

Experimentelle Verschleißuntersuchungen von angetriebenen Polyurethan-Rädern unter Einwirkung von Zwischenstoffen



Der Fakultät Maschinenbau
der Universität Dortmund
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
vorgelegte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Volker Mehlan
aus Wittmund

Dortmund, im Oktober 2002

Experimentelle Verschleißuntersuchungen von angetriebenen Polyurethan-Rädern unter Einwirkung von Zwischenstoffen

1	Einleitung	3
2	Stand der Technik	5
2.1	Deutsche Normen über Verschleiß und Schwerlasträder	5
2.2	Theoretische Untersuchungen zum elastischen Wälzen	9
2.3	Grundlagen zum Verschleiß polymerer Werkstoffe	12
2.4	Experimentelle Untersuchungen von Rädern und Rollen aus Kunststoff	13
2.5	Vergleich mit anderen Beanspruchungsarten	15
2.6	Spezielle Untersuchungen schlupfbehafteter Antriebe im Lagerwesen	17
2.7	Ergebnisse aus der Literaturrecherche	19
3	Ziel der Arbeit und Vorgehensweise	21
3.1	Ziel- und Aufgabenstellung	21
3.2	Motivation für die Arbeit	22
3.3	Vorgehensweise	22
4	Randbedingungen	24
4.1	Grundlagen der Herstellung von Radbandagen aus Polyurethanen	24
4.2	Grundlagen polymerer Werkstoffe im Einsatz als Radkörper	25
4.3	Einsatzgebiete reibschlüssiger Antriebe	28
4.4	Systemtechnische Randbedingungen	29
4.5	Geometrische Randbedingungen	33
4.6	Dynamische Randbedingungen	35
4.7	Kinematische Randbedingungen	35
4.8	Zusammenfassung der Randbedingungen	37
5	Versuchsaufbau	39
5.1	Reibrad	40
5.2	Gegenfläche	42
5.3	Bremse	42
5.4	Normalkraft	42
5.5	Simulation von äußeren Einflussgrößen	43
5.6	Eingebrachte Zwischenstoffmengen	46
6	Versuchsdurchführung	47
6.1	Grundlegende Betrachtungen zur Belastung eines Reibrades	47
6.2	Durchgeführte Messungen	48
6.3	Versuchsprogramm	52

6.4	Ermittlung des Verschleißes.....	54
6.5	Bandagenwerkstoffe.....	56
6.6	Schlupfverhalten.....	57
6.7	Zuverlässigkeit der durchgeführten Messungen.....	59
7	Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse	62
7.1	Allgemeines.....	62
7.2	Verschleiß der Bandage.....	63
7.2.1	Verschleiß in Abhängigkeit des Zwischenstoffes.....	67
7.2.2	Verschleiß in Abhängigkeit der Bandagenhärte.....	79
7.2.3	Verschleiß in Abhängigkeit des Vernetzers.....	81
7.2.4	Verschleiß in Abhängigkeit der Radabmessungen und der Belastungshöhe.....	82
7.2.5	Verschleiß in Abhängigkeit vom Schlupf.....	84
7.3	Verschleißmechanismen.....	86
7.4	Verlauf des Reibbeiwertes in Abhängigkeit vom Zwischenstoff.....	88
7.5	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse.....	90
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	94
9	Literatur.....	96
	Anhang.....	105

1 Einleitung

Rollen und Räder aus thermoplastischen oder elastomeren Kunststoffen finden eine weite Verbreitung in vielen technischen Bereichen. Insbesondere auf dem Gebiet der Fördertechnik für leichte und mittlere Belastungen verdrängen Rollen und Räder aus diesen Werkstoffen zunehmend die zuvor üblichen Rollen aus Grauguss, Stahl und Leichtmetall. Dies liegt im Wesentlichen an den folgenden Vorteilen polymerer Werkstoffe für den Einsatz als Rollenwerkstoff:

- geringe Eigenmasse
- große Laufruhe durch höhere Materialdämpfung
- wirtschaftlichere Fertigungsmöglichkeiten
- elektrische und thermische Isolation
- große Bruchdehnung
- günstige Kraftübertragungseigenschaften
- Eigenschmierungseigenschaften bzw. kein Bedarf der Schmierung
- Schonung der Fahrbahn
- Beständigkeit gegen korrosive Einflüsse
- physiologische Unbedenklichkeit

Insbesondere die guten Kraftübertragungseigenschaften und die hohe Laufruhe und Dämpfungseigenschaften speziell von Polyurethanen haben dazu geführt, dass sich dieser Werkstoff für den Einsatz in angetriebenen Rädern durchgesetzt hat. Einzig Gummiwerkstoffe aus synthetischem bzw. natürlichem Kautschuk weisen ähnliche Werkstoffeigenschaften auf, haben jedoch den Nachteil, dass sie insbesondere bei Verwendung von Ruß als Füllstoff kreidend (marking) sind und dementsprechend die Fahrbahn optisch und physiologisch beeinflussen.

