

CC: HOR/THE/DOL/FLOR/LOR 3.6.02

Das System von Rad und Schiene in der Fördertechnik

Die Beanspruchung in der Teilfuge von Kunststoffrädern

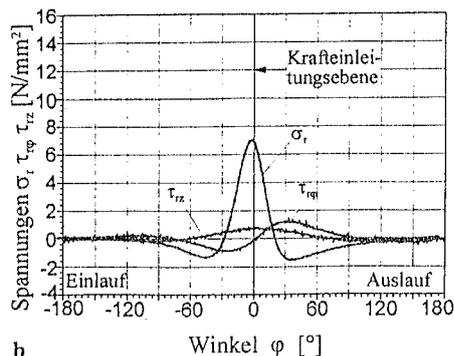
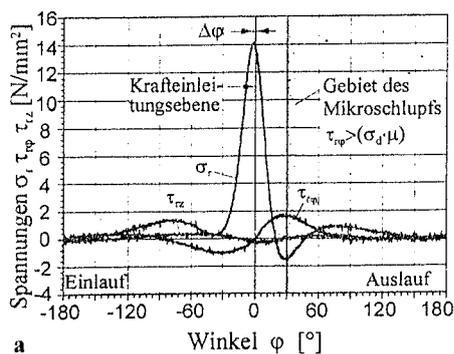
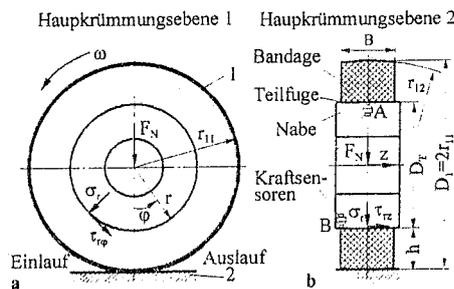
Eine häufige Schadensursache von Kunststoffrädern ist das Versagen der Teilfuge zwischen der relativ weichen Bandage und der relativ harten Nabe. Diese Veröffentlichung zeigt als Ergebnis eines dreijährigen DFG-geförderten Forschungsvorhabens [1] in zwei Fortsetzungen den Beanspruchungszustand in der Teilfuge von Bandage-Nabe-Verbindungen mit unterschiedlichen Ausführungsformen, erklärt beobachtetes Fehlverhalten und gibt Hinweise für die beanspruchungsgerechte konstruktive Ausführung. Der vorliegende erste Teil behandelt die zylinderförmigen stoff- und reibschlüssigen, der zweite Teil die formschlüssigen Bandage-Nabe-Verbindungen. – Von Prof. Dr.-Ing. D. Severin und Dr.-Ing. Xiufei Liu, TU Berlin.

1. Einführung

Eine Vielzahl von Rädern in der Fördertechnik besteht entsprechend Abb. 1 aus einer Kunststoffbandage, die auf eine metallische zylinderförmige Nabe gepresst, gespritzt oder gegossen ist. Infolge der allgemein großen Steifigkeitsunterschiede zwischen diesen beiden Elementen hängt die Spannungsverteilung über den Teilfugenumfang und über die Teilfugenbreite stark von dem Bandagenwerkstoff, von der Bandagendicke, von der Form der Lauffläche quer zur Rollrichtung (zylinderförmig oder ballig) und von dem Temperaturzustand im Radkörper ab, der wiederum durch die Größe der Radlast und der Rollgeschwindigkeit bestimmt wird. Besonders große Teilfugenspannungen können bei ungünstiger Gestaltung der Räder im Bereich der Teilfugenränder entstehen, die dann häufig der Ausgangsort für die Ablösung der Bandage von der

Abb. 1: Aufbau eines Rades mit Kunststoffbandage; Bezeichnungen der verwendeten geometrischen und mechanischen Größen.

