

Entwicklung eines Versuchsstandes für die Zahnriemenprüfung

Development of a test rig for synchronous belt tests

**Paul Schumann
Thorsten Schmidt
Artem Zhakov**

*Professur für Technische Logistik
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Fakultät Maschinenwesen
Technische Universität Dresden*

Aussagen zur Lebensdauer von Zahnriemen sind ein wesentlicher Bestandteil zur Auslegung und Überwachung von Zahnriementrieben. An der Professur für Technische Logistik werden endliche Zahnriemen mit Stahlcord beim Einsatz als Tragmittel untersucht, um grundsätzliche Aussagen zur Lebensdauer zu erhalten.

[Schlüsselwörter: Zahnriemen, Synchronriemen, Dauertest, Lebensdauer, Ablegekr Kriterien]

For synchronous belts the knowledge of the endurance is a main point for dimensioning and monitoring synchronous belt drives. Therefore the Professorship of Logistics Engineering does research in the field of fatigue tests of synchronous belts with steel cord, by using them as lifting gear to get know-how for the endurance and replacement state.

[Keywords: timing belt synchronous belt, fatigue test, endurance, replacement state]

1 AUSGANGSSITUATION

Neben der klassischen Anwendung als Antriebsmittel werden Zahnriemen als Tragmittel eingesetzt. Lebensdaueraussagen von Zahnriemen beziehen sich nach dem heutigen Stand der Technik vorwiegend auf den Einsatz als Antriebsmittel im Kraftfahrzeugbereich. Eine weit verbreitete Anwendung beim Einsatz von Zahnriemen als Tragmittel stellen die Hubantriebe von Regalbediengeräten dar. Derartige Geräte finden in Hochregallagern mit Hubhöhen von bis zu 15 m Verwendung. Zum Nachweis der Betriebssicherheit ist es notwendig, Kenntnis über das Versagensverhalten der eingesetzten Zahnriemen zu haben. Desweiteren wird beim Einsatzfall Hubantrieb im Regalbediengerät gefordert, dass der aktuelle Zustand, also die Restlebensdauer bekannt ist. Die Motivation hierfür besteht darin, dass eventuelle Riemen austauscharbeiten

mit dem Zeitpunkt der ohnehin notwendigen Serviceintervalle im Hochregallager zusammengelegt werden können. So kann die Effizienz eines Logistikzentrums gesteigert werden. Einen weiteren Untersuchungsschwerpunkt stellt die Reduktion der Zahnscheibenzähnezahl und damit der Zahnscheibendurchmesser dar. Durch diese Maßnahme können im Riementrieb Bauraum, Massen und Massenträgheitsmomente eingespart werden. Problematisch sind dabei jedoch auf der anderen Seite die Zunahme von Biegebelastung und Polygoneffekt.

Aus den beschriebenen Gründen werden an der Professur für Technische Logistik endliche Zahnriemen mit Stahlcord im Dauerversuch getestet. An den Testzahnriemen werden dabei regelmäßig relevante Größen überwacht und ausgewertet. Zusätzlich werden Verfahren zum Onlinemonitoring erprobt und mit den Versuchsdaten abgeglichen.

Die aus den nachfolgend beschriebenen Versuchen gewonnenen Erfahrungen haben zu einer Entwicklung eines Zahnriemenprüfstands geführt, um völlig neue Testmöglichkeiten zu nutzen. Die Neuentwicklung und das aktuelle Prüfverfahren, welches auch in der Neukonstruktion umgesetzt wird, ist nachfolgend beschrieben.

2 AKTUELLE DAUERVERSUCHE / PROBLEMSTELLUNG

Die aktuellen Untersuchungen finden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Forschungsprojekts "Lebensdauer von Zahnriemen beim Einsatz als Tragmittel" statt. (AIF-IGF Kennzeichen 17604 BR/1) In Rücksprache mit Projektpartnern Witron Logistik und Informatik GmbH, Viastore Systems GmbH, ContiTech AG und Megadyne GmbH wurden Testparameter definiert, um ein realistisches Abbild der Praxis im Dauertest abzubilden. Die Testparameter sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1. *Testparameter*