Ein angetriebenes Rad ist dabei prinzipiell immer so aufgebaut, dass sich auf einer Nabe aus höher festem Werkstoff eine Bandage aus Polyurethan befindet, die im Niederdruckverfahren um die Nabe gegossen wird. Für Räder, die höheren Beanspruchungen unterworfen sind, kommt dabei zumeist eine Nabe aus metallischen Werkstoffen zum Einsatz. Als Nabenwerkstoffe finden hier Stahl, Gusseisen und Aluminium die weiteste Verbreitung, während für untergeordnete Beanspruchungen auch Thermoplaste wie z. B. Polyamid verwendet werden.

Da mit dem Einsatz von Polymeren in mechanisch belasteten Systemen immer Reibung und damit Verschleiß einhergeht, welcher stark von dem Vorhandensein und der Art von zum Teil abrasiv wirkenden Zwischenstoffen abhängt, ist es erstrebenswert, das Verschleißverhalten insbesondere unter Einwirkung dieser Zwischenstoffe zu untersuchen.

Es besteht ein prinzipieller Unterschied zwischen dem Einsatz von Kunststoffen in Gleitlagerungen einerseits und dem Einsatz von Kunststoffen als Rollenwerkstoff in reibschlüssigen Antrieben andererseits. In dem einen Fall soll der Gleitreibungskoeffizient möglichst minimiert

werden, um Verluste, die aus der Reibung resultieren, möglichst klein zu halten, während es für den reibschlüssigen Antrieb wünschenswert ist, einen möglichst hohen Reibungskoeffizienten und damit einen großen Kraftschluss zu realisieren. Beiden Einsatzfällen gemein sind die Anstrengungen hinsichtlich der Minimierung des Verschleißes.

Inhalt der vorliegenden Arbeit sind Untersuchungen hinsichtlich des Verschleißverhaltens und seiner Optimierung für den Einsatz in reibschlüssigen Antrieben für das Stückguthandling. Hierbei werden auf experimentelle Weise Grundlagen zur verschleißgerechten Auslegung von angetriebenen und mit Polyurethanen beschichteten Rädern insbesondere unter Berücksichtigung des Einflusses von Zwischenstoffen geschaffen.

2 Stand der Technik

Untersuchungen, die das Problem der Wälzkörperreibung behandeln, lassen sich grundlegend unterteilen in Untersuchungen der Belastung und in solche, die den Verschleiß betrachten. Wälzkörper mit polymeren Bandagen stellen zudem noch einen Sonderfall der Wälzkörper dar, da sie zumeist auf Oberflächen mit einer wesentlich höheren Härte abwälzen. Das sogenannte viskoelastische Normalkontaktproblem ist hinsichtlich der auftretenden Belastungen sowohl auf theoretischer als auch auf experimenteller Ebene ausführlich untersucht worden.

Bei der Betrachtung des Verschleißes ist es zur Zeit noch üblich, Rückschlüsse anhand des Gleitverschleißes, wie er in diversen Normen festgelegt ist, durchzuführen. Hierbei wird zumeist ein stift- oder kugelförmiger Probenkörper mit einer definierten Normalkraft gegen die Planfläche einer rotierenden Scheibe gedrückt [DIN 50323-3]. Bei dieser Methode wird als Belastungsfall der sogenannte „Kornwälzverschleiß“ bzw. „Korngleitverschleiß“ [DIN 50320] polymerer Wälzkörper auf metallischer Gegenfläche ermittelt. Bei diesem Verfahren wird aber sowohl der Einfluss des Schlupfes, der aus der Tangentialkraft resultiert, als auch der Einfluss des Zwischenstoffes vollständig vernachlässigt.

In diesem Kapitel wird neben der Erläuterung der Normen, die zur Ermittlung, Messung und Beurteilung des Verschleißes dienen sollen, gezeigt, welche Untersuchungen das Problem des Wälzens viskoelastischer Rollkörper auf ebenen Flächen behandeln. Diese Untersuchungen lassen sich aufteilen in theoretische Betrachtungen des Rollvorgangs und in experimentelle Untersuchungen. Weiterhin existieren einige Untersuchungen zu speziellen Einsatzfällen, die das Problem aus unterschiedlichen Sichtweisen betrachten und ebenfalls genannt werden.