Abb. 2: Gemessene Spannungen in der Teilfuge bei einer zylinderförmigen Verbindung. Bandage aus PA12G: $D_1=175$ mm, $h=40$ mm, $D_T=120$ mm, $B_1=50$ mm, ballige Lauffläche $r_{12}=D_1$, $\delta_T=0,8\%$; Gegenrad aus Stahl: $D_2=200$ mm, $B_2=90$ mm; $F_N=6300$ N, $v=0,3$ m/s, $\vartheta_{\text{Raum}}=22^\circ\text{C}$.



Nabe sind. Die Steifigkeitsunterschiede sind auch verantwortlich für einen möglichen Mikroschlupf, der bewirkt, dass die Bandage auch ohne Einwirkung einer äußeren Tangentialkraft auf der Nabe wandert. Sie kann sich dabei auch quer zur Rollrichtung verschieben, wenn die Oberfläche der Nabe schraubenlinienförmige Drehriefen besitzt, oder wenn das Rad neben der Normalkraft durch Querkräfte belastet ist.

Die folgenden Ausführungen zeigen Rechen- und Messergebnisse in zylinderförmigen Teilfugen. Die Teilfugenspannungen werden in der Radmitte und am Radrand mit Hilfe von Dreikomponenten-Quarzsensoren gemessen, die in der Stahlnabe eingebaut sind (Stellung A und B in Abb. 1b). Variiert werden die Bandagendicken h , die Laufflächenkrümmung (r_{12}) quer zur Rollrichtung, der Bandagenwerkstoff, die Radkörpertemperatur und das Untermaß δ_T bei Pressverbindungen. Das Untermaß ist definiert als:

$$\delta_T = \left(1 - D_{T, \text{Bandage}} / D_{T, \text{Nabe}}\right) \cdot 100 [\%].$$

2. Spannungsverlauf und Mikroschlupf über den Teilfugenumfang

Die mit dem Rad umlaufenden Sensoren zeichnen kontinuierlich die Teilfugenspannungen während eines Radumlaufs auf. Der in Abb. 2 wiedergegebene Spannungsverlauf ist kennzeichnend für alle zylinderförmigen Bandage-Nabe-Verbindungen. Dort sind für den Radmittenbereich (Sensor A) die gemessene Radialspannung σ_r , die Schubspannung τ_{rz} quer zur Rollrichtung und die Schubspannung τ_{ry} in Rollrichtung über den Teilfugenumfang aufgetragen, in diesem Fall für ein Rad mit einer hartelastischen Bandage aus PA 12G.

Die Radialspannung σ_r (Abb. 2a) ist in der Krafteinleitungsebene am größten und fällt links und rechts vom Maximum relativ steil ab. Infolge der viskoelastischen Werkstoffeigenschaften hat die σ_r -Kurve keinen symmetrischen Verlauf. Das Maximum ist geringfügig zum Einlauf hin um $\Delta\phi$ verschoben. Im Auslaufgebiet bewegt sich die Radialspannung σ_r sogar in den negativen Bereich, das bedeutet, sie baut dort lokal die Vorspannung ab. Da die Lauffläche quer zur Rollrichtung gekrümmt ist (Krümmungsradius r_{12} entspricht hier dem Raddurchmesser D_1), sind die Radialspannungen σ_r am Rand (Abb. 2b) kleiner als in der Radmitte und annähernd symmetrisch zur Lasteinleitungsebene.

Da sich die Bandage und die Nabe wegen der ungleichen Steifigkeiten unterschiedlich ausdehnen, wirken auch in der Teilfuge Schubspannungen τ_{rz} quer zur Rollrichtung. Sie verschwinden in der Radmitte (Abb. 2a) und wachsen zu den Radrändern hin an (Abb. 2b). Des Weiteren wirken auch Schubspannungen $\tau_{r\theta}$ in Rollrichtung, und dies sowohl in der Radmitte als auch an den Rändern (Abb. 2a, b). Sie verschwinden stets in der Kraft-einleitungsebene und wechseln hier ihr Vorzeichen.

