von der Größe der Lasttrunkraft auf die Größe der Leertrunkraft bewirkt örtlich unterschiedlich große Einzelteilungen und somit eine nicht konstante Belastung der Zahnpaare. Die Größe der Zahnkräfte, die Wirkrichtung und der Kraftangriffspunkt lassen

sich messtechnisch nicht bestimmen. Hier kann die FEM wirkungsvolle Abhilfe schaffen. Bild 6 zeigt die aus Simulationsdaten gewonnene Belastungsverteilung an einem Kfz-Lenkhilfgetriebe (Schema des Aufbaus Bild 5). Im Diagramm sind die Zahnkräfte über der Zahnnummer (also die Nummer des Zahnpaars auf dem Umschlingungsbogen) aufgetragen. Die festgestellte große Belastungsspitze durchlaufen die Zahnpaare kurz vor dem Auslauf in den Lasttrum.

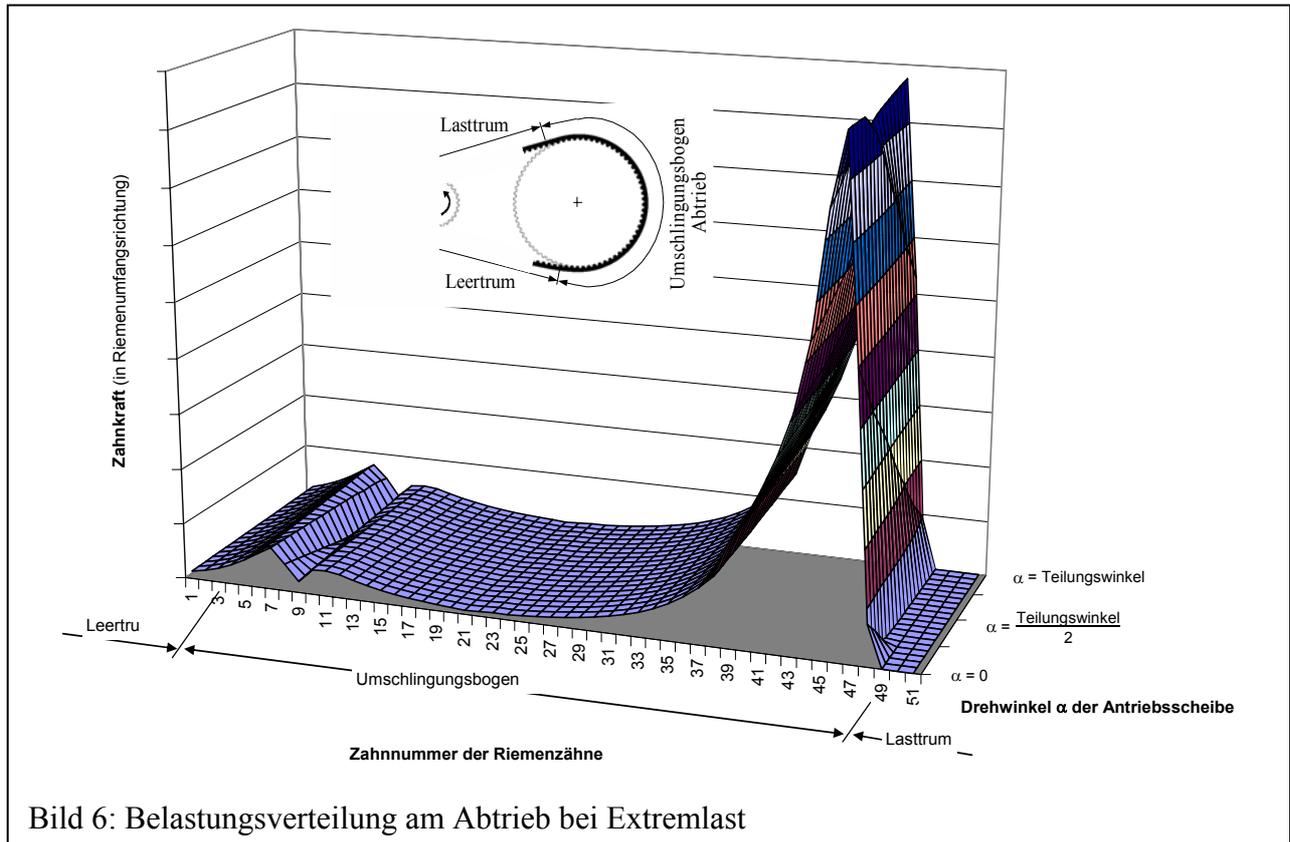


Bild 6: Belastungsverteilung am Abtrieb bei Extremelast

Der Einlauf hingegen findet trotz der hohen Belastungen ohne Störungen statt, was auf die angepassten Teilungen von Riemen und Scheibenverzahnung hinweist. Obwohl die Vorspannkraft