2.1 Deutsche Normen über Verschleiß und Schwerlasträder

Alle Begriffe und Formelzeichen der im Folgenden aufgezählten Normen werden im weiteren Verlauf unverändert übernommen und sind im Anhang nochmals aufgelistet und erläutert.

Die europäische Norm EN 12526 „Räder und Rollen“ stellt lediglich ein einheitliches Vokabular für die Bezeichnungen bei Rädern und Rollen zur Verfügung. Darüber hinaus bietet sie Formelzeichen an und enthält im Anhang einen mehrsprachigen Index (Deutsch, Englisch, Finnisch, Französisch, Italienisch, Niederländisch, Schwedisch). Nach den Bezeichnungen, wie sie in dieser Norm angewendet werden, bezeichnet der Begriff „Rolle“ eine Einheit aus einem Gehäuse, einem oder mehreren Rädern und einer Achse. Sie sind üblicherweise nicht angetrieben und nur für geringe Geschwindigkeiten vorgesehen. Als „Rad“ wird dementsprechend der aus Radkörper und Lauffläche bestehende rotationssymmetrische Bestandteil der Rolle bezeichnet. Dementsprechend werden in der vorliegenden Arbeit Räder untersucht, die mit einer festverbundener Bereifung aus Vollmaterial als Lauffläche versehen sind. Im Weiteren werden diese kurz Räder, Prüflinge oder Probenkörper genannt.

Die europäische Norm EN 12527 „Prüfverfahren und -geräte“ gibt neben einer weiterführenden Definition von Formelzeichen an, welche Geräte und Verfahren für die Prüfung der folgenden Radkenngrößen Anwendung finden müssen:

- Radlagerspiel
- Schwenklagerspiel
- Prüfung des elektrischen Widerstandes
- Ermüdungsprüfung für die Feststellvorrichtung
- Prüfung der Radfeststellung
- Prüfung der Richtungsfeststellung
- Dynamische Prüfung
- Statische Prüfung
- Flächenpressung
- Prüfung der Drehstuhlrollenbremse
- Fallprüfung
- Dynamische Prüfung nur für Möbel- und Drehstuhlrollen
- Dauerlaufprüfung
- Rollwiderstand unter Belastung
- Prüfung des Schwenkwiderstandes
- Stiftauszugprüfung

Alle diese Prüfungen sind sehr speziell auf Räder als fertige Produkte für den Einsatz in Transportgeräten, Apparaten, Möbeln oder Ähnlichem vorgesehen. Die einzige Prüfung, die sich dem Ziel der vorliegenden Arbeit nähert, ist die dynamische Prüfung. Hier soll ermittelt werden, inwieweit die Belastung eines Rades oder einer Rolle der Tragfähigkeit bei dynamischem Einsatz entspricht oder ob übermäßige Abnutzung oder anderer Schaden auftritt. Das zur Prüfung zu verwendende Gerät besitzt eine gerade oder kreisförmige Laufbahn mit einer glatten Stahloberfläche. Diese Laufbahn weist rechteckige Metallschwellen auf, die in einem Winkel von 45° zur Laufrichtung der Räder auf der Oberfläche befestigt sind. Zur Prüfung werden die Rollen mit der maximal zulässigen Belastung auf dieser Laufbahn verfahren. Gemessen wird die Anzahl der überfahrenen Schwellen und die erreichte Zahl der Umdrehungen, bis ein vorgegebener Zahlenwert erreicht ist. Da bei dieser Prüfung keinerlei Zwischenstoffe zulässig sind und statt dessen die Zahl der überfahrenen Schwellen ermittelt wird, ist es nicht sinnvoll, im Weiteren tiefer auf diese Prüfmethode einzugehen.

Die europäische Norm EN 12533 „Schwerlastrollen für eine Geschwindigkeit über 1,1 m/s (4 km/h) und bis zu 4,4 m/s (16 km/h)“ definiert neben den Abmessung solcher Rollen auch die Prüfungen, denen sie zu unterziehen sind. Die Prüfungen sind denen der Norm EN 12527 angepasst. Auch hier ist lediglich die dynamische Prüfung von Interesse. Da aber auch diese

Prüfung unter Ausschluss von Zwischenstoffen stattfindet, ist sie für diese Arbeit von keinem verwertbaren Interesse.