Parameter	Zahnriementyp	
	Conti HTD 14M XHP PAZ	Megadyne Megalinear RPU 14M XP
Zahnriembreite	85 mm	40 mm
Zahnriementelung	14 mm	
Zahnriemelänge	10,1 m	
Beschleunigung	1,5 m/s ²	
Nutzmasse	450 kg	
Umfangskraft	5,1 kN	5,5 kN
Vorspannkraft	5,5 kN	6 kN
Trumkraft	10,6 kN	11,6 kN
Zähnezahl der Riemen- scheibe	28, 29, 30, 32, 34	
Sicherheit Zahnscher- festigkeit	2,3	1,1
Sicherheit auf zulässige Zugkraft	3,2	1,4

Bei den aktuellen Versuchen kommen zwei unterschiedliche Riemen zum Einsatz. Mit dem Conti HTD 14M XHP PAZ Zahnriemen werden die realen Gegebenheiten eines Hubantriebs in einem Regalbediengerät abgebildet. Bei den Versuchsreihen mit den Zahnriemen Megadyne Megalinear RPU 14M XP werden die Tragmittel höher ausgelastet, um die Versuchsdurchführung zu beschleunigen.

Die aktuelle Testanordnung ist schematisch in Abbildung 1 und real in Abbildung 2 dargestellt. Der Testaufbau besteht aus einer Referenzanordnung, welche in Abbildung 1a ersichtlich ist. Der oben montierte Aufzugsantrieb hebt und senkt im Dauerbetrieb einen Lastkorb. Im Unterschied zur Referenzanordnung wird der Treibscheibendurchmesser variiert. Ausgehend von einer Zahnscheibenzähnezahl von 34 Zähnen wird diese bis auf 28 Zähne reduziert beziehungsweise in weiteren Versuche ebenfalls erhöht. Insbesondere wird dadurch der Einfluss des verkleinerten Biegeradius auf die Lebensdauer und das Laufverhalten (Polygoneffekt) des Stahlcords untersucht. In Abbildung 1c ist der zweite Untersuchungskomplex dargestellt, beim dem bewusst Imperfektionen in den Zahnriementrieb eingebracht werden.

Dadurch können Verformungen von Baugruppen, die in der Praxis nicht vermeidbar sind, nachgebildet werden.

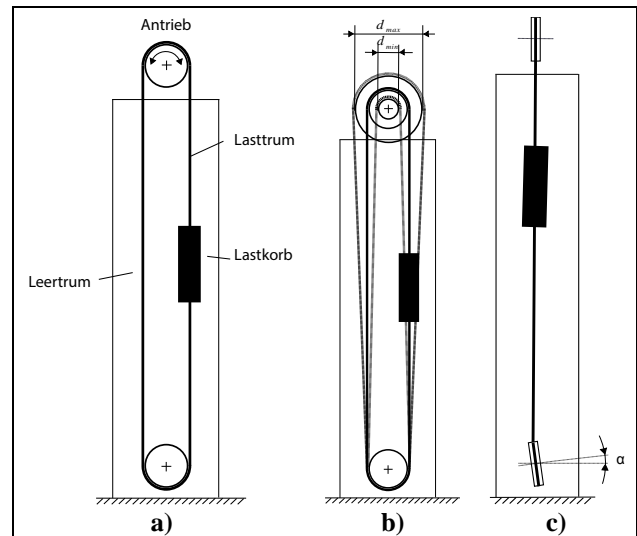


Abbildung 1. *Dauerversuche a) Referenzanordnung b) Variation der Zahnscheibendurchmesser c) Imperfektion, Winkelfehler*



Abbildung 2. *Versuchsanlage*

In Kontrollintervallen finden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen statt, welche zu Ablege Kriterien von Zahnriemen führen sollen.

3 LÄNGENMESSUNG / DEHNUNGSBESTIMMUNG

Die in Abbildung 3 ersichtliche Anordnung stellt das Vorgehen der Längenmessung dar. Zwei Klemmplatten werden im Abstand von 207 Zähnen im Leertrum montiert und der Abstand beider Klemmplatten mit einem Präzisionsstahllineal bestimmt. Zur Messung der Länge wird im Leertrum eine Kraft von 600 N bei 40 mm breiten

Riemen und 1200 N bei 85 mm breiten Riemen eingestellt. Aus aufeinanderfolgenden Längenmessungen können die Dehnung ermittelt und durch andere Untersuchungsverfahren Rückschlüsse auf den Zustand des Riemen gezogen werden.