Die in Rollrichtung wirkenden Schubspannungen $\tau_{r\theta}$ sind verantwortlich für den Mikroschlupf (lokaler Schlupf) in der Teilfuge. Dieser tritt immer dann auf, wenn die Schubspannungen $\tau_{r\theta}$ größer sind als das Produkt aus der Druckspannung σ_d und der Reibungszahl ($\tau_{r\theta} > \mu \cdot \sigma_d$). Die Druckspannung σ_d in der Teilfuge ist die Summe aus der Vorspannung σ_{vor} und der durch die Radlast hervorgerufenen Radialspannung σ_r . Der Bereich, in dem Mikroschlupf auftritt, ist in Abb. 2a gekennzeichnet. Infolge der Drehbewegung des Rades wandert dieser Bereich über den Teilfugenumfang und führt so zu einer allmählichen Verschiebung der Bandage auf der Nabe. Diese lokale Verschiebung wird als lokaler Schlupf bezeichnet. Unter Ziffer 4 wird gezeigt, welche Wirkungen dieser lokale Schlupf in Verbindung mit der Radgeometrie und der Belastung auf den globalen Schlupf s_T hat.

Bei den einzelnen Kunststoffen verändern sich die wichtigen Werkstoffgrößen Elastizitätsmodul E und der Verlustfaktor d unterschiedlich stark mit der Temperatur [2]. Deswegen verändert sich der Beanspruchungszustand in der Bandage und in der Teilfuge von schnelllaufenden Rädern, wenn diese sich im Lauf des Rollvorgangs infolge der inneren Dämpfung erwärmen [3]. Dabei kann die Umgebungstemperatur einen deutlichen Einfluss haben.

3. Einfluss verschiedener Konstruktionsparameter auf den Spannungsverlauf in der Teilfuge

Mit abnehmender Bandagendicke h steigen sowohl die Spannungen in der Kontaktfläche [4] als auch die Radial- und Schubspannungen in der Teilfugemitte progressiv an. Die in Abb. 3a dargestellten Messergebnisse machen dies deutlich. Weil das ballige Rad eine quer zur Lauffläche gekrümmte Form hat (hier $r_{12}=D_1$), trägt es im Randbereich umso weniger, je dünner die

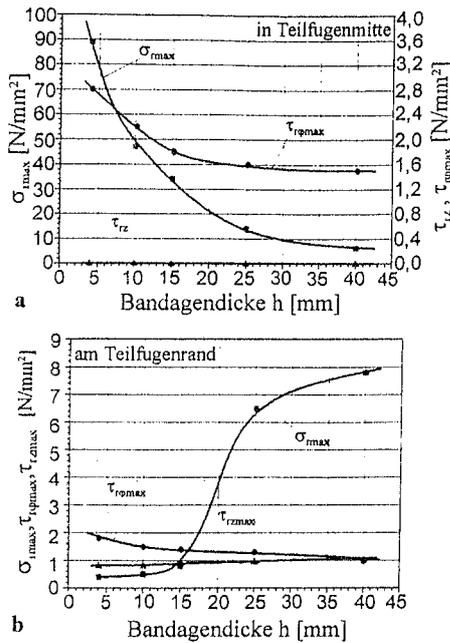


Abb. 3; Einfluss der Bandagendicke h auf die maximalen Teilfugenspannungen (gemessen). Bandage aus PA12G: $D_T=120$ mm, $B_1=50$ mm, ballige Lauffläche $r_{12}=D_1$, $\delta_T=0.8\%$; Gegenrad aus Stahl: $D_2=200$ mm, $B_2=90$ mm; $F_z=6300$ N, $v=1$ m/s, $\vartheta_{Raum}=22^\circ$ C.