In der Deutschen Norm DIN 50282 „Das tribologische Verhalten von metallischen Gleitwerkstoffen“ wird auf die Begriffe, die zur Beschreibung in metallischen Gleitlagern Verwendung finden, eingegangen. Da prinzipbedingt auch bei Verschleißuntersuchungen von polymeren Radbandagen Gleitreibungsvorgänge auftreten, werden die Begriffe, die in der vorliegenden Arbeit aus der Norm übernommen werden, mit ihrer auf den geänderten Problemfall angepassten Bedeutung im Folgenden aufgelistet:

- **Mechanische Belastungsgrenze:** Maximal mögliche Belastung (Druckspannungsmittelwert in der Kontaktfläche zwischen Radbandage und Gegenfläche), bei der ein noch sicherer Lauf der polymeren Bandage gewährleistet ist, ohne dass unzulässige Verformungen auftreten oder die Erwärmung durch innere Reibung des Werkstoffes größer wird als die Wärme, die durch die Oberfläche abgegeben werden kann. Die mechanische Belastungsgrenze hängt im Wesentlichen von der Härte des Bandagenwerkstoffes ab.
- **Belastbarkeit:** Maximal mögliche Belastung, die eine Radbandage ertragen kann, ohne die mechanische Belastungsgrenze und einen vorgegebenen Verschleißbetrag zu überschreiten. Die Belastbarkeit wird durch die vorgegebene zu erwartende Gebrauchsdauer bestimmt.
- **Schmiegsamkeit:** Fähigkeit des Bandagenwerkstoffes, sich den Beanspruchungen ohne bleibende Störung der Form und des Haftungsverhaltens durch elastische oder elastisch-plastische Verformungen anzupassen.
- **Verschleißwiderstand:** Widerstand des Bandagenwerkstoffes gegen Verschleiß infolge der Bildung von adhäsiven Bindungen, tribologischen Beanspruchungen und abrasiver Einwirkung durch Zwischenstoffe.
- **Einbettfähigkeit:** Fähigkeit des Bandagenwerkstoffes, harte Partikel in die Laufschrift aufzunehmen.
- **Einlaufverhalten:** Fähigkeit des Bandagenwerkstoffes, den erhöhten Anfangsverschleiß durch Anpassung der Oberfläche infolge chemischer oder physikalischer Prozesse in kurzer Zeit herabzusetzen.

- **Notlaufverhalten:** Fähigkeit des Bandagenwerkstoffes, beim Auftreten unvorhergesehener ungünstiger Verschleißraten noch die Übertragung einer Tangentialkraft für eine begrenzte Zeitspanne aufrechtzuerhalten.

Die Deutsche Norm DIN 50320 „Verschleiß“ bietet eine Grundlage für eine in allen Bereichen der Technik anerkannte Terminologie. Zusätzlich wird das tribologische System als Basis für das Erkennen der Zusammenhänge bei Verschleißvorgängen dargelegt, und die auftretenden Beanspruchungen werden in Grundbeanspruchungsarten aufgeteilt. Der für die vorliegende Arbeit wesentliche Punkt ist die Definition von Verschleiß als das Auftreten von losgelösten kleinen Teilchen (Verschleißpartikel) sowie als Stoff- und Formänderung der tribologisch beanspruchten Oberflächenschicht. Im Weiteren werden die Begriffe in Konsens mit dieser Norm verwendet. Der Norm ist im Anhang ein Vordruck zur Beschreibung und Systemanalyse von Verschleißvorgängen beigelegt. Dieses Formular wird in angepasster Form zur Auswertung der durchgeführten Experimente eingesetzt und ist in dieser Form im Anhang abgebildet.

Aus der Deutschen Norm DIN 50321 „Verschleiß-Messgrößen“ werden die Methoden zur Messung des Verschleißes und die verwendeten Begriffe zur Beschreibung der Verschleißraten übernommen. Da die Norm eine Zusammenstellung der gebräuchlichsten Verschleiß-Messgrößen für betriebliche und labormäßige Verschleißprüfungen enthält, ist es zur Ermöglichung des Vergleiches der Messergebnisse mit anderen Untersuchungen unerlässlich, die Messgrößen konform zur Norm zu verwenden.

Die Deutsche Norm DIN 50322 „Kategorien der Verschleißprüfung“ zeigt Möglichkeiten und Grenzen unterschiedlicher Verschleißprüfverfahren auf. Hierzu wird eine Unterteilung in sechs Kategorien vorgenommen, die eine Abstufung der schrittweisen Reduktion der Nähe an den konkreten Einsatzfall darstellt. Da mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit eine Vorauswahl von Werkstoffen für definierte praktische Randbedingungen ermöglicht werden soll und als konkreter Einsatzfall die Anwendung im Stückguthandling zu betrachten ist, erfolgt eine Einteilung nach dieser Norm in Kategorie 5. In diesem Fall wird ein Bauteil (Reibrad) längs der Systemeinhüllenden „herausgeschnitten“ und zusätzlich noch vereinfacht (Schwungrad als Gegenfläche). Trotz der dadurch eingeschränkten Aussagefähigkeit ergibt sich jedoch der Vorteil, dass die Randbedingungen konstant gehalten und Parameterstudien gezielt durchgeführt werden können. Darüber hinaus ergibt sich der Vorteil, dass die Ergebnisse auch für leicht abweichende Einsatzfälle eine Aussagefähigkeit behalten.

