

Mit dem Bayer-Werkstoff Vulkollan bandagierte Schwerlasträder werden beispielsweise in den Staplern von Jungheinrich verbaut.

Bild: Bayer Material Science AG

Rollen unter Schwerlast

Störstoffe in der Kontaktfläche von Rad und Fahrbahn beeinflussen den Verschleiß angetriebener Schwerlasträder mit Polyurethanbandage

BERND KÜNNE, VOLKER MEHLAN UND ALJOSCHA LANGENOHL

Räder mit einer Bandage aus massivem Polyurethan weisen eine Vielzahl von Vorteilen auf. Aus diesem Grund sind sie in logistischen Systemen weit verbreitet. Dabei ist die Beanspruchungshöhe eines sogenannten Schwerlastrades nicht allein abhängig von der mechanischen Belastung, ebenso spielen Randbedingungen wie insbesondere unterschiedliche Zwischenstoffe und Störstoffe, die in der Kontaktfläche zwischen Rad und Fahrbahn auftreten, eine wichtige Rolle im gesamten Beanspruchungskollektiv.

Verschleißuntersuchungen an Polymeren werden bisher ohne die Berücksichtigung der dynamischen Beanspruchung und von Zwischenstoffen in der Kontaktfläche durch-

Prof. Dr.-Ing. Bernd Künné ist Leiter des Fachgebiets Maschinenelemente an der Universität Dortmund, Tel. (02 31) 7 55-26 02, b.kuenne@me.mb.uni-dortmund.de; Dr.-Ing. Volker Mehlan arbeitet im Equipment Design, Business Unit Strategic Tire Technology der Continental AG, Hannover, Tel. (05 11) 9 76-60 71; Aljoscha Langenohl ist wissenschaftlicher Angestellter im Fachgebiet Maschinenelemente der Universität Dortmund, Tel. (02 31) 7 55-57 32, a.langenohl@me.mb.uni-dortmund.de;

geführt. Beim Einsatz als Bandagen in Schwerlasträdern treten jedoch Belastungen und Randbedingungen auf, die einen erheblichen Einfluss auf das Verschleißverhalten besitzen.

Während sich die dynamischen Belastungen aus der Abwälzung und der Kraftübertragung des Rades ergeben, resultieren die Zwischenstoffe in der Kontaktfläche zwischen angetriebenem Schwerlastrad und Gegenfläche zumeist aus einer Verschmutzung des zu fördernden oder zu handhabenden Gutes. Daher ist es sinnvoll, bei Untersuchungen des Verschleißverhaltens insbesondere

solche Stoffe zu berücksichtigen, wie sie in den meisten Anwendungen anzutreffen sind, um so ihren Einfluss zu ermitteln.

Von den Zwischenstoffen ist dabei auf der einen Seite eine abrasive Wirkung zu erwarten, die insbesondere die Rissausbreitung beeinflusst. Auf der anderen Seite muss speziell bei flüssigen Stoffen mit einer chemischen Wirkung auf den polymeren Werkstoff des Schwerlastrades gerechnet werden. Um diese Einflüsse zu untersuchen, ist am Fachgebiet Maschinenelemente der Universität Dortmund im Rahmen eines von der Bundesvereinigung Logistik (BVL) geförderten Projektes ein Versuchsaufbau entwickelt worden, mit dessen Hilfe das Verschleißverhalten von Schwerlasträdern mit Polymerbandage unter Einwirkung von Zwischenstoffen in der Kontaktfläche unter möglichst realitätsnaher Nachbildung des Beanspruchungskollektives untersucht werden kann.

Verschleißuntersuchungen und Versuchsaufbau

Die Nachbildung der dynamischen Belastung wird dabei durch einen Rollenversuchsstand erreicht. Dieser unterscheidet sich in seinem Aufbau von üblichen Rollenversuchsständen durch die senkrechte Lage der Drehachsen von Prüfrad und Gegenscheibe. Weil daraus eine ebenfalls senkrechte Lage der Kontaktfläche resultiert, kann somit der Selbstreinigungseffekt, der sich aus der Schwerkraft ergibt, berücksichtigt werden. Die Leistungsübertragung in der Kontaktfläche wird durch eine Magnetspulverbremse ermöglicht, mit der die Gegenscheibe abgebremst wird. Aus diesem Aufbau ergibt sich eine realere Nachbildung des Schlupfes, als dies bei einem konstruktiv vorgegebenen Schlupf der Fall wäre. Da vom Schlupf ein wesentlicher Einfluss auf das Verschleißverhalten zu erwarten ist, ist es erforderlich, diesen während der Versuche permanent zu messen. Dabei wird, durch geeignetes Einmessen des Übersetzungsverhältnisses zwischen Prüfrad und Gegenscheibe, der so genannte Leerlaufschlupf,

der aus dem großen Steifigkeitsunterschied zwischen polymerer Bandage und Gegenfläche resultiert, mit berücksichtigt.