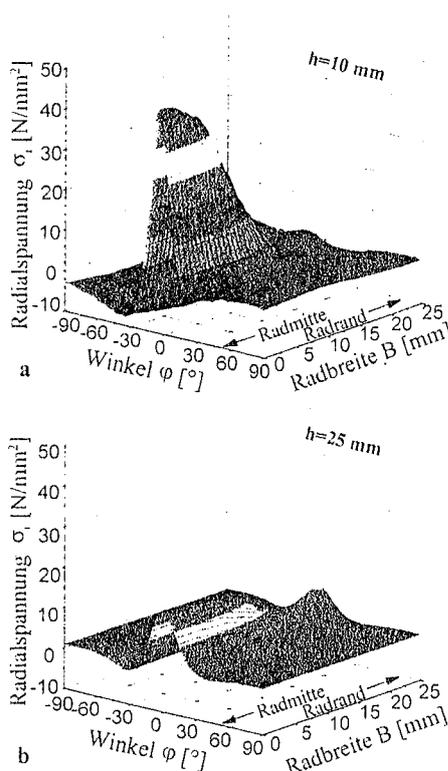


Abb. 4: Gemessene Spannungsverteilung über die Radbreite B in der Teilfuge bei unterschiedlichen Bandagendicken h . a) $h=10$ mm, $D_1=140$ mm; b) $h=25$ mm, $D_1=170$ mm; Bandage aus PA12G: $D_T=120$ mm, $B=50$ mm, ballige Lauffläche $r_{12}=D_1$, $\delta_T=0.8\%$; Gegenrad aus Stahl: $D_2=200$ mm, $B_2=90$ mm; $F_z=6300$ N, $v=1$ m/s, $\vartheta_{Raum}=22^\circ$ C.

Bandage ist. Deswegen nehmen bei balligen Rädern und gleicher Radlast die Radialspannungen am Teilfugenrand mit dünner werdender Bandage ab (Abb. 3b). Die Schubspannungen $\tau_{r\theta}$ in Rollrichtung sind deswegen bei relativ dünnen Bandagen mit balliger Lauffläche sogar größer als die Radialspannungen σ_r , was besagt, dass die Gefahr des Ablösens der Bandage von der Nabe infolge von Mikroschlupf bei balligen Rädern mit dünnen Bandagen am Radrand besonders groß ist.

Wie sich die gemessene Radialspannung σ_r bei zwei unterschiedlich dicken Bandagen ($h=10$ und $h=25$ mm) über die halbe Radbreite und den Bandagenumfangswinkel φ verteilt, zeigen die beiden räumlichen Diagramme in Abb. 4.

Die bisher in den Bildern 2 bis 4 vorgestellten Messergebnisse gelten für hartelastische Räder. Mit ihrer Hilfe wurde ein hier entwickeltes FE-Programm überprüft, um auch die Teilfugenspannungen in anderen Rädern berechnen zu können. Die folgenden Ausführungen stützen sich auf Rechenergebnisse. Sie gelten für weichelastische Räder.

In Abb. 5a ist zu erkennen, dass sich in einem zylinderförmigen, weichelastischen Rad die Radnormalkraft F_N umso gleichmäßiger über die Radbreite B verteilt, und die Radialspannungen σ_r in der Teilfuge umso kleinere Werte annehmen, je dicker die Bandage ist. Besonders große Radialspannungen, die bis zur Streckspannung gehen können, entstehen in den Randbereichen der Teilfuge eines zylinderförmigen Rades. Es empfiehlt sich, dem durch gerundete Radkanten im Laufflächenbereich und durch Entlastungskerven im Bandagenkörper im teilfugennahen Bereich entgegenzuwirken. Am zylinderförmigen weichelastischen Rad haben auch die Schubspannungen τ_{rz} quer zur Rollrichtung ihr Maximum am Teilfugenrand (Abb. 5b).

Die Verhältnisse ändern sich, wenn die Lauffläche quer zur Rollrichtung gekrümmt ist. Abb. 6 vergleicht die über der Radbreite B aufgetragenen Teilfugenspannungen bei einer weichelastischen Bandage mit zwei unterschiedlichen Krümmungsradien. Die linke Bildseite gilt jeweils für $r_{12}=D_1=200$ mm. Die rechte Bildseite gehört zu dem Krümmungsradius $r_{12}=D_1/2=100$ mm. Der Vergleich der beiden Bildseiten macht den starken Einfluss der Laufflächenkrümmung deutlich. Sie wirkt sich in der Radmitte, umso stärker spannungssteigend aus, je dünner die Bandage ist. Sowohl die Teilfu-