In der Deutschen Norm DIN 50323-2 „Tribologie, Teil 2: Begriffe“ werden die zur Beschreibung von Verschleißvorgängen gebräuchlichen Begriffe erläutert. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Begriffe entsprechen in ihrer Bedeutung dieser Norm.

In Teil 3 der Deutschen Norm DIN 50323-3 „Tribologie - Begriffe, Arten, Zustände, Kenngrößen“ werden neben weiteren Begriffen vor allem Kenngrößen zur Beschreibung des Verschleißes erläutert. Auch die Verwendung dieser Kenngrößen wird der Norm entnommen.

Die Deutsche Norm DIN 50324 „Prüfung von Reibung und Verschleiß“ behandelt die genaue Durchführung von Versuchen zur Ermittlung von Verschleiß. Hierzu werden Prüfgeräte, Probenkörper und die Durchführung sowie Auswertung von Versuchen definiert. Da in der Norm ausschließlich die Beanspruchung durch Gleiten betrachtet wird und darüber hinaus nur metallische Gleitpartner betrachtet werden, ist der Einfluss der Norm auf die vorliegende Arbeit entsprechend gering.

Die Deutsche Norm DIN 53516 „Bestimmung des Abriebs“ beschreibt ein Prüfverfahren, in dem ein Elastomerprobenkörper definierter Abmessungen gegen eine mit einem Prüfschmiergelbogen versehene Walze gedrückt wird. Gemessen wird der Abrieb in Volumeneinheiten nach einer festgelegten Prüfzeit. Da nach DIN 50320 der sogenannte „Furchungverschleiß“ nachgebildet wird, wird diesem Verfahren keine weitere Beachtung geschenkt.

In der Deutschen Norm DIN 53531 Teil 1 und 2 „Prüfung von Kautschuk und Elastomeren“ wird lediglich ein Verfahren zur Kontrolle von durch Vulkanisation oder Verkleben hergestellten Elastomer-Träger-Bindungen beschrieben. Obwohl die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Probekörper eine ähnliche Bindungsstelle zwischen Radkörper und Bandage aufweisen, ist es nicht Ziel der Untersuchungen, diese Verbindung zu untersuchen. Aus diesem Grund spielt diese Norm für die Ergebnisse der Arbeit keine Rolle.

2.2 Theoretische Untersuchungen zum elastischen Wälzen

Theoretische Untersuchungen des viskoelastischen Normalkontaktproblems unter Berücksichtigung der Reibung wurden bereits in umfangreichem Maße durchgeführt. An erster Stelle sind die Arbeiten von *H. Hertz* [her1882] zu nennen, die sich allerdings nur mit der Betrachtung elastischer Körper befassen. Aus neuerer Zeit interessant sind insbesondere die Arbeiten von *Severin* (Professor der technischen Universität Berlin), der sich schon seit vielen Jahren mit dem Problem von viskoelastischen Rollvorgängen beschäftigt, sowie die Arbeiten *G. Wang* und *K. Knothe*, deren wesentliche Ergebnisse im Folgenden erläutert werden. Schwierigkeiten bei der theoretischen Behandlung des viskoelastischen Rollvorganges bereitet die Beschreibung des Spannungsverlaufes unterhalb der Oberfläche des viskoelastischen Körpers. Dies wird erschwert durch die Berücksichtigung der inneren Reibung und daraus resultierende inhomogene Erwärmung des Materials.

Ansätze für numerische Methoden zur Ermittlung und Berechnung des Spannungsverlaufes unterhalb der Oberfläche der elastomeren Bandage werden von *D. Severin* und *L. Qiao* [sev96] entwickelt. Hier wird die auftretende Spannung und Belastung in Abhängigkeit von

der Temperatur, Lastwechselfrequenz und Belastungshöhe berechnet. Das Ergebnis stellt ein Auslegungswerkzeug für Kunststoffräder hinsichtlich der Belastung dar. Diese Methode stellt eine Weiterentwicklung der Finite-Element-Methode dar, wie sie in [sev93] bereits 1993 vorgestellt worden ist. Hier wurden jedoch noch dynamische Kräfte, Kontaktreibungskräfte und Temperatureinflüsse vernachlässigt.