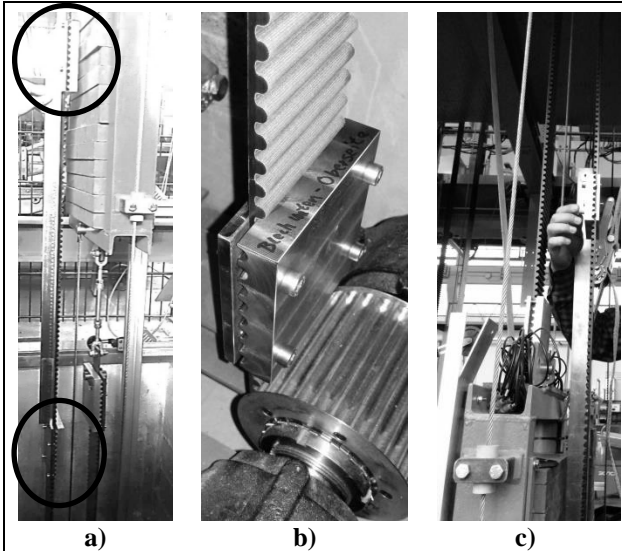


Abbildung 3. : Messanordnung a) Längenmessung mit Stahlraster, markiert: Klemmplatten als definierte Anschlagpunkte zur Längenmessung b) Verschrauben der Klemmplatte mit dem Zahnriemen zur Messung der Längenänderung c) Ablesen der Länge am Haarlineal

4 WIRKENDE KRÄFTE

Zur Abbildung der im Betrieb wirkenden Kräfte wird die in Abbildung 4 dargestellte Versuchsanordnung genutzt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen dienen dazu, Lastannahmen bei Lebensdauerberechnungen zu verbessern. Außerdem werden durch Onlinemonitoring der Kräfte im Betrieb und deren Veränderung während der Testdauer Rückschlüsse auf den Zustand des Zahnriemens gezogen.

In Abbildung 5 ist exemplarisch eine Ausgangsmessung der Riemenkräfte dargestellt. Dazu wurden beim ungelassenen Riemen die Kräfte in Last- und Leertrum bei steigender Umfangskraft im statischen Zustand aufgenommen. Die Messungen erfolgten jeweils in unterer und oberer Lastposition. Die Messdaten der Vorversuche geben bekannte Zusammenhänge wieder und werden als Referenzmessung mit den weiteren Kraftmessungen und den beschriebenen Analyseverfahren ausgewertet.

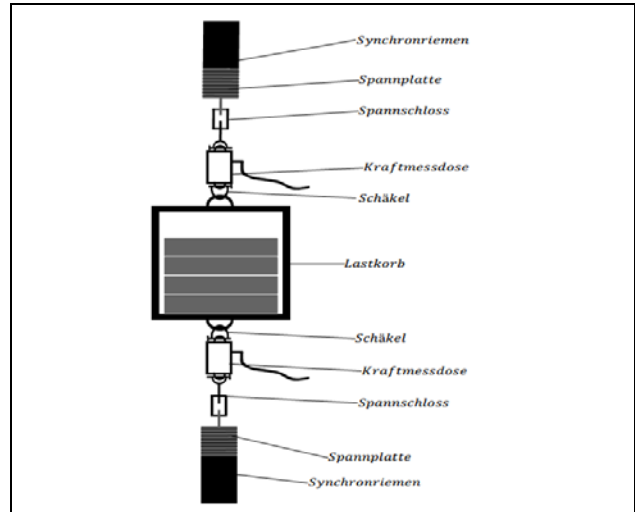


Abbildung 4. : Versuchsaufbau zur Abbildung der Dynamik und Untersuchung der wirkenden Kräfte im Riementrieb

Durch dynamische Messungen während des Betriebs des Riementriebs wie sie in Abbildung 6 dargestellt sind, können Kraftüberhöhungen bestimmt werden. Neben der Auswertung von Kraftverläufen in Bezug auf die Lebensdauer der Zahnriemen erfolgt die Verbesserung von Betriebs- und Stoßfaktoren für die Riementriebsdimensionierung.