hier sehr klein gehalten werden muss, um die Belastung des Kugelgewindetriebes auf der Zahnstange gering zu halten, gelingt ein Einlauf des Leertrums in die Verzahnung der Antriebsscheibe trotz der Extrembelastung ohne Störungen und somit ohne Gefahr des Übersprunges.

4. Reibarbeit und Einzahnvorgänge

Im Normalfall ist die Lebensdauer eines Zahnriemengetriebes sehr hoch, im Kfz beispielsweise geht man bei der Neuentwicklung von Nockenwellenantrieben von 300.000km Laufleistung aus. Wenn es zu Problemen kommt oder für Optimierungsaufgaben bei Neu- oder Weiterentwicklungen spielt der Einlauf der Riemenverzahnung in die der Scheibe stets eine große Rolle, denn bei hohen Belastungen kann es zu erheblichen Gleitreibvorgängen kommen. Mit Hilfe der FEM können diese nun detailliert untersucht werden. Bild 7 zeigt die FE-Ergebnisse beim Einlauf des Lasttrums in die Ver-

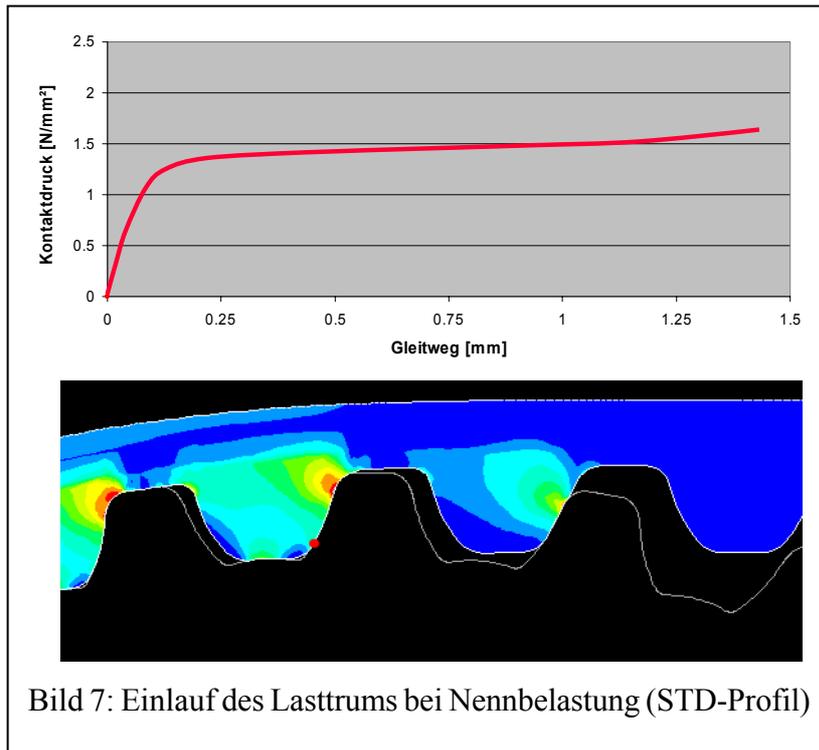


Bild 7: Einlauf des Lasttrums bei Nennbelastung (STD-Profil)