Auch in [sev94] wird ein numerisches Modell zur Spannungsberechnung vorgestellt. Bei der sogenannten „Quasi-elastischen Methode“ wird versucht, die Eigenschaften des viskoelastischen Materials durch Einführung eines sogenannten 3-Parameter-Modells (Poynting-Modell) anzunähern. Hierbei wird eine mit einem Dämpfer parallel geschaltete Feder in Reihe zu einer zweiten Feder gestellt. Die Schwingungseigenschaften dieses Modells dienen dann zur Beschreibung des polymeren Werkstoffes. Ausgehend von diesem Modell wird dann ein Verfahren zur Berechnung des Beanspruchungsverlaufes hergeleitet. Eine Besonderheit der Untersuchung ist, dass ausschließlich der Leerlauf betrachtet wird, also keine Tangentialkraft übertragen werden muss. Dies führt zu einem Schlupfverhalten, das lediglich aus dem Deformationschlupf resultiert und wesentlich geringer ausfällt, als dies bei Tangentialkraftübertragung der Fall ist. Im Wesentlichen wird in [sev94] eine Weiterentwicklung der bereits 1989 in [kno89] vorgestellten Theorie durchgeführt. Bereits hier wird als Ursache für die Energieverluste der viskoelastische Effekt genannt. Weiterhin wird aber auf die *Coulombsche* Trockenreibung als weiteren Grund für den Energieverlust eingegangen und ein Modell und Programm zur Ermittlung der Normalspannungsverteilung in der Kontaktfläche vorgestellt. Ebenso wird auch in [his92] diese Problematik behandelt. Hier liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen in der Betrachtung des zweidimensionalen, stationären Kontaktproblems mit *Coulombscher* Trockenreibung, um den Einfluss der Bandagendicke auf die Spannungsverteilung in der Kontaktfläche bei Rädern mit viskoelastischen Bandagen zu ermitteln. Dabei wird angestrebt, die 2- und 3-dimensionalen Vorgänge der Kontaktmechanik durch eindimensionale Beziehungen für den Kontaktpunkt zu ersetzen.

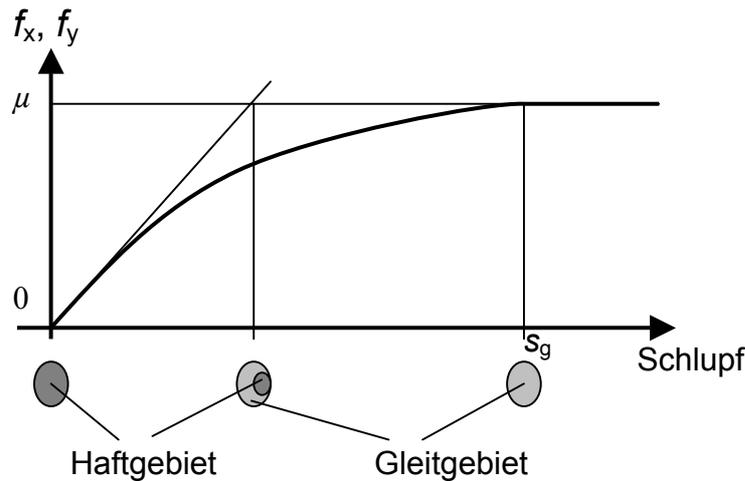
Unterschiedliche Methoden zur Ermittlung der Kontaktflächengröße und der in der Kontaktfläche auftretenden Spannungen werden im ersten Teil von [sev89b] vorgestellt. Diese sind im Einzelnen die Theorien von Hertz, Bufler, Carter u. Fromm, Haines u. Ollerton, Vermeulen u. Johnson sowie die vereinfachte, nichtlineare Theorie von Kalker.

Eine weitere numerische Methode zur Ermittlung der Spannungsverteilung in der Kontaktfläche zwischen zwei Zylindern wird in [wan93] vorgestellt. Angewendet wird die sogenannte Boundary-Element-Methode unter Berücksichtigung der viskoelastischen Materialeigenschaften und der *Coulombschen* Trockenreibung. Die Ergebnisse enthalten neben der Spannungsverteilung in der Kontaktzone auch die Spannungen im viskoelastischen Körper und den Rollwiderstand.

Es existieren noch weitere Untersuchungen, die sich mit der Entwicklung von numerischen Methoden zur Berechnung der Kenngrößen in der Kontaktfläche und der Spannungsverteilung und des Temperaturverlaufes in der Elastomerbandage beschäftigen [qia97], [kra70], [wan91], [wan88]. Zum Teil werden auch dreidimensionale Rechenmodelle zur Berücksichtigung der ungleichen Spannungs- und Temperaturverteilungen auf der gesamten Radbreite entwickelt, das Verschleißverhalten bleibt jedoch in all diesen Arbeiten unberücksichtigt.