Abb. 5: Einfluss der Bandagendicke h auf die Spannungsverteilung in der Teilfuge, aufgetragen über die Radbreite. Weichelastisches Rad gegen ebene Fahrbahn, a) gerechnete Radial- und b) gerechnete Schubspannungsverteilung. Rad aus PUR (Vulkollan 30), $D_1=200$ mm, $D_T=120$ mm, $B=50$ mm, zylinderförmige Lauffläche $r_{12}=\infty$; $F_N=3100$ N, $v=6.3$ m/s, $\vartheta_{\text{Raum}}=45^\circ\text{C}$.

genradialspannungen σ_r (Abb. 6a) als auch die Schubspannungen τ_{rz} quer zur Rollrichtung (Abb. 6b) vergrößern sich jeweils im Radmittenbereich mit zunehmender Krümmung (vergleiche rechte und linke Bildhälfte) und mit abnehmender Bandagendicke. Die maximale Schubspannung τ_{rz} quer zur Rollrichtung liegt nicht am Rand, sondern zwischen dem Rand und der Radmitte, und verschiebt ihre Lage mit abnehmender Bandagendicke zur Radmitte hin. Deswegen kann eine Ablösung der Bandage von der Nabe auch im Inneren der Teilfuge beginnen.

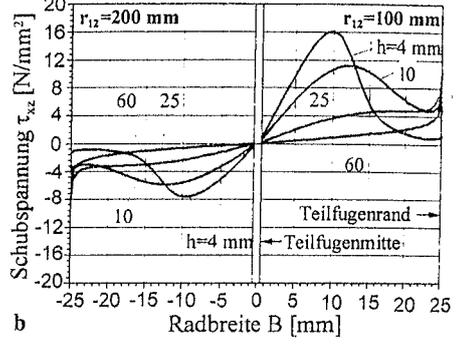
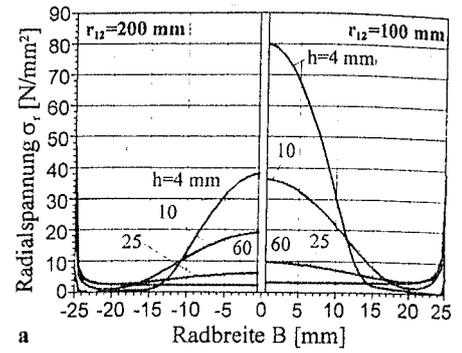
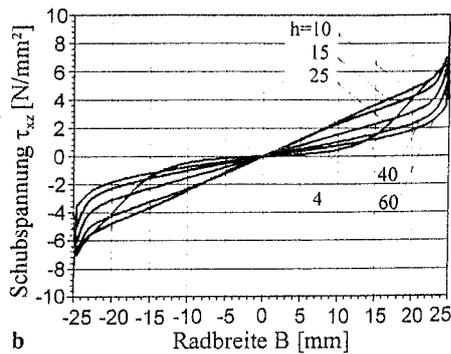
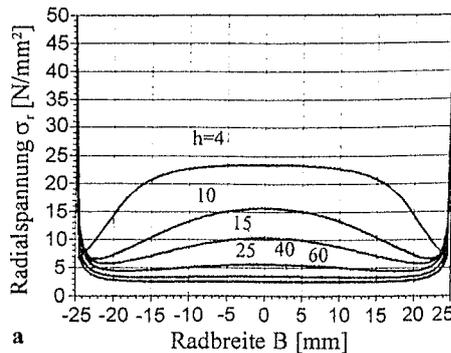
Die Krümmung quer zur Rollrichtung bewirkt gegenüber dem zylinderförmigen Rad bei gleicher Belastung eine beachtliche Spannungsreduzierung an den Teilfugenrädern ($B/2=\pm 25$ mm), wie der Vergleich der Bilder 6 und 5 zeigt.

