

## **Zahnriemengetriebe:**

### **Geregeltes Spannen im Teillastbereich reduziert Leistungsverluste und Verschleiß**

---

#### **1. Einleitung und Problemstellung**

Funktionsbedingt sind Zahnriemengetriebe vorzuspannen. Die erforderliche Vorspannung ist durch die Belastung und durch sicherheitstechnische Faktoren festgelegt.

Ausgeschlossen werden müssen einerseits bei zu kleinen Vorspannkraften das „Flattern“ des Riemens, Zahneingriffs- und Umkehrfehler, erhöhtes Laufgeräusch sowie das Auflaufen des Zahnprofils und Überspringen des Riemens über die überlastungskritische Zahnriemenscheibe.

Andererseits bewirkt eine zu große Vorspannkraft das unerwünschte Dehnen des Riemens, Eingriffsfehler, Druck-Zug- Verformungsreste im Kunststoff des Zahnprofils während der auch im Stillstand anliegenden Vorspannung sowie erhebliche Lagerbelastung, insbesondere hinsichtlich Reibung und Verschleiß.

Die genaue Einstellung und vor allem die Einhaltung der Vorspannkraft während des Betriebes beeinflusst dabei signifikant die Betriebssicherheit, das Laufverhalten sowie die Lebensdauer der Zahnriemengetriebe und aller Getriebekomponenten.

Die in der Praxis überwiegend angewendete Einstellung der Vorspannung über die Verstellung des Achsabstandes bzw. die Verwendung fester Rollen nutzt die Elastizität des Zahnriemens und der Getriebekomponenten zur Erzeugung der geforderten Spannkraft (Dehnspannung). Die Größe der Vorspannung ergibt sich dabei aus der zu übertragenden maximalen Umfangskraft (bzw. Drehmoment) und wirkt demnach auch im Stillstand bzw. im Teillastbereich in voller Höhe auf sämtliche Getriebekomponenten.

Die bezüglich der Übersprungssicherheit auf das maximale Drehmoment dimensionierten Zahnriemengetriebe laufen jedoch in der Praxis nur partiell in den Phasen des maximalen Momentes. Oft sind die Zeiträume, in denen diese Getriebe im Teillastbereich arbeiten, wesentlich größer als die Maximallastphasen. Wichtige Beispiele sind dabei Zahnriemengetriebe mit ungleichförmiger oder unregelmäßiger Belastung und den dabei entstehenden auf- und abschwelenden Momenten, wie sie z. B. extrem bei Anlagen, die mit Nocken- oder Kurbeltrieben gekoppelt sind, bei häufigen Anfahr- und Bremsprozessen oder auch bei Stückgut-Förderern vorliegen.

Über die bloße Betrachtung der Getriebefunktion hinaus ist es für die Praxis erforderlich, alle aus der oft unnötig hohen Vorspannung resultierenden Leistungsverluste und den Verschleiß der Lager für die Beurteilung des Zahnriemengetriebes einzubeziehen. Dementsprechend ist es sinnvoll, die Phasen des Zahnriemengetriebes nach Nenn- und Teillastphasen zu differenzieren und nur die jeweils phasennotwendige Vorspannung in das Getriebe einzubringen.

## **2. Lastgeregeltes Einstellen der Vorspannkraft**

### **2.1. Aufbau der mit ROLL-RING® gespannten Zahnriemengetriebe**

Die von der Firma EBERT Kettenspanntechnik GmbH in langjähriger Zusammenarbeit mit dem Institut für Fördertechnik und Kunststoffe der TU Chemnitz entwickelten rotational-elastischen ROLL-RING® Spann- und Dämpfungselemente für die Anordnung zwischen den Zahnscheiben sowie neu zahnscheibenintegriert zwischen den Trumen beinhalten neben der allgemeinen Spann- und Dämpfungsfunktion und Reversierfähigkeit eine drehmomentabhängige Spannkraftregelung.

Mit Hilfe der dafür entwickelten Dimensionierungsgrundlagen ist es möglich, dem Anwender ringförmige elastische Spannsysteme zur Verfügung zu stellen, welche bei minimaler Verformung mit einer Vorspannkraft nahe Null für den Getriebestillstand beginnen und über eine vorgegebene Federkennlinie bei zunehmend ellipsenähnlicher Verformung die momentabhängig notwendige Vorspannkraft in Echtzeit geregelt vermitteln.

Aufbau und Funktion des zwischen den Zahnscheiben angeordneten ROLL-RING® wurden bereits in [1] vorgestellt. Das neu entwickelte Spann- und Dämpfungselement besteht aus einem oder mehreren elastischen Ring(en) aus Federstahl, Titan oder Kunststoff, welche in den in die Zahnscheibe eingebrachten Nuten laufen. Da der Ring größer als diese Zahnscheibe ist, wird er bei entsprechendem Achsabstand elastisch verformt und übt somit eine Spannwirkung auf die Riementrome aus.