Aufgrund des viskoelastischen Verhaltens von Polymeren, das zu einer Zeitabhängigkeit in der Spannungs- / Dehnungskurve führt, wird in nahezu allen bisher genannten Literaturstellen der sogenannte Quasi-Elastizitätsmodul E^n eingeführt. Mit Hilfe dieser Größe wird die Belastungsfrequenz- und Temperaturabhängigkeit des Werkstoffverhaltens berücksichtigt. Grund ist, dass der E-Modul sowohl von der Dauer der Krafteinwirkung und der Geschwindigkeit der Verformung als auch von der Temperatur abhängig ist. Mit dem Quasi-Elastizitätsmodul oder auch Viskoelastizitätsmodul kann sowohl das elastische als auch das viskoelastische Materialverhalten berücksichtigt werden.

Die qualitativen Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen deuten alle in die gleiche Richtung, dennoch sind Literaturstellen, die das Problem des Verschleißes auf theoretischer Ebene betrachten, aufgrund der komplexen Vorgänge im Werkstoff nicht zu finden. Als wesentliches Ergebnis des Literaturstudiums der theoretischen Untersuchungen ist festzuhalten, dass die Oberflächenreibung beim Abwälzen eines Zylinders mit Polymerbandage auf einem Metallzylinder aus zwei Komponenten besteht. Die erste Komponente resultiert aus der sogenannten Verformungsreibung, die sich aus der relativ geringen Steifigkeit der Polymerbandage im Vergleich zum Metallzylinder ergibt, während die zweite Komponente nur bei der Übertragung eines Drehmomentes und damit einer Tangentialkraft in der Kontaktfläche auftritt. Dies führt zu einer Unterteilung der Kontaktfläche in eine Haftzone und in eine Gleitzzone. Die zur Beschreibung der Kraftübertragungsverhältnisse gebräuchliche Form ist die Darstellung in einer sogenannten Kraftschluss-Schlupf-Kurve (**Abb.: 2.1**).



- f_x, f_y – Kraftschlussfunktion in x bzw. y Richtung (parallel zur Oberfläche)
 μ – Gleitreibungsbeiwert
 s_g – Grenzschlupf

Abb. 2.1: Kraftschluss-Schlupf-Beziehung (schematisch)

Die Kraftschlussfunktion f wird dabei als tangentialer Kraftschluss bezeichnet und stellt das Verhältnis von Antriebskraft zur Normalkraft dar. In **Abb. 7.2** wird die Zunahme des Schlupfes bei steigender Tangentialkraft und konstanter Normalkraft dargestellt. Dabei teilt sich die Kontaktfläche in eine Zone reinen Gleitens und in eine Zone reinen Haftens auf, wobei der Kraftschluss zunächst nahezu proportional zum Schlupf zunimmt. Bei steigendem Schlupf wächst die Gleitzone in der Kontaktfläche, bis sich der tangentialer Kraftschluss asymptotisch der Gleitreibungszahl μ annähert und die maximal übertragbare Tangentialkraft F_{Tmax} erreicht ist. Ab dem Grenzschlupf s_g tritt vollkommenes Gleiten ein. Für die maximal übertragbare Tangentialkraft gilt:

$$F_{Tmax} = \mu F_Z \quad (2.1)$$

2.3 Grundlagen zum Verschleiß polymerer Werkstoffe

Zahlreiche Arbeiten beschäftigen sich mit dem Verschleißverhalten metallischer Werkstoffe. Zu nennen sind hier die Arbeiten [kra83], [mus94], [pig85] und [kra85], in denen auf die physikalischen, mechanischen und chemischen Grundmechanismen, die in der Kontaktfläche auftreten, eingegangen wird. Da sich diese Mechanismen jedoch grundlegend verändern, wenn einer der Reibungspartner eine um Größenordnungen geringere Steifigkeit besitzt als der Andere, sind die entwickelten Theorien nur sehr eingeschränkt auf das vorliegende Problem anwendbar.