4. Globaler Schlupf in der Teilfuge der kraftschlüssigen zylinderförmigen Verbindung

Die durch den Mikroschlupf hervorgerufene Verschiebung ΔL zwischen Bandage und Nabe (siehe Ziffer 2) wurde in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen gemessen, um daraus über die Zahl der Radumdrehungen n_R sowie über den Teilfugendurchmesser D_T den globalen Schlupf s_T zwischen der Teilfuge und der Nabe bestimmen zu können:

$$s_T = \frac{\Delta L}{\pi \cdot n_R \cdot D_T} \cdot 1000 \quad [‰/100].$$

In Langzeitversuchsreihen wurde bei sonst gleichen äußeren Abmessungen der Räder mit einer hartelastischen Bandage (PA 12G) deren Dicke h variiert. In Abb. 7



ist die Veränderung des Schlupfes in Abhängigkeit von der Radlast F_N und der Bandagendicke h wiedergegeben. Schlupf tritt erst ab einer bestimmten Belastung auf, und zwar umso später, je dicker die Bandage ist. Anschließend steigt der Schlupf bei relativ dicken Bandagen mit der Radbelastung an. Bei relativ dünnen Bandagen (z.B. 4 mm) kann der Schlupf nach Überschreiten einer bestimmten Normalkraft auch negative Werte annehmen. In diesem Fall eilt die Nabe der Bandage voraus.

Der Schlupf wird unter anderem beeinflusst durch die Härte des Bandagenwerkstoffs. Er steigt mit abnehmender Steifigkeit progressiv an. Wie die Messungen zeigen, ergibt sich in einem doppelt-logarithmischen Maßstab eine annähernd lineare Beziehung zwischen dem auf die Radlast bezogenen Schlupf s_T/F_N und dem E-Modul.

Abb. 8 untersucht den Einfluss der Reibungszahl μ_T zwischen Bandage und Nabe auf die Größe des globalen Schlupfs an Rädern, bei denen die Bandage mit einem Untermaß von $\delta_T=0.8\%$ auf die Nabe gepresst ist. Nach Unterschreiten der Grenz-

Abb. 6: Einfluss der Balligkeit ($r_{12}=100$ mm und $r_{12}=200$ mm) auf die Spannungsverteilung in der Teilfuge über die Radbreite. a) gerechnete Radial- und b) Schubspannungsverteilung. Rad aus PUR (Vulkollan 30), $D_1=200$ mm, $D_T=120$ mm, $B=50$ mm; ebene Fahrbahn; $F_N=3100$ N, $v=6.3$ m/s, $\vartheta_{\text{Raum}}=45^\circ\text{C}$.

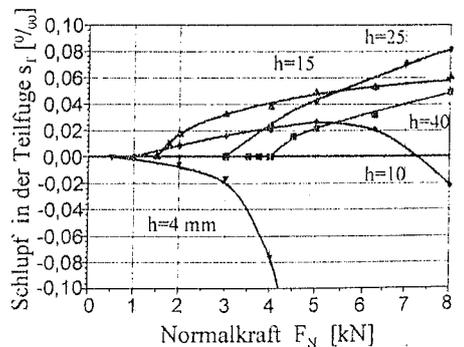


Abb. 7: Gemessener globaler Schlupf s_T in der Teilfuge in Umfangsrichtung in Abhängigkeit von der Normalkraft F_N und der Bandagendicke h . Bandage aus PA12G; $D_T=120$ mm, $B=50$ mm; Gegenrad aus Stahl; $D_2=200$ mm, $B_2=90$ mm, ballige Lauffläche $r_{12}=D_1$; $F_N=6300$ N, $v=1$ m/s, $\vartheta_{\text{Raum}}=22^\circ\text{C}$.