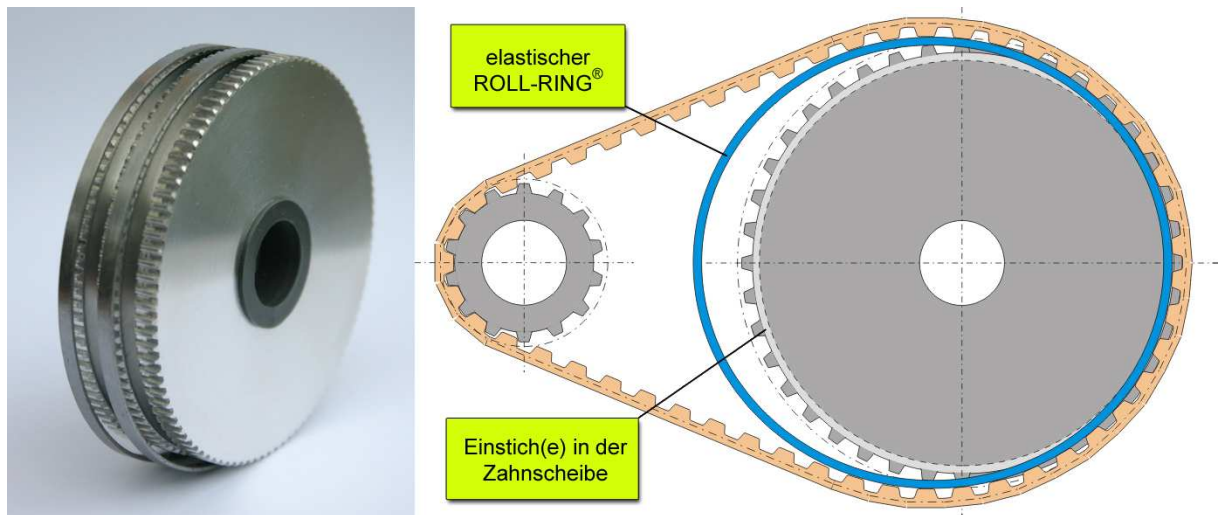


Abbildung 1 Zahnscheibenintegrierte ROLL-RING® - Spann- und Dämpfungselemente und Aufbau des Zahnriemengetriebes

## 2.2. Regelphasen zwischen Ruhe- und Nennlastzustand

Im Einbauzustand ohne die Übertragung eines Drehmomentes liegt eine geometrische und kräftemäßige Symmetrie zwischen oberer und unterer Hälfte des Getriebes vor. Es bilden sich zwei gleichgroße Kontaktbereiche zwischen ROLL-RING® und Zahnriemen aus, in denen der Zahnriemen durch den ROLL-RING® gespannt wird (Abbildung 2 oben). Durch eine entsprechende Dimensionierung wird die Größe und Steifigkeit des Rings so gewählt, dass sich dieser nur minimal notwendig verformt und entsprechen wenig Spannkraft erzeugt.

Wird ein Drehmoment übertragen, ändern sich die Kräfte in den Trumen und das Spann- und Dämpfungselement verschiebt sich bei gleichzeitig elastischer Verformung (Einfederung) in Richtung des weniger belasteten Trums (Leertrum), wobei sich die Spannkraft des ROLL-RING® erhöht.

Für jede Drehphase eines derartig gespannten Zahnriemengetriebes unterhalb der Nennbelastung gilt:

Liegt während der Rotation der Zahnscheibe phasenweise ein kleiner werdendes Drehmoment an, so reagiert das Spann- und Dämpfungselement gleichzeitig mit der Rückverformung (Ausfederung) in eine dem konzentrischen Ring nähere Form. Dabei verändert es jeweils den Abstand seiner Nebenscheitelpunkte, was zu einer Änderung des Federwegs und entsprechend der Federkennlinie zu einer Änderung der auf den Zahnriemen vermittelten Vorspannkraft führt.

Somit reagiert das Spann- und Dämpfungselement bei jeglicher Veränderung der Trumkraft infolge Belastungsänderung und/ oder Rundlaufabweichungen des Zahnriemengetriebes mit einer Veränderung der vermittelten Vorspannkraft.

Verringerte Belastung bedeutet verringerte Vorspannkraft bzw. umgekehrt!

Die Regelphasen und das Spannkraftdiagramm sollen nachfolgend prinzipiell erläutert werden:

Die Abbildungen zeigen modellhaft ein Zahnriemengetriebe in der Leerlauf-, in der Teillast- bzw. in der Vollastphase, jeweils mit Wirklinie (blau) des Spann- und Dämpfungselementes, gemessen über den Abstand der Nebenscheitelpunkte  $N_1$  und  $N_2$  und das zugehörige Kraft-Weg-Diagramm.