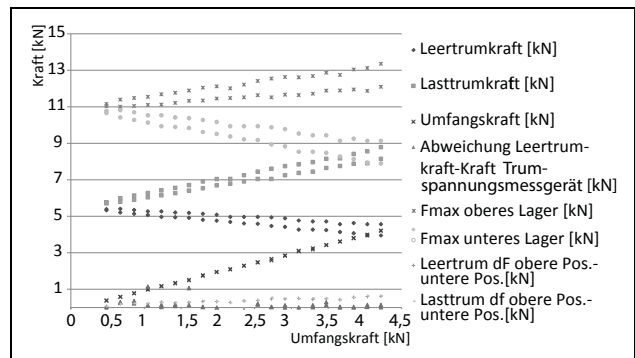


Abbildung 5. Kräfte im Hubantrieb bei steigender Umfangskraft in oberer und unterer Lastposition

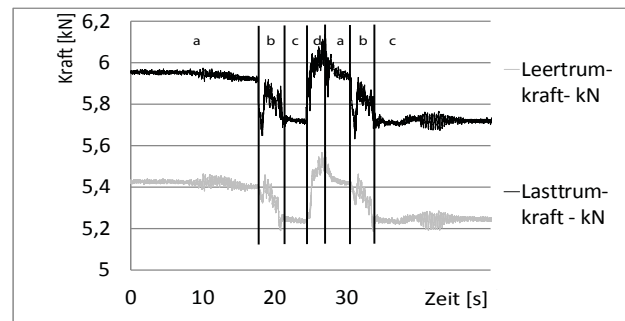


Abbildung 6. Verlauf der Kräfte in Last- und Leertrum während des Betriebs, a Nutzmasse in oberer Endposition, b Fahrt nach unten, c Nutzmasse in unterer Endposition, d Fahrt nach oben

5 BRUCHKRAFTBESTIMMUNG

Eine in der Drahtseilforschung etablierte Größe zur Beurteilung des Stahlcordzustands stellt die Bruchkraft dar. Diese wird bei den Testzahnriemen zunächst an ungelassenen Proben bestimmt. Dann erfolgt die Prüfung einer Probencharge gleicher Bedingungen bei definierten Biege- und Wechsellastfrequenzen. Bei Versuchsreihen, bei denen mit optischen Methoden messbare Versagensfälle, wie beispielsweise Zahnabrieb oder -abscherung auftreten, findet im Anschluss eine Bestimmung der Restbruchkraft statt.

Zur Bestimmung der Bruchlast wurden Zahnriemen in Klemmplatten in einer Zugprüfmaschine, wie in Abbildung 7a dargestellt, eingespannt. Abbildung 7b zeigt das Versuchsergebnis.

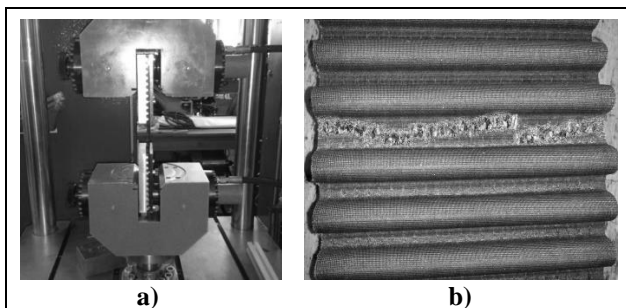


Abbildung 7. Bruchkraftbestimmung a) Versuchsaufbau zur Bruchlastbestimmung b) Gerissener Zahnriemen

6 PROFILVERMESSUNG

Das Profil des Zahnriemens wird zu den Kontrollintervallen mit einem Linienlaser wie in Abbildung 8 dargestellt, vermessen. Damit kann verschleißbedingter Abrieb gemessen werden.