ALTEC GmbH, Rudolf-Diesel-Str. 7, D-78224 Singen
 ☎ 0 77 31/87 11-0, Telefax 0 77 31/87 11-11
 Internet: <http://www.altec-singen.de>
 E-Mail: altec-singen@t-online.de

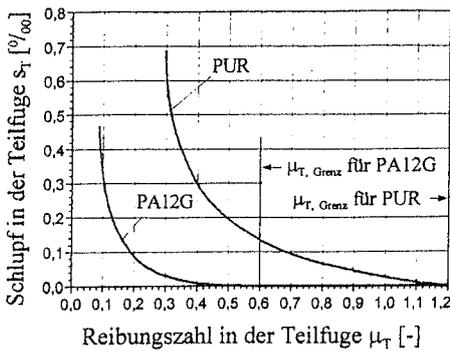


Abb. 8: Schlupf in der Teilfuge in Abhängigkeit von der Reibungszahl μ_T (gerechnet). Rad aus PA12G: $D_1=170$ mm, $h=25$ mm, $D_T=120$ mm, $B_1=50$ mm, $\delta_T=0.8\%$, $F_N=6300$ N; Rad aus PUR: $D_1=170$ mm, $h=25$ mm, $D_T=120$ mm, $B_1=50$ mm, zylinderförmige Lauffläche $r_{12}=\infty$; $\delta_T=0.8\%$, $F_N=3100$ N; Gegenrad aus Stahl, $D_2=200$ mm, $B_2=90$ mm, $v=1$ m/s, $\vartheta_{\text{Raum}}=22^\circ\text{C}$.

reibungszahl $\mu_{T,\text{Grenz}}$ beginnt sich die Bandage auf der Nabe zu verschieben. Mit abnehmender Reibungszahl μ_T steigt der Schlupf danach progressiv an. Die hier geforderten Grenzreibungszahlen sind in der Praxis weder für den hartelastischen noch für den weichelastischen Bandagenwerkstoff zu erreichen.

Man könnte vermuten, dass in diesem

Ganzheitliche Betrachtung

Lenze arbeitet an einem Werkzeug, mit dem sich antriebsnahe Automatisierungslösungen auf einfache Art und Weise realisieren lassen. Grundlage sind Bibliotheken von Maschinengrundmodulen, die sich durch Parametrieren lösungsspezifisch anpassen und archivieren lassen.

Modernes Engineering für die Entwicklung von modularen Automatisierungslösungen nimmt einen immer höheren Stellenwert im Anlagen- und Maschinenbau ein und das mit dem Ziel, den Engineeringanteil an den Gesamtkosten einer Maschine zu senken. Grundlage der Methode ist die funktionale Zerlegung von Anlagen in Teilprozesse. Dabei werden verschiedenste Softwarewerkzeuge integriert, die mit der gleichen Datenbasis arbeiten. Der Rückgriff auf verfügbares Applikationswissen und die Zusammenfassung von Produktions-

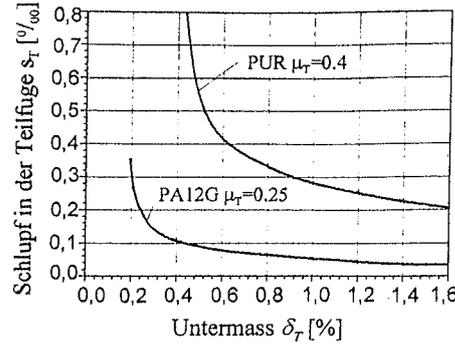


Abb. 9: Schlupf in der Teilfuge in Abhängigkeit vom Untermaß δ_T (gerechnet). Rad aus PA12G, $D_1=170$ mm, $h=25$ mm, $D_T=120$ mm, $B_1=50$ mm, zylinderförmige Lauffläche $r_{12}=\infty$; $\mu_T=0.25$; $F_z=6300$ N; Rad aus PUR, $D_1=170$ mm, $h=25$ mm, $D_T=120$ mm, $B_1=50$ mm; zylinderförmige Lauffläche $r_{12}=\infty$; $\mu_T=0.4$; $F_z=2500$ N; Gegenrad aus Stahl, $D_2=200$ mm, $B_2=90$ mm, $\vartheta_{\text{Raum}}=22^\circ\text{C}$.