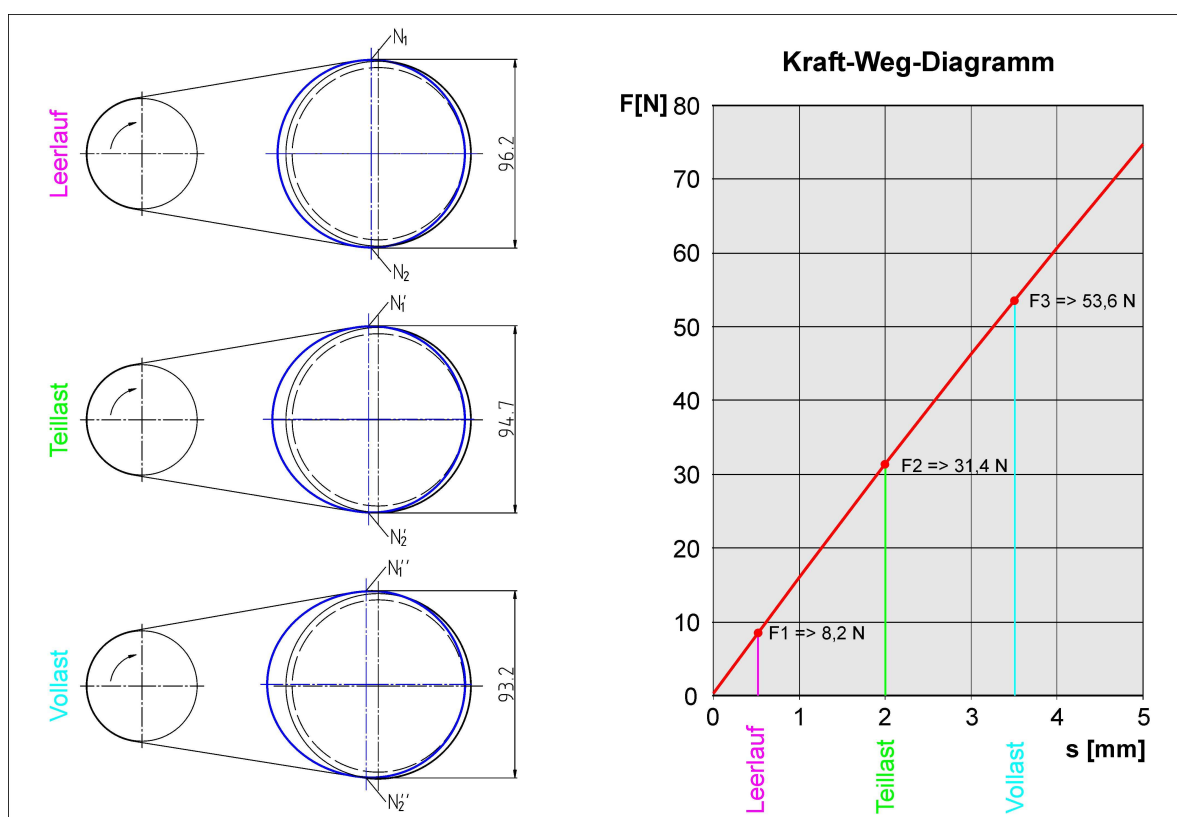


Abbildung 2 Beispiel für ein ROLL-RING® (blaue Linie) gespanntes Getriebe ohne (oben), mit Teillast (mittig) bzw. mit Nennmoment (unten)

Vereinfacht lässt sich dieser Mechanismus dadurch erklären, dass der geometrische Abstand zwischen den Riementrumen im momentfreien Zustand maximal ist und sich bei steigendem Drehmoment verringert. Liegt während der Rotation der Zahnscheibe phasenweise ein größer werdendes Drehmoment an, so reagiert das Spann- und Dämpfungselement gleichzeitig mit einer stärkeren Verformung, was zu einer Änderung des

Federwegs und entsprechend der Federkennlinie zu einer Erhöhung der auf den Zahnriemen vermittelten Vorspannkraft führt. Umgekehrt nähert sich der ROLL-RING® bei geringerer Belastung einer konzentrischen Form und reagiert damit bei jeglicher Veränderung der Trumkraft infolge äußerer Belastungsschwankung und / oder Rundlaufabweichung mit einer Veränderung der vermittelten Spannkraft.

In einem weiteren Vergleich zu einem über die Wellenkraft vorgespannten Getriebe ergibt sich ein anderer Verlauf der Trumkräfte in Abhängigkeit vom Drehmoment.