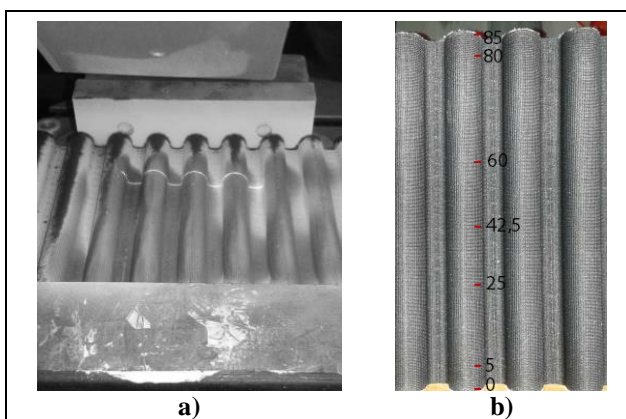


Abbildung 8. Zahnprofil a) Vermessung des Zahnprofils mit einem Linienlasermessgerät b) Messstellen der Profilvermessung am Zahnriemen in Bezug auf die untere Zahnriemenkante in mm

Mit Messdaten der Profilvermessung, wie sie in Abbildung 9 dargestellt sind, kann der Abrieb genau be-

stimmt und im Verhältnis zu den weiteren Messgrößen ausgewertet werden.

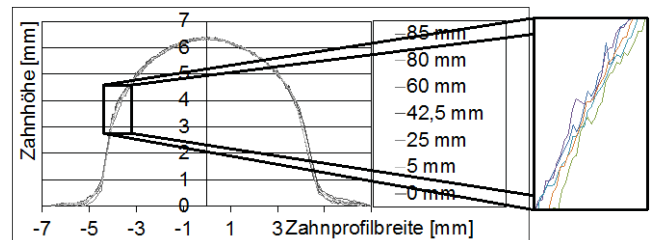


Abbildung 9. Messergebnis der Eingangsprofilvermessung eines Zahnriemens an den angegebenen Zahnriemenbreiten

7 ONLINEMONITORINGVERFAHREN ZUR ÜBERWACHUNG DES STAHLCORDZUSTANDS

Im Rahmen der Dauerversuche wird ein Widerstandsmessverfahren zur Überwachung der Stahlcorde entwickelt. Dazu wird das Polyurethan des Zahnriemens mit Tetrahydrofuran, wie in Abbildung 10a und c dargestellt, abgelöst. Durch eine 4 Leitermessung, die schematisch in Abbildung 10b ersichtlich ist, wird der Widerstand der einzelnen Stahlcorde gemessen. Beim Bruch eines Filaments verringert sich der Leiterquerschnitt und der Widerstand steigt an. Dadurch kann nicht nur der Zustand des Zugträgers überwacht, sondern auch ein Messausschlag dazu genutzt werden, um den Testzeitpunkt für die Überwachungsverfahren festzulegen.

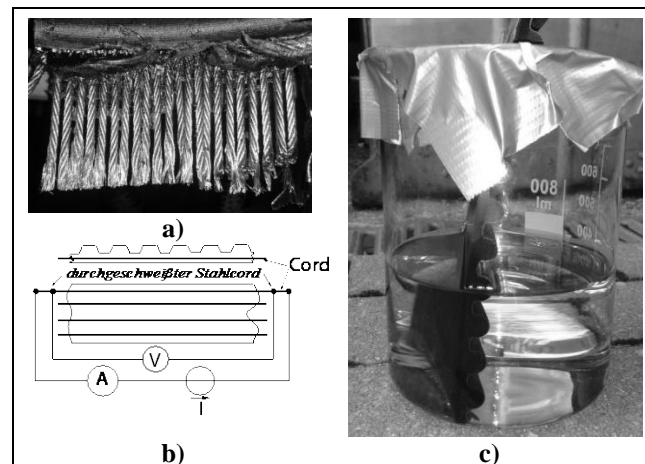


Abbildung 10. a) Zahnriemen mit freigelegten Corden b) Versuchsaufbau für die 4 Leitermessung des Widerstands c) Ablösen des Polyurethans durch Tetrahydrofuran

Die in Abbildung 11 dargestellten Ergebnisse der Voruntersuchungen geben den zu erwartenden Widerstandsverlauf wieder. Zur Durchführung dieser Versuche wurden in den Zugträger künstlich Drahtbrüche eingebracht.