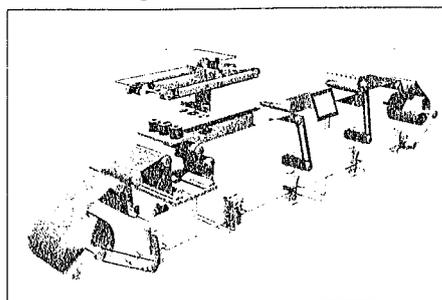
Fall das Auftreten von Schlupf durch ein besonders großes Untermaß δ_T der ungeschrunpften Bandage verhindert werden könnte. Dies trifft nicht zu. In Abb. 9 sind für einen hart- und einen weichelastischen Werkstoff bei realistischen Reibungszahlen zwischen Nabe und Bandage der errechnete Schlupf in der Teilfuge in Abhängigkeit von dem Untermaß δ_T aufgetra-

schrritten zu einem Gesamtprozess spart so erhebliche Kosten.

Im Zusammenhang mit einem modularen Maschinenbau reicht eine alleinige Betrachtung der Hardware in der Automatisierung längst nicht mehr aus. Wesentliche Einsparungen sind vielmehr durch die konsequente Umsetzung der Modularisierung und Dezentralisierung zu erzielen. Das beginnt bereits im Engineering-Prozess und lässt sich durch entsprechende Software unterstützen.

Je größer und komplexer eine Maschine wird, umso mehr Module werden benötigt. Die Software der einzelnen Teilprozesse

Beispiel einer Verpackungsmaschine mit modular aufgebauten Teilprozessen



gen. Die Kurven nähern sich asymptotisch dem Schlupfwert $s_T=0$, das heißt, auch ein noch so großes Untermaß könnte das Eintreten von Schlupf in der Teilfuge nicht verhindern. Deshalb ist ein Pressverband als Bandage-Naben-Verbindung für Kunststoffräder nicht geeignet. Das Eintreten von Schlupf lässt sich nur durch andere Maßnahmen wie Kleben oder Formschluss vermeiden. Experimente und Schadensfälle in der Praxis bestätigen diese über die Berechnung gewonnenen Erkenntnisse.

5. Literatur

- [1] D. Severin und X. Liu: Die Beanspruchung in der Teilfuge rollender Räder, bestehend aus einer Stahlnabe und einer Kunststoffbandage. Bericht über das DFG-Forschungsvorhaben Se 342/26, 2002.
- [2] D. Severin und X. Liu: Die Besonderheiten von Rädern aus Polymerwerkstoffen. Berichtband der 2. Hamburger Staplertagung 1998, Universität der Bundeswehr Hamburg.
- [3] D. Severin, X. Liu und St. Tromp: Die Wärmeentwicklung in zylindrischen Rollkörpern mit viskoelastischer Bandage. Bericht über das DFG-Forschungsvorhaben Se 342/21, 1998.
- [4] D. Severin und X. Liu: Zum Rad-Schiene-System in der Fördertechnik – Berechnung und beanspruchungsgerechter Einsatz von Kunststoffrädern. dhf – Internationale Fachzeitschrift für Förder-, Lager- und Transporttechnik, Logistik, Automation 45 (1999), Nr. 5, S. 40-46.

se lässt sich in einer übersichtlichen Form zusammenführen. Das beinhaltet nicht nur mechanische und elektrische Komponenten, sondern auch Kommunikationssysteme und insbesondere die Schnittstellen der dezentralisierten Software. Das gilt für Entwicklung, Montage, Inbetriebnahme und Service gleichermaßen.

Ein Engineering, das sich an Modulen orientiert, stellt für den gesamten Erstellungsprozess einer Maschine eine wesentliche Verbesserung dar. Alle Beteiligten – vom Vertrieb, über die Projektierung bis hin zum Service – arbeiten mit der gleichen Datenbasis. Informationen aus verschiedenen Prozessschritten lassen sich weitergeben, ohne neu erfasst zu werden. Die Beschreibungen in XML und die Nutzung von Standardinterfaces schafft die Grundlage, auch eine herstellertübergreifende Integration von Automatisierungskomponenten zu ermöglichen.

Lenze AG
31763 Hameln
Tel.: 05154/82-1476
Fax: 05154/82-1605
www.lenze.com