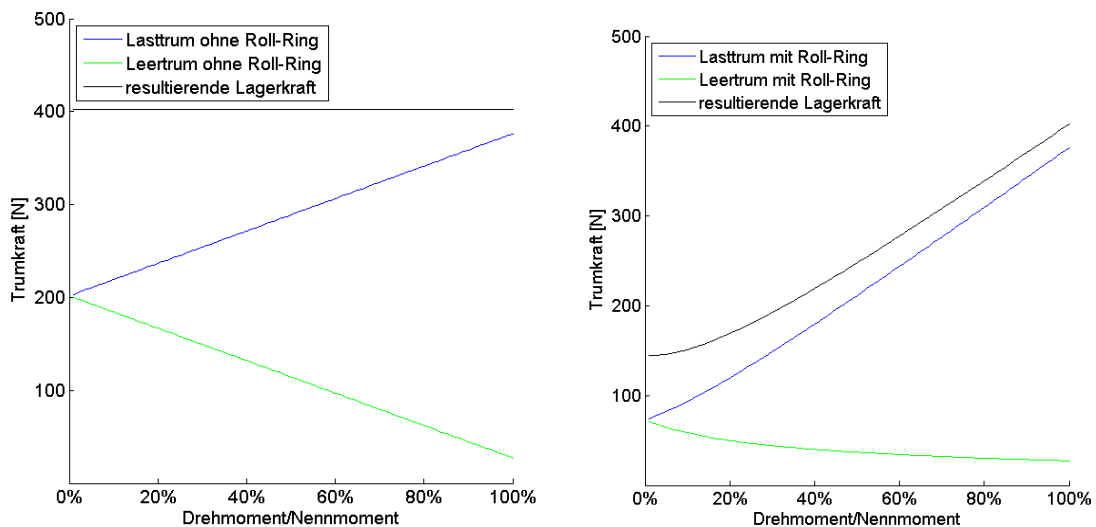


Abbildung 3 Kraftverläufe mit Dehnspannung (links) und mit ROLL-RING® (rechts); Kraft im Lasttrum (blau), im Leertrum (grün) sowie Wellenkraft (schwarz)

Abbildung 3 zeigt den Trumkraftverlauf sowie die resultierende Lagerkraft in Abhängigkeit des Drehmoments für Zahnriemengetriebe, die über Dehnung oder mit ROLL-RING® gespannt sind. Es wird ersichtlich, dass das ringgespannte Getriebe bei optimaler Dimensionierung wesentlich geringer vorgespannt werden muss, ohne dass dabei die Gefahr einer zu geringen Leertrumkraft und damit eines möglichen Zahnübersprungs besteht. Weiterhin wird deutlich, dass die Belastung des Zahnriemens (Lasttrumkraft) sowie der Lager insbesondere im Stillstand sowie während der Teillastphasen beim Einsatz des ROLL-RING® wesentlich geringer ist.

### 3. Lagerverluste- und - lebensdauer

Zahnriemengetriebe weisen einen Wirkungsgrad auf, der im Bereich der Nennlast am größten wird, da die prozentualen Getriebeverluste bei geringeren Belastungen steigen.

Wirkungsgradverluste im Zahnriemengetriebe entstehen auch in den Lagerungen der An- und Abtriebswelle. Dazu werden meist Wälzlager verwendet, deren Reibungsverluste sich aus mehreren Anteilen, wie z.B. Reibung der Wälzkörper, Gleitreibung des Käfigs,

Strömungswiderstände der Schmierung und Reibung der Dichtung, zusammensetzen. Vereinfacht wird das Reibmoment eines Wälzlagers nach [2] aus einem drehzahl- und einem lastabhängigen Term berechnet, wobei sich das lastabhängige Verlustmoment proportional zur wirkenden Radialkraft (Wellenkraft) verhält.

Bei Zahnriemengetrieben resultiert die radiale Lagerbelastung aus den Trumkräften. Für Getriebe, in denen die Vorspannung durch Einstellung des Achsabstandes realisiert wird, ist die Wellenkraft im gesamten Teillastbereich (theoretisch) konstant. In Getrieben mit zahnscheibenintegriertem ROLL-RING<sup>®</sup> wirkt dagegen nach Abbildung 3 ohne Drehmoment eine bis zu 70% geringere Wellenvorspannkraft, welche mit zunehmender Last ansteigt, aber niemals größer als bei der Dehnspannung wird.

Infolge der geringeren Wellenkraft ergibt sich eine insbesondere im Teillastbereich signifikante Verringerung der Lagerverluste bei ROLL-RING<sup>®</sup> gespannten Getrieben. So wurde in einem Beispiel mit Kugellagern bei einer Teillast von 20% eine Reduzierung des Lagermomentes von 2,8% auf 1% berechnet (Abbildung 4).