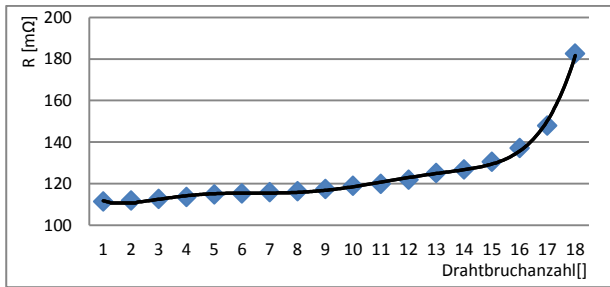


Abbildung 11. Ergebnisse der Voruntersuchungen zum Onlinemonitoring der Drahtbrüche mit dem Widerstandsmessverfahren

Ein weiteres Messverfahren, welches perspektivisch bei den Versuchen integriert wird, stellt die induktive Drahtbruchmessung dar. Die Technik wird zugekauft und von Dritten entwickelt.

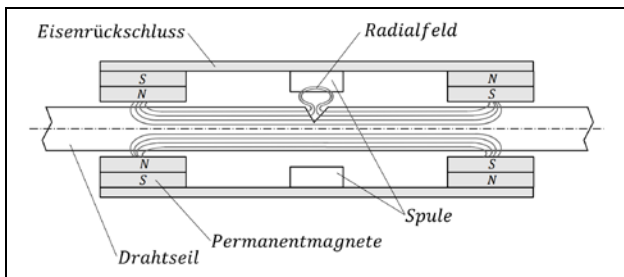


Abbildung 12. Funktionsprinzip des Onlinemonitorings der Drahtbrüche mit dem induktiven Drahtbruchmessverfahren

8 RÖNTGENUNTERSUCHUNGEN

Die vorangehend vorgestellten Überwachungsverfahren „Längenänderung“ und „Onlinemonitoring“ sollen bei Registrierung eines markanten Wertes auch dazu genutzt werden, um zu diesem Zeitpunkt das Diagnoseverfahren „Röntgen“ zu nutzen. Dazu werden die Prüfriemen demontiert und der entsprechende Abschnitt geröntgt. Zur Überprüfung der Eignung der Technik wurden geschädigte Corde, wie in Abbildung 13 ersichtlich, geröntgt. Mit dieser zerstörungsfreien Kontrollmöglichkeit können die vorgestellten Onlinemonitoringverfahren validiert werden.

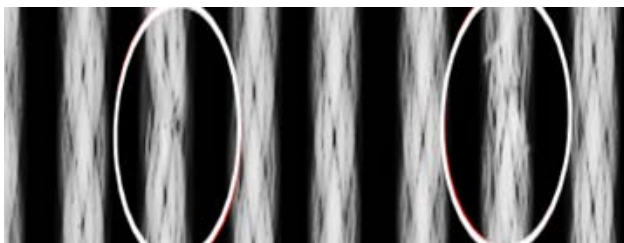


Abbildung 13. Röntgenuntersuchungen

9 NEUENTWICKLUNG ZAHNRIEMENPRÜFSTAND

Ausgehend von den aktuell durchgeführten Versuchen entstand die Motivation, die Testmöglichkeiten zu erweitern. Deswegen findet eine völlige Neuentwicklung eines Zahnriemenprüfstands statt. Hauptgrund dafür stellt die aktuell hohe Versuchszeit bei den Tests mittels der Aufzugsprüfstände dar. Zahnriemen erreichen unter realen Betriebsbedingungen Biegewechselanzahlen im zweistelligen Millionenbereich. Durch den reversierenden Betrieb des aktuellen Versuchsaufbaus und den damit stets verbundenen Beschleunigungen und Verzögerungen ist die Verfahrensgeschwindigkeit begrenzt. Um diesen Sachverhalt zu verbessern, kam es zu einer Prüfstandsneuentwicklung, die den Bedingungen des in Tabelle 2 dargestellten Auszugs der Anforderungsliste entspricht.

Tabelle 2. Auszug der Anforderungsliste für die Neuentwicklung des Zahnriemenprüfstands.