zahnung der Antriebsscheibe bei Nennbelastung (höchstbelastetes Element dargestellt). Man kann den Ort des Aufsetzens des Riemenzahnes auf die Kontur der Zahnscheibe exakt bestimmen. Nach weiterer Drehung der Zahnscheibe nimmt der Kontaktdruck zwischen den Zähnen des Zahnpaars schnell zu. Unter dieser hohen Flächenpressung wird der Riemenzahn in die Scheibenlücke gezwungen. Es ist vermittelbar, dass

dieser Gleitreibvorgang mehr oder weniger zum Verschleiß und somit zur Lebensdauer beitragen kann. Noch kann nicht gesagt werden, wie Flächenpressung und Lebensdauer direkt zusammenhängen, aber die flächenbezogene Reibarbeit (Produkt aus Flächenpressung und Gleitweg) könnte ein wichtiges Kriterium zur Verschleißbeschreibung darstellen. In Bild 8 ist die flächenbezogene Reibarbeit eines Riemenzahnes dargestellt, die während eines kompletten Riemenumlaufs verrichtet wird. Zu erkennen ist insbesondere, dass diese Reibarbeit an der Abtriebsscheibe deutlich größer ist als an der Antriebsscheibe und deshalb eine Optimierung der Vorspannkraft im Zusammenhang mit weiteren Parametern des Getriebes sinnvoll erscheint.