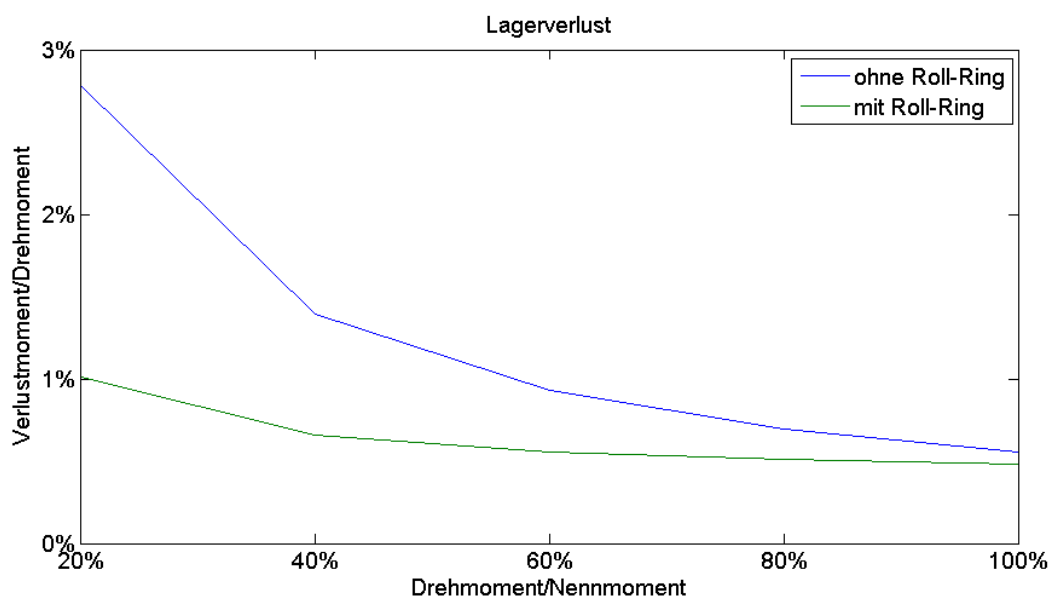


Abbildung 4 Relatives Verlustmoment der Kugellager infolge der Zahnriemenvorspannung

Die Lagerbelastung bestimmt maßgeblich die Lebensdauer der Wälzlager, die sich wesentlich erhöht, wenn die Zahnriemen in den Teillastphasen geringere Kräfte auf die Lager übertragen [2]. In Abbildung 5 ist die Lagerlebensdauer beider Spannvarianten dargestellt, wobei die Lebensdauer mit ROLL-RING<sup>®</sup> im Teillastbereich von 20% etwa zwanzigmal höher ist als bei dem über Achsabstand gespannten Getriebe.

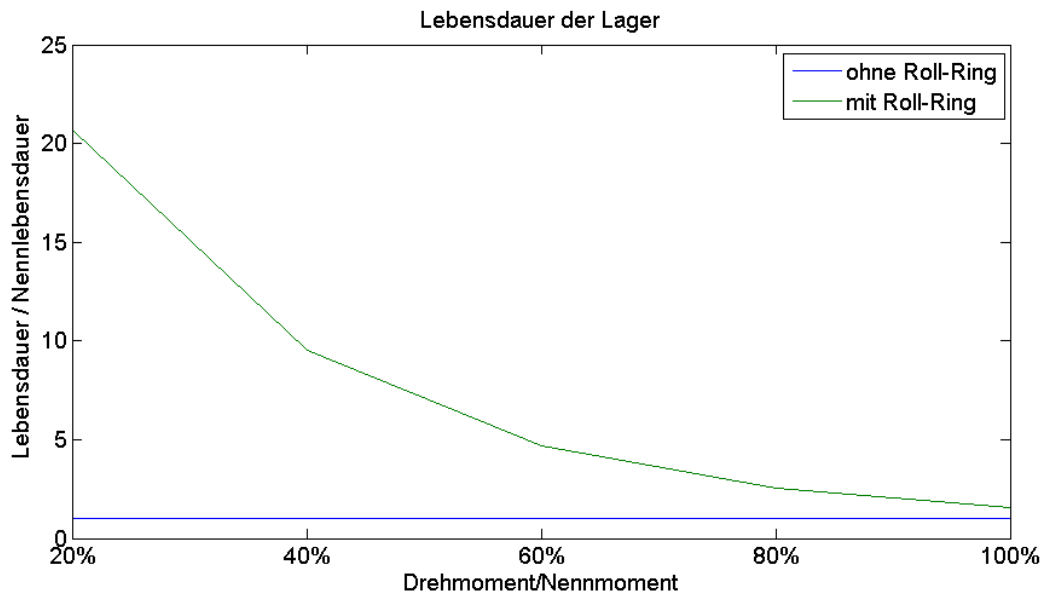


Abbildung 5 Relative Lebensdauer der Lager mit und ohne ROLL-RING®

#### 4. Wirkungsgradmessung am Zahnriemengetriebe

Die Annahme, dass geringere Lagerkräfte im Teillastbereich den Wirkungsgrad des Zahnriemengetriebes maßgeblich beeinflussen, wurden experimentell an einem Getriebeprüfstand validiert, der in Abbildung 6 dargestellt ist. Die Last wurde dabei mithilfe einer Bandbremse aufgebracht und die relevanten Drehmomente und Drehzahlen aufgezeichnet und ausgewertet.

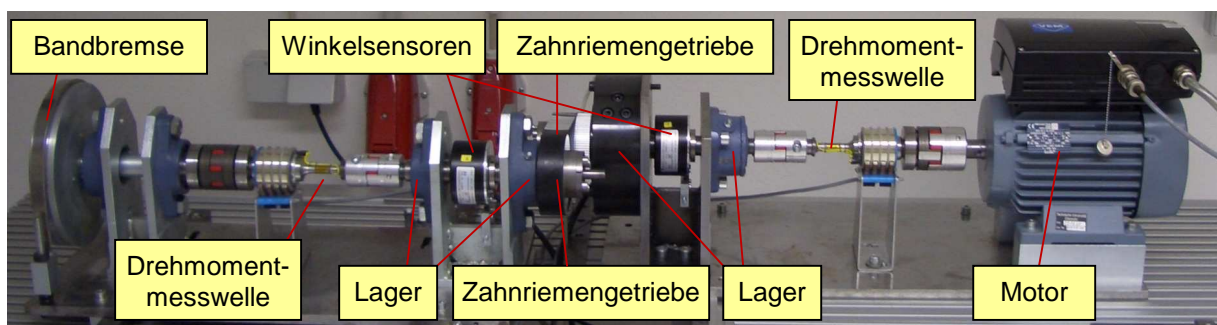


Abbildung 6 Zahnriemengetriebeprüfstand  
[TU Chemnitz, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe]