Zur Einbringung der Zwischenstoffe in die Kontaktfläche wird ein Fördersystem verwendet, mit dem der Zwischenstoff direkt in den Luftstrom einer mit Druckluft beaufschlagten Düse gefördert wird. Mit Hilfe der Druckluft wird der Zwischenstoff direkt in die Kontaktfläche eingblasen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist die absolute Unabhängigkeit der Fördermenge von der Höhe des Luftdruckes. Dadurch ist es möglich, über die Einstellung des Luftdruckes die gleichmäßige Verteilung des Zwischenstoffes über die Kontaktflächenbreite zu erreichen.

Versuchsdurchführung

Als praktikable Versuchsdauer zur Erzielung aussagekräftiger Ergebnisse ist ein Zeitraum von 24 h gewählt worden. Innerhalb dieser Zeit stellt sich ein Verschleiß ein, der neben seinem deutlichen Nachweis auch Aussagen über die zu erwartende Gebrauchsdauer des Rades zulässt.

Als Prüflinge werden handelsübliche Räder mit 100 und 200 mm Durchmesser untersucht. Die Bandagenhärten variieren zwischen 75, 80, 85 und 92 Shore-A. Weiterhin werden sowohl Polyurethane auf NDI- als auch auf MDI-Basis untersucht.

Die Gegenfläche wird durch ein Gegenrad aus Stahl gestellt. Zusammen mit dem elastomeren Werkstoff der Bandage ist dies die in den meisten Handlingsystemen anzutreffende Werkstoffpaarung zur kraftschlüssigen Übertragung von Antriebskräften.

Die Belastung eines Rades wird neben der Versuchsdauer und der Art und Menge des einwirkenden Zwischenstoffes hauptsächlich gekennzeichnet durch die wirkende Normalkraft, die übertragene Tangentialkraft sowie die Drehzahl. Die Normalkraft wird in Abhängigkeit von den Radabmessungen und in Übereinstimmung mit der gängigen

Ausschlaggebende Parameter für den Versuchsaufbau

Radgröße	Bandagenhärte	Druckluftdruck	Normalkraft
100	10/30	75	1130
100	10/30	80	1400
100	10/30	85	2450
100	10/30	92	3000
200	15/50	75	4400
200	15/50	80	5600
200	15/50	85	6800
200	15/50	92	8000

Grobauslegung (800 N pro Zentimeter Radbreite und 100 mm Außendurchmesser) festgelegt. Um eine vergleichbare Belastung der Bandagen zu erhalten ist es erforderlich, die Deformation möglichst konstant zu halten. Zu diesem Zweck wurde die tatsächliche Kontaktflächenengröße ermittelt und die Normalkraft entsprechend korrigiert.

Die Tangentialkraft ergibt sich aus dem in der Bremse abgeführten Drehmoment, das neben dem Schlupf zu der wichtigsten Messgröße bei der Überwachung des Versuchsablaufes gehört. Das maximal übertragbare Drehmoment hängt im Wesentlichen vom erzielten Reibungsbeiwert ab. Diese wiederum ist abhängig von der Art des Zwischenstoffes.

Daraus ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Tangentialkraft und Zwischenstoff. Somit ergibt sich ein doppelter Einfluss des Zwischenstoffes: Erstens durch direkte chemische oder physikalische Einflüsse auf die Bandage, zweitens durch die Beeinflussung der mechanischen Beanspruchung. Der Verschleiß als wichtigste Messgröße wird in Anlehnung an DIN 50 321

FAZIT

- ▶ Der Verschleiß durch Leitungswasser ist bei NDI-vernetzten Polyurethantypen extrem erhöht
- ▶ Risskeimbildende Zwischenstoffe wie Sand oder Metallspäne erhöhen den Verschleiß durch Rissbildung und Ausbrechen von Werkstoff