Forderung
Zahnriemenbreite bis 115 mm
Zahnscheibendurchmesser bis 360 mm bei Zweiwellen-anordnung (entspricht 80 Zähnen bei HTD 14M-115)
Vorspannkraft bis 20 kN
Umfangskraft bis 20 kN
Versuchsdauer für 3 Mio. Biegewechsel möglichst gering (ca. 2 Wochen)
Antrieb über Elektromotor
Imperfektionen der Zahnscheiben ermöglichen

Der in Abbildung 14 dargestellte Zahnriemenprüfstand genügt den Anforderungen, da mit ihm hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen realisiert werden können. Im Betrieb muss lediglich Reibarbeit und Arbeit zur Beschleunigung aller bewegten Teile aufgebracht werden. Die Umfangskraft wird durch die Verspannung, wie sie in Abbildung 15 dargestellt ist, erzeugt und erfordert keine Masse die stetig beschleunigt und verzögert werden muss.

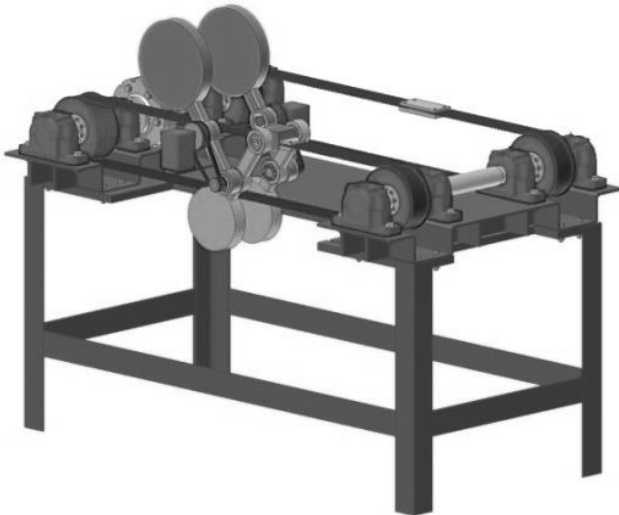


Abbildung 14. Zahnriemenprüfstand



Abbildung 15. Verspannen des Prüfstands a) Aufbringung der Umfangskraft auf eine Kupplungshälfte (1) durch den Drehmomentenhebel (2) und die Massestücke 3 b) Die Gegenkraft wird durch das grüne Halteelement in den Rahmen eingeleitet.

Als Antrieb des Verspannprüfstands wurde eine Schubkurbel mit gleichen Schenkellängen gewählt, wie sie schematisch in Abbildung 16 dargestellt ist. Diese greift mit dem Pleuelkoppelpunkt an der Spannplatte des Verspannprüfstands an und treibt diesen an. Bei einer Drehzahl von 60 U/min können mit dieser Anordnung ungefähr 3,6 Mio. Biegewechsel in 3 Wochen Testzeit absolviert werden.

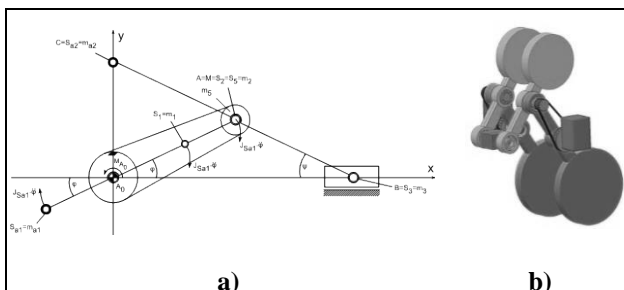


Abbildung 16. Schubkurbelantrieb des Zahnriemenprüfstand a) analytisches Modell zum Massenausgleich b) 3D CAD Modell zur Berechnung der Lager und Schnittkräfte

Die vorgegebene Antriebsdrehzahl bedingt hohe Beschleunigungen am Koppelpunkt zwischen Schubkurbel und Spannplatte des Zahnriemenprüfstands. Damit diese realisiert werden können, am Antrieb ein konstantes Drehmoment wirkt und die Gesamtkonstruktion keine Schwingungen in das Fundament einbringt, wird die Schubkurbel mit Ausgleichsmassen versehen. Um diesen Massenausgleich zu realisieren und die dadurch entstehenden, zusätzlichen Bauteilbelastungen abzuschätzen, wurde das in Abbildung 17a dargestellte Mehrkörpersimulationsmodell erstellt. Mit diesem kann der rechnerische Massenausgleich überprüft und wie in Abbildung 17b dargestellt, die in den Lagern wirkenden Kräfte bestimmt werden. Zur Bestimmung der inneren Beanspruchungen der Schubkurbel wird eine FEM Analyse durchgeführt. Die aktuellen Erkenntnisse führen zu einer symmetrisch wirkenden Schubkurbel, wie sie in Abbildung 16b dargestellt ist.