Die Messungen wurden bei konstanter Motordrehzahl durchgeführt und die Wirkungsgrade  $\eta$  aus den Messdaten nach folgender Gleichung berechnet:

$$\eta = \frac{M_{Abtrieb} \cdot \omega_{Abtrieb}}{M_{Motor} \cdot \omega_{Motor}},$$

wobei  $\omega_{Abtrieb}$  und  $\omega_{Motor}$  die Kreisfrequenzen sowie  $M_{Abtrieb}$  und  $M_{Motor}$  die Drehmomente der Abtriebs- und Motorriemenscheibe darstellen.

Für die Versuche wurde ein Zahnriemen Omega 3M (Länge 486 mm, Breite 30 mm) verwendet, die Zähnezahlen der An- und Abtriebsscheibe betragen 60 und 80. Das Nenndrehmoment von 10 Nm entspricht dabei der zulässigen Umfangskraft des Zahnriemens, wonach auch die Auslegung der Vorspannkraft erfolgte. Bei Motordrehzahlen von 250 bis 1000 U/min wurden Messungen mit 20% bis 100% des Nenndrehmomentes durchgeführt.

In Abbildung 7 sind die Wirkungsgradverläufe in Abhängigkeit vom relativen Drehmoment für die Motordrehzahl 1000 U/min dargestellt. Auffällig ist der bessere Wirkungsgrad des Getriebes mit ROLL-RING<sup>®</sup> gegenüber der Getriebevariante mit Dehnspannung, besonders im Teillastbereich.

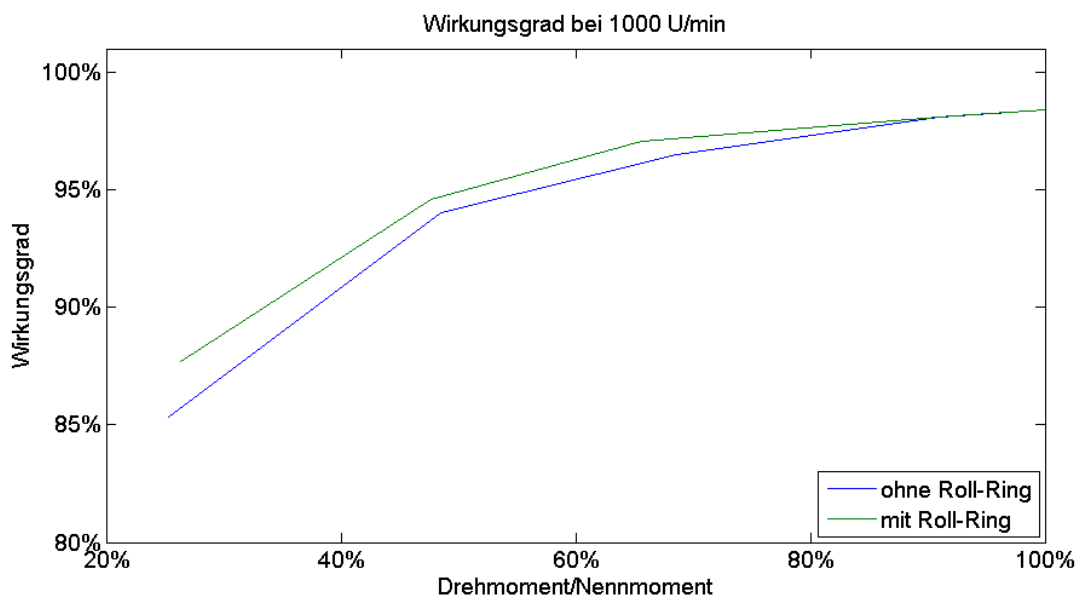




Abbildung 7 Wirkungsgrade des Zahnriemengetriebes bei 1000 U/min mit und ohne ROLL-RING®