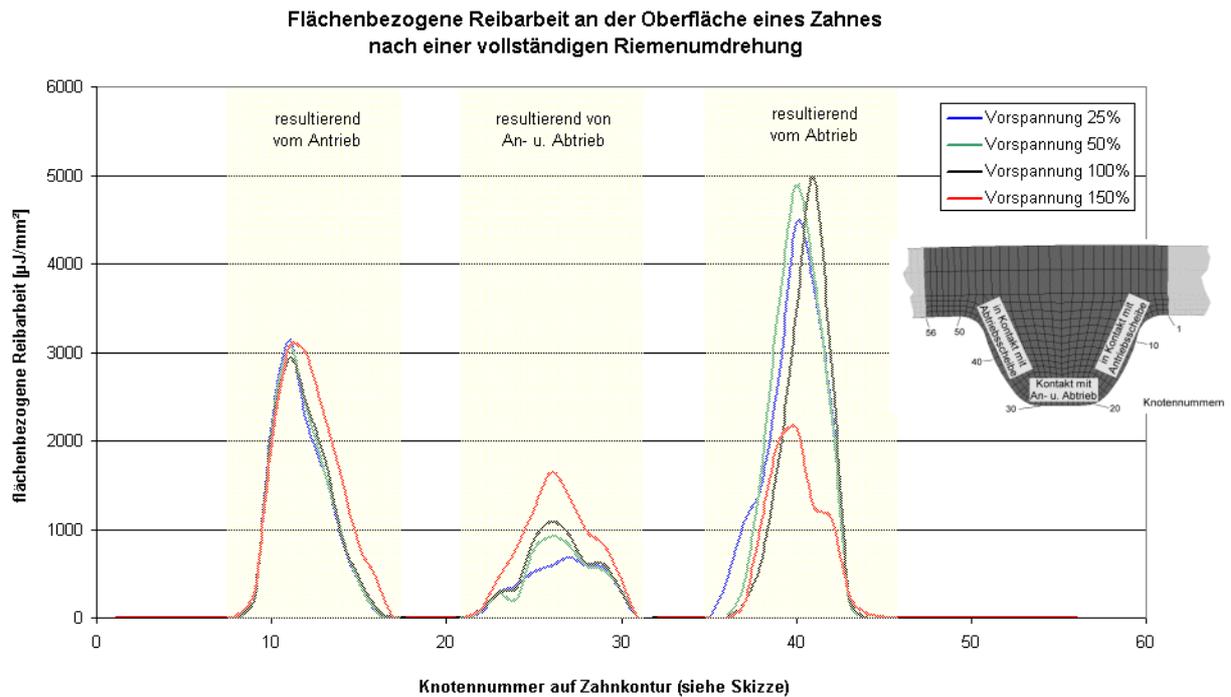
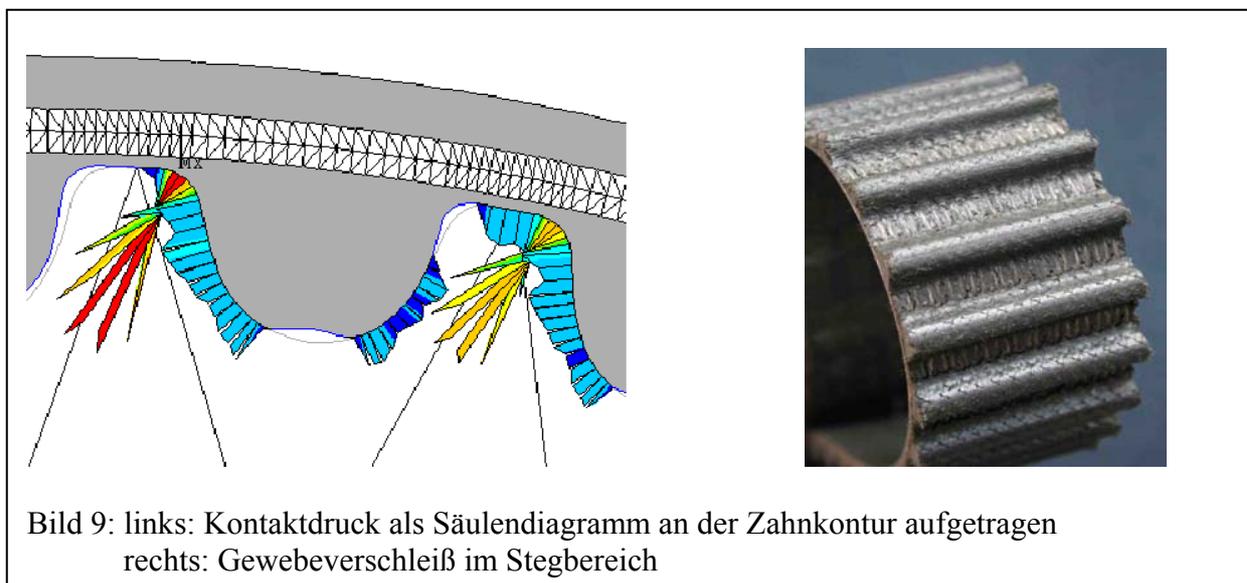


Bild 8: flächenbezogene Reibarbeit bei verschiedenen Vorspannkraften

5. Flächenpressungen im Stegbereich



Flächenpressungen an der Flanke und im Stegbereich spielen eine große Rolle bei verschiedenen Ausfallmechanismen. Dabei ist der Kontaktdruck über der Zahnflanke zeitlich und örtlich nicht konstant und insbesondere im Stegbereich kommt es zu erheblichen Pressungen (Bild 9). Zahnabschürungen oder Gewebeverschleiß können die Folge zu hoher Kontaktdrücke sein. Aufgrund der derzeitigen Baugröße und anderer Eigenschaften verwendbarer Druckmessensoren ist eine Bestimmung dieser hohen örtlichen Flächenpressungen nur durch Simulation zu realisieren. Die FEM-Simulation liefert hier mit vertretbarem Aufwand detaillierte Werte und ermöglicht insbesondere

Produktvergleiche und –optimierungen.