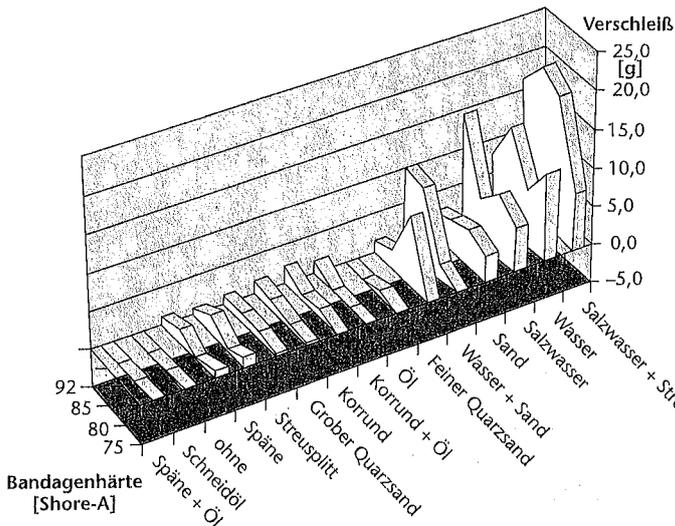


Bild 1: Verschleiß von Rädern mit 100 mm Durchmesser unter Berücksichtigung von Zwischenstoff und Bandagenhärte.

über den mit Verschleiß immer eingehenden Materialverlust beziehungsweise die Massenabnahme ermittelt. Dieses Verfahren hat sich bei Durchführung der Versuche als die praktikabelste Lösung erwiesen, da sich die Ermittlung des planimetrischen und des volumetrischen Verschleißbetrages als nur schwierig durchführbar erwiesen hat. Der lineare Verschleißbetrag entspricht, übertragen auf am Umfang beanspruchte rollenförmige Körper, einer Durchmesserabnahme. Jedoch ist auch die Ermittlung dieses Messwertes nicht praktikabel, da der Verschleiß nicht konstant auf der Radbreite stattfindet.

Zusätzlich zur reinen Ermittlung des Massenverlustes werden die Prüfräder auch einer optischen Prüfung zur subjektiven Beurteilung des Oberflächenerscheinungsbildes unterzogen. Dabei wird die Ober-

fläche sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch betrachtet, um so Rückschlüsse auf die Art der stattgefundenen Verschleißmechanismen zu ermöglichen.

Verschiedene Zwischenstoffe werden unterschieden

Die erste sinnvolle Unterteilung der untersuchten Zwischenstoffe ist die in feste und in flüssige Stoffe sowie Gemische aus diesen beiden.

Während die festen Stoffe die Polymerbandage meist durch ihre abrasive Wirkung beeinträchtigen, geht von den flüssigen Stoffen überwiegend eine chemische Wirkung auf den Bandagenwerkstoff aus. Darüber hinaus nimmt Wasser als flüssiger Zwischenstoff eine Sonderrolle ein, da polymere Werkstoffe die Eigenschaft haben, durch das so genannte Aufquellen Wasser in ihrem Molekülverbund einzulagern. Diese Eigenschaft beeinflusst deutlich die Werkstoffeigenschaften Festigkeit und Härte sowie das Haftungsverhalten der polymeren Bandage auf der Gegenfläche. Sowohl den festen also auch den flüssigen Stoffen gemeinsam ist die Eigenschaft, durch die Anwesenheit in der Kontaktfläche einen direkten Kontakt von Reibradoberfläche und Gegenfläche zu verhindern.

Zur Untersuchung herangezogen werden die folgenden Feststoffe:

- ▶ Quarzsand (grobe und feine Körnung)
- ▶ Metallspäne
- ▶ Streusplitt

- ▶ Korund sowie die Flüssigkeiten:
- ▶ Leitungswasser
- ▶ Schneid-Kühl-Flüssigkeiten (Esso Kutwell BR40)
- ▶ Schneidöl
- ▶ Öl
- ▶ Salzwasser.

Da in der Realität diese Stoffe nicht isoliert auftreten, sind auch sinnvoll erscheinende Gemische zu untersuchen. Diese sind:

- ▶ Quarzsand mit Wasser
- ▶ Metallspäne mit Öl/Wasser-Emulsionen (Schneid-Kühl-Flüssigkeiten)
- ▶ Korund mit Öl
- ▶ Salzwasser mit Streusplitt.