Der Unterschied der beiden Vorspannvarianten ist in

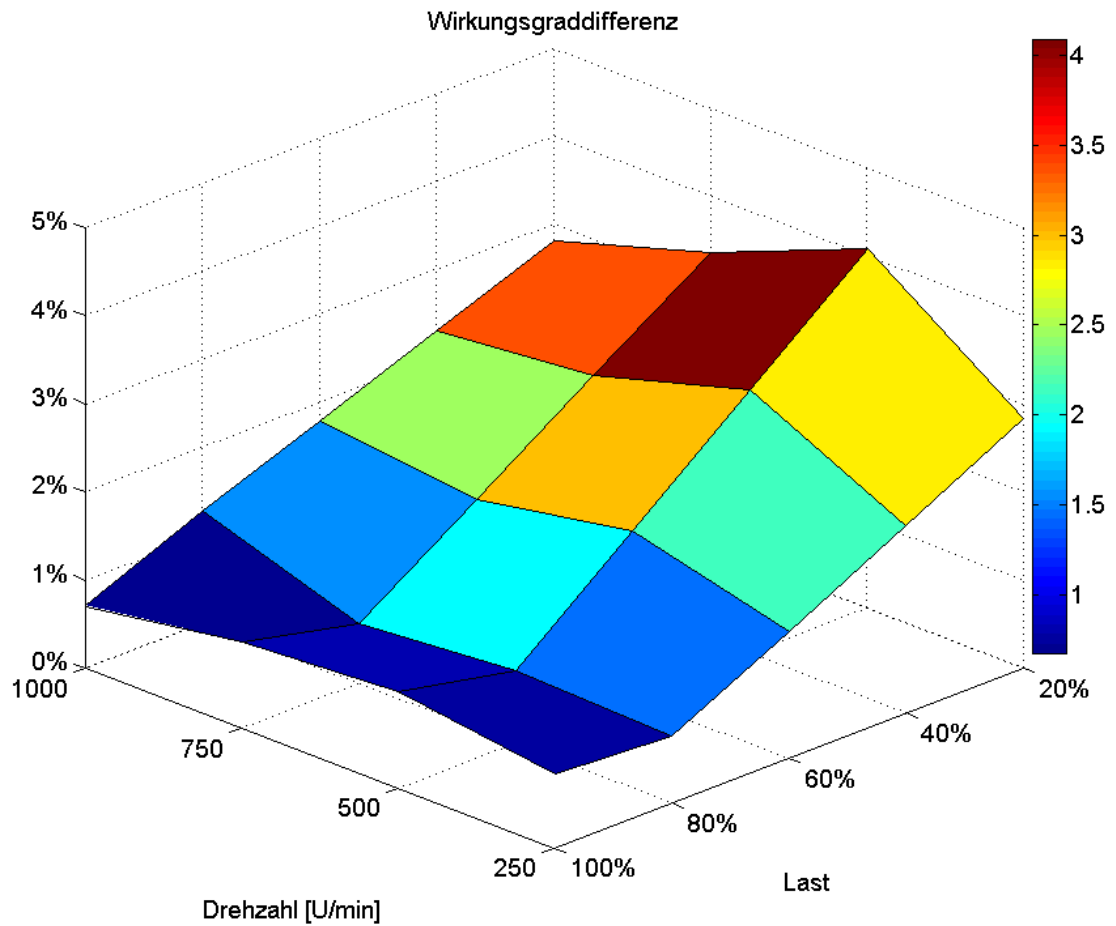


Abbildung 8 nochmals für die Drehzahlen 250, 500, 750 und 1000 U/min verdeutlicht. Unter Vollast ist der Unterschied des Wirkungsgrades relativ gering und beträgt etwa 1%. Im Teillastbereich wächst der Vorteil bei Verwendung des ROLL-RING® auf bis zu 4%.