Arbeiten, die dagegen das Verschleißverhalten polymerer Werkstoffe betrachten, ist gemein, dass sie den sogenannten Gleitreibungsverschleiß untersuchen. Da die Mechanismen, die den

Gleitverschleiß verursachen, nach [kra83] einen adhäsiven und einen abrasiven Anteil besitzen, ist diese Betrachtungsweise auch für die vorliegende Arbeit sinnvoll, denn die Untersuchungen des viskoelastischen Normalkontaktproblems haben gezeigt, dass in der Kontaktzone mit Auftreten einer Tangentialkraft auch ein Gleitgebiet vorhanden ist. Dennoch müssen auch diese Untersuchungen unterteilt werden in solche, die das Verschleißverhalten von Polymeren als Gleitlagerwerkstoff untersuchen, und solche, die den trockenen Gleitverschleiß von Polymeren betrachten. Dem Einsatz als Gleitlagerwerkstoff liegen vollkommen andere Bedingungen zugrunde. So wird hier meist nur ein dünner Film eines polymeren Werkstoffes als Verschleißschicht auf einen Metallgrundkörper aufgetragen. Darüber hinaus wird zumeist noch Öl als Schmierfilm eingesetzt der die Reibpartner voneinander trennt.

Als Arbeiten, die sich mit dem trockenen Gleitverschleiß von Polymeren befassen, sind zu nennen [sch83], [wie85], [ehr80], [uet84] und [heu97]. Arbeiten, die sich grundlegend mit dem Wälzverschleiß, bei dem Roll- und Gleitreibung überlagert sind, unter Berücksichtigung des Einflusses von abrasiven Zwischenstoffen beschäftigen, konnten nicht gefunden werden.

2.4 Experimentelle Untersuchungen von Rädern und Rollen aus Kunststoff

Aus den theoretischen Untersuchungen des viskoelastischen Normalkontaktproblems geht hervor, dass die maximale Belastung von polymeren Beschichtungen von Wälzkörpern nicht an der Oberfläche, sondern darunter im Innern des Werkstoffes auftritt. Dieses Verhalten führt bei Überlastung dazu, dass sich die Lauffläche ablöst. Eine weitere Eigenheit von polymeren Rollenwerkstoffen ist das Fließen und damit eine Formänderung nach längerer statischer Belastung. Diese viskose Eigenschaft des Werkstoffes hat zur Folge, dass sich nach längerem Stillstand unter Belastung eines Rades ein erhöhter Anfahrwiderstand ergibt. Diese Besonderheiten von polymeren Rollenwerkstoffen wurden in zahlreichen Untersuchungen experimentell analysiert.

Severin und *Kühlken* befassen sich in [sev91] ausschließlich mit der Erwärmung von nicht angetriebenen Kunststoffrollen aufgrund der inneren Reibung sowie der Ermittlung der Rollreibung in Abhängigkeit der Normalkraft und leiten daraus Dimensionierungsverfahren ab. In Teil 2 wird auf die Abplattung der Kontaktfläche infolge Fließens nach längerem Stillstand und die daraus resultierende erhöhte Anfahrkraft hingewiesen. Berücksichtigt werden unterschiedliche Werkstoffe, Radabmessungen und Stillstandzeiten. Weiterhin wird in Teil 2 versucht, Anwaltswerte für die Zeitfestigkeit von Polyamidrädern anzugeben, die in Form von Wöhlerkurven dargestellt werden.

M. Hager und *F. Will* beschreiben in [hag97a] und [hag97b] die Entwicklung und den Aufbau einer Versuchsanlage für Kunststoffräder. Die Räder sind ebenso wie bei [sev91] nicht angetrieben. Gemessen wird der Fahrwiderstand in Abhängigkeit vom Anpressdruck und der Roll-

geschwindigkeit. Interessant ist auch hier der Aspekt des erhöhten Anfahrwiderstandes nach längerem Stillstand.

[sev89b] vergleichen in Teil 2 experimentell ermittelte Werte für den Schlupf mit den in Teil 1 (siehe Kap. 2.2) vorgestellten Theorien. Hierzu wird ein Prüfstand verwendet, in dem das Prüfrad auf einem Stahlgegenrad abwält. Zur Ermittlung der Kraftschluss-Schlupf-Beziehungen können mit diesem Prüfstand Tangentialkräfte in der Kontaktzone erzeugt werden. Es wird auf den Einfluss von Rollgeschwindigkeit, Normalkraft, Raddurchmesser und Kontaktflächenform auf die Kraftschluss-Schlupffunktion eingegangen.

[sev85] beschreibt die experimentelle Untersuchung der Rollreibungskoeffizienten von zylindrischen Rädern aus Kunststoffen. Die Ergebnisse werden verglichen mit Berechnungen auf Grundlage von Formeln, die zum Teil selbst entwickelt wurden oder von *Erhard* und *Strickle* [ehr74] vorgestellt worden sind. Es handelt sich hierbei um analytische Berechnungsformeln, deren Ergebnis ist, dass die Annahmen in [ehr74] nicht zutreffend sind. Berücksichtigte Einflussparameter sind: Normalkraft, Rollgeschwindigkeit, Radabmessungen und Radkörpertemperatur.

In [sev86] behandeln die