Wasser verursacht den größten Massenverlust

Im Diagramm oben links wird der Massenverlust in Gramm pro Rad innerhalb einer Versuchsdauer von 24 h gezeigt. Es zeigt sich, dass unter Einwirkung von Wasser der Verschleiß die absolut höchsten Werte erreicht. Der Massenverlust von einzelnen Rädern erreicht – bei der beschriebenen Versuchsdurchführung – Extremwerte von bis zu 27 g pro Rad in 24 h. Dies überrascht, da von Wasser keinerlei abrasive Wirkung auf die Bandage ausgeht. Es ist im Gegenteil eine geringe schmierende Wirkung zu beobachten, die sich in höheren Schlupfwerten als bei Versuchen ohne Zwischenstoff auswirkt und durch die partikuläre Trennung der abwälzenden Oberflächen durch das Wasser zu erklären ist.

Der hohe Verschleiß lässt sich erklären durch die Kombination von zwei Faktoren: Chemische Zersetzungsreaktionen und dynamische Beanspruchung. Die chemische Zersetzung von Polyurethanen basiert unter Einwirkung von Wasser zu meist auf der sogenannten hydrolytischen Degradation. Dabei werden die polymeren Kettenmoleküle durch Einwirkung von Alkalien aufgebrochen, es kommt zur sogenannten Verseifung des Werkstoffes. In Zusammenwirkung mit der dynamischen Belastung wird der im mikroskopischen Bereich versprödete Werkstoff bei der weiteren

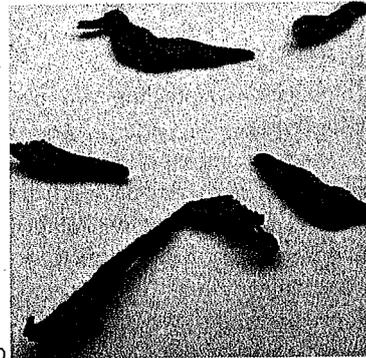
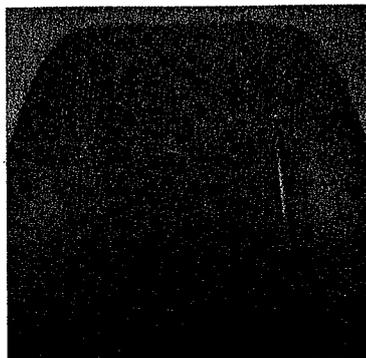


Bild 2: Vulkollanrad mit einer 92-Shore-A-Bandage und 100 mm Durchmesser nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Wasser als Zwischenstoff mit abgepulsten Abriebpartikeln.

Überwälzung und unter der Einwirkung von Schlupf vergleichsweise schnell abgerieben, da seine Bindung zum restlichen Werkstoff nicht die mechanische Festigkeit aufweist wie der ungeschwächte Werkstoff. Anschließend liegen die Kettenmoleküle in der Bandagenoberfläche für die weitere Reaktion wieder frei. Diese Theorie wird bestätigt durch die Beobachtungen, die an den Prüfrädern gemacht werden.

Die Räder bilden bei Versuchsdurchführung ständig Abriebpartikel in der Form kleiner Wülste, die je nach Bandagenhärte durch das weiter zugeführte Wasser weggespült werden (92 Shore-A) oder sich auf der Bandagenoberfläche ablagern und regelrecht angebacken werden (80 Shore-A und 85 Shore-A).

Besonders unter Einwirkung von Wasser hat der verwendete Vorvernetzer einen zum Teil erheblichen Einfluss auf den Verschleiß. So zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Bandagen, deren Prepolymer mit Naphtalindiisocyanat (NDI) hergestellt wurde und solchen, die mit Methylendiphenyldiisocyanat (MDI) vernetzt wurden. Die grafische Darstellung ist in Bild 3 dargestellt, in der der Massenverlust pro Zentimeter Radbreite aufgetragen ist, um die Ergebnisse aus Versuchen unterschiedlicher Radabmessungen vergleichen zu können.

Die Versuche haben weiterhin eine starke Abhängigkeit des Verschleißes von der Bandagenhärte gezeigt, wenn Wasser zusammen mit Sand als Zwischenstoff in der Kontaktfläche eingewirkt hat (siehe Bild 1). Hier zeigt sich ebenfalls die Abhängigkeit des Verschleißes unter Wassereinwirkung vom gewählten Vernetzer. Der etwas geringere Verschleiß unter Einfluss von Wasser und Sand ergibt sich durch eine Kombination von chemischen und abrasiven Vorgängen. Dabei wird die Rissausbreitung als wichtigster Verschleißfaktor bei abrasiven Zwischenstoffen durch Glätten der Risse aufgrund von chemischer Zersetzung in ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit verringert. Feste Stoffe zeigen im Allgemeinen eher eine

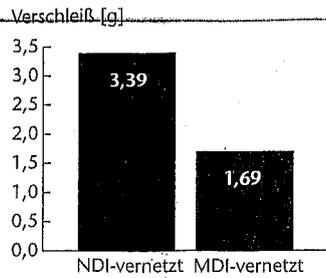


Bild 3: Einfluss des Vorvernetzers auf das Verschleißverhalten unter Einwirkung von Wasser.