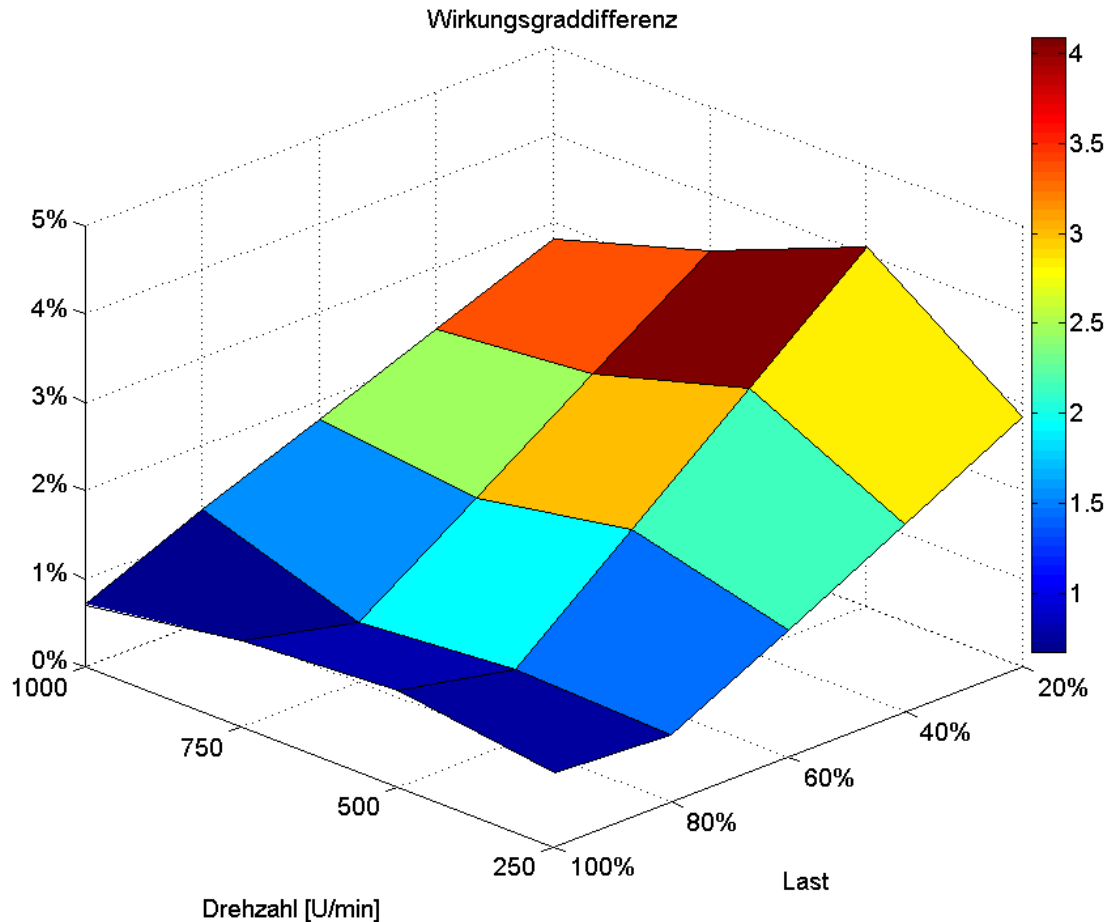


Abbildung 8 Last- und drehzahlabhängige Wirkungsgraddifferenz der Zahnriemengetriebe mit und ohne ROLL-RING® (Diff =  $\eta_{\text{Dehnspannung}} - \eta_{\text{ROLL-RING}}$ )

## 5 Perspektive

Erstmals wird ein echtzeit-momentgeregeltes Vorspannen von Zahnriemen an Stelle eines unnötig permanenten Vorspannens möglich. Das Anwendungsgebiet betrifft auch Mehrwellengetriebe mit Riemenscheiben, deren Umschlingungsbogen kleiner als  $180^\circ$  ist (z.B. 3-Wellengetriebe in der Anordnung eines Dreiecks).

Weitere positive Auswirkungen der Spannkraftregelung sind vor allem bei Getrieben mit kurzen Achsabständen zu erwarten. Hier führt die Entwicklung immer zugsteiferer Zahnriemen zu erheblichen Problemen bei der exakten, mit Fertigungstoleranzen verbundenen Einstellung der Vorspannung über den Achsabstand.

In diesen Fällen können geringste Abweichungen enorme Schwankungen der Vorspannkraft und Lagerbelastungen hervorrufen, die mithilfe des ROLL-RING® ausgeglichen werden können.

Die bisher bestehende Meinung, dass der maximale Wirkungsgrad von Zahnriemengetrieben generell nur bei Nennleistung erreicht werden kann, ist mit dem neuen rotational – elastischen Prinzip der geregelten Vorspannung, insbesondere für die Verbesserungen des Getriebewirkungsgrades, der Verschleißminimierung und der Konstruktion kompakter Zahnriemengetriebe, zu relativieren.

## **6. Zusammenfassung**

Die Einstellung der Vorspannkraft in Zahnriemengetrieben wird in der Praxis häufig durch die Realisierung eines festen Achsabstandes erreicht, bei der die Spannkraft über die Elastizität der Getriebekomponenten aufgebracht wird (Dehnspannung). Das bedingt eine relativ hohe Vorspannkraft, welche sich nach der zu übertragenden Maximallast richtet, aber gleichermaßen auch im Ruhezustand oder im Teillastbetrieb wirkt.

In vielen Anwendungsfällen, in denen das Getriebe häufig im Teillastbetrieb arbeitet, bewirkt diese hohe Vorspannkraft jedoch eine unnötige Belastung aller Getriebekomponenten.

Es konnte gezeigt werden, dass die mit dem ROLL-RING® -Spann- und Dämpfungselement arbeitenden Zahnriemengetriebe infolge der lastgeregelten Spannkraft dieses Maschinenelementes vor allem im Teillastbereich einen deutlich besseren Wirkungsgrad aufweisen und die Lebensdauer des Getriebes und der Lager signifikant gesteigert werden kann. Vorteile ergeben sich hieraus insbesondere hinsichtlich Energieeffizienz, Lebensdauer und Leichtbau.

## **Literatur**

/1/ Ebert, S.; Meier, H.; Nendel, K., Sumpf, J.: Aus einem Stück. Rotationselastisches Spann- und Dämpfungselement für Zahnriemen. Antriebstechnik 2008, 4, S. 80- 83. ISSN 0722-8546.

/2/ medias® Produktauswahl- und Beratungssystem für Wälzlager, Gleitlager und Linearführungen. Internetseite Schaeffler KG Herzogenaurach, Stand 25.10.2010, <http://medias.schaeffler.de>

ROLL-RING® ist international registrierte Marke Nr. 641 683 Ebert