Zusammenfassung

Mit der Methode der Finiten Elemente ist man in der Lage, detaillierte Ergebnisse mechanischer Spannungen, Deformationen usw. zu berechnen. Trotz des nicht unerheblichen Aufwandes konnten verwendbare Modelle für verschiedenste Zahnriemengetriebe entwickelt werden. Die ermittelten Ergebnisse sollen dazu beitragen, das Auslegen der Getriebe sicherer zu machen, Verbesserungen an bestehenden Produkten durch Optimierung zu erreichen sowie frühzeitig bei der Entwicklung neuer Produkte zur Verfügung zu stehen. Ein Beispiel aus der Optimierung von Spezialgetrieben zeigt Bild 10. Hierbei handelt es sich um ein sogenanntes ungleichmäßig übersetzendes Zahnriemengetriebe, mit dem man bei konstanter Antriebsdrehzahl eine gewollt ungleichmäßige Abtriebsbewegung realisieren möchte. Diese Ungleichförmigkeit kann bewusst an die Antriebsaufgabe angepasst werden. Es muss aber gewährleistet sein, dass die auftretenden inneren Belastungen zulässige Werte nicht übersteigen. Dazu dienen diese durchgeführten FEM-Untersuchungen. Zur Zeit wird deshalb verstärkt sowohl an Grundsatzuntersuchungen, als auch an anwendungsspezifischen Problemstellungen gearbeitet, um somit z.B. Optimierungen bestehender Getriebe durch gezieltes Verändern von Toleranzen, Werkstoffparametern oder Vorspannkräften zu ermöglichen.

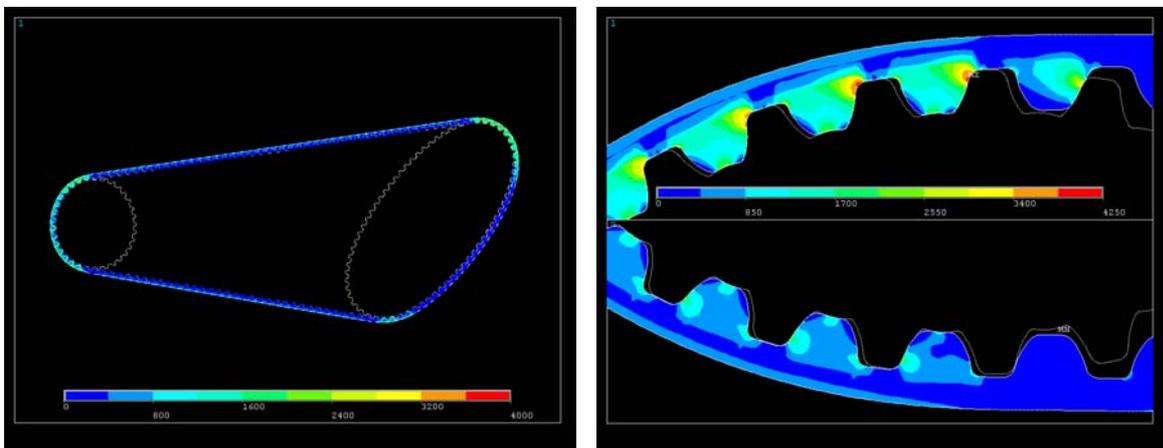


Bild 10: Berechnete Vergleichsspannungen an ungleichförmigen Zahnriemengetrieben
links: Gesamtgetriebe bei Nennbelastung; rechts: Ein- und Auszähnen am Antrieb

Autorenangaben:

Dr.-Ing. Thomas Nagel
Dipl.-Ing. Sebastian Fraulob
TU Dresden, Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design
D-01062 Dresden
Tel.: 0351/463-35186
Fax: 0351/463-37183
E-mail: thomas.nagel@ifte.de / sebastian.fraulob@ifte.de