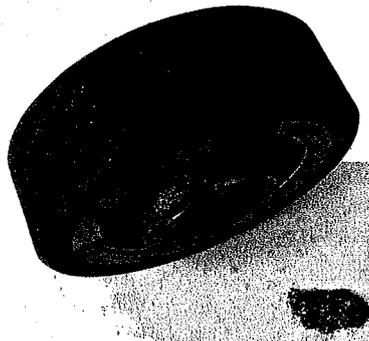


Bild 4: Nach Versuchsende aus der Bandagenoberfläche entfernte Späne.

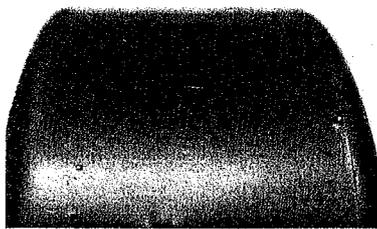


Bild 5: Nahezu unverschlissenes Rad nach Einwirkung von Schneid-Kühl-Emulsion.

abrasive Wirkung auf die Bandagenoberfläche. Dies wird bestätigt durch die Beobachtungen nach Versuchen, die unter Einwirkung von Sand beziehungsweise Spänen durchgeführt worden sind. Neben einer wesentlich zerklüfteteren Oberfläche ist auch ein Verschleißmaximum in der Mitte der Bandage zu erkennen. Verantwortlich für dieses Phänomen ist das aus der Normalspannungsverteilung resultierende Tangentialkraftmaximum in der Bandagenmitte. Die tangentialen Kräfte sind hauptsächlich verantwortlich für die axiale Rissbildung in der Oberfläche. In Verbindung mit einem die Rissbildung fördernden Zwischenstoff führt dies zu einem deutlich erhöhten Verschleiß

in der Bandagenmitte, der für weichere Bandagenwerkstoffe sogar noch stärker ausfällt.

Weil von beiden festen Zwischenstoffen ein abrasiver Einfluss auf die Bandage ausgeht, ließe sich ein ähnlich hoher Verschleißbetrag erwarten. Gemessen wurde dagegen ein deutlich geringerer Verschleiß unter Einwirkung von Metallspänen. Bei genauerer Betrachtung der Oberfläche konnte jedoch festgestellt werden, dass sich die Späne wesentlich stärker in der Bandage abgelagert haben. Eine anschließende Entfernung der Späne aus der Bandage führte zur Ermittlung eines Verschleißbetrages auf ähnlich hohem Niveau, wie es bei den Versuchen mit Sand gemessen wurde (siehe Bild 4).

Kühl- und Schmierwirkung reduziert Verschleiß

Die bei Durchführung der Versuche beobachtete Gewichtszunahme der Prüfräder unter Einwirkung von Schneid-Kühl-Emulsion ist zurückzuführen auf zwei Ursachen: So liegt der Verschleiß unter der kühlenden und schmierenden Wirkung der Emulsion auf sehr niedrigem Niveau, und darüber hinaus werden Wassermoleküle aus der Emulsion durch Quellvorgänge im Molekülverbund des Elastomers eingelagert.

Insbesondere das Quellen konnte schon bei den Versuchen mit Wasser beobachtet werden, bei denen die Räder nach einer 24-stündigen Trocknung nochmals bis zu 0,3 g an Gewicht verloren haben. Die Größenordnung dieser Gewichtsabnahme entspricht in etwa der Gewichtszunahme in den Versuchen mit Schneid-Kühl-Emulsionen. Dabei ließ sich der im Molekülverbund eingelagerte Wasseranteil nicht ebenfalls wieder rückgängig machen, da eine dünne Ölschicht die Räder überzogen hat, die eine Diffusion der Wassermoleküle in die Umgebungsluft verhindert.



www.maschinenmarkt.de

- ▶ Vulkollan
- ▶ Universität Dortmund