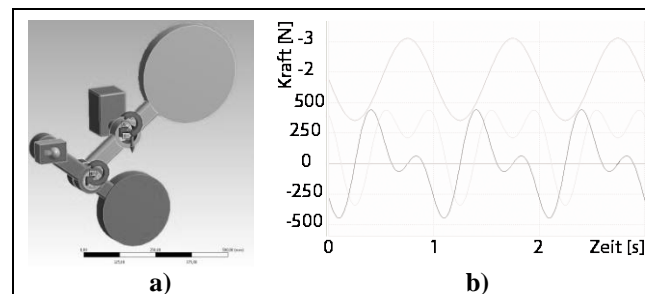


Abbildung 17. Mehrkörpersimulation der Schubkurbel zur Bestimmung der Reaktionskräfte a) Simulationsmodell b) Kraftverläufe

10 ZUSAMMENFASSUNG

An der Professur für Technische Logistik werden Dauertests an Zahnriementrieben durchgeführt, um Ablegekriterien für Zahnriemen zu finden. Desweiteren werden Onlinemonitoringverfahren zur Zustandsüberwachung von Zahnriementrieben entwickelt und erprobt. Um zukünftige Tests effektiver zu gestalten, wird zur Zeit ein neuer Zahnriemenprüfstand entwickelt, mit dem Tests erheblich schneller absolviert werden können.

Dipl.-Ing. Paul Schumann, Research Assistant at the Chair of Logistics Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Technische Universität Dresden.

Paul Schumann is research assistant at the Chair of Logistics Engineering and his fields of research are especially running synchronous belts, its lifetime calculations and forecasts. He studied mechanical engineering between 2006 and 2012. After an internship at the Hansen Transmissions International NV in Belgium he wrote his diploma thesis with the topic “Development of an innovative hoist with magnetic traction sheaves for service lifts in wind turbines” at the Chair of Logistics Engineering. Furthermore, Paul Schumann works on radically new hoisting systems and their influence according to the wire rope lifetime.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.
Phone: +49 351 463 35339
Fax: +49 351 463 35499
E-Mail: Paul.Schumann@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt, Head of the Chair of Logistics Engineering, Director of the Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Technische Universität Dresden

Thorsten Schmidt is full professor at the TU Dresden and heads the Chair of Logistics Engineering in the Mechanical Engineering faculty since 2008. He holds a diploma degree in mechanical engineering from the TU Dortmund and a Master degree in industrial engineering from the Georgia Institute of Technology. He received his Ph.D. from the TU Dortmund in 2001. His research areas are the design and optimization of facility logistics and production systems including a focus on the machinery and components involved. He currently works on energy efficient control strategies in material flow, fast approximation in early planning stages by means of standard design modules, online data analysis, formal verification of control logic, performance analysis of decentral and selfcontrolled systems, lightweight structures in material handling and stress analysis on wire ropes and toothed belts, respectively.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.
Phone: +49 351 463 32538
Fax: +49 351 463 35499
E-Mail: Thorsten.Schmidt@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Artem Zhakov, Research Assistant at the Chair of Logistics Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Technische Universität Dresden.

Artem Zhakov is research assistant at the chair of logistics engineering since 2013. Between 2010 and 2011 he did an internship as R&D Engineer at TAKRAF GmbH in Leipzig while working on the topic “Design and Development of routes of band-conveyors”. His current research areas are the design and dimensioning of machinery components for material handling systems, finite element analysis and the development of a new wire rope stress reducing winch with magnetic traction sheaves.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.
Phone: +49 351 463 34570
Fax: +49 351 463 35499
E-Mail: Artem.Zhakov@tu-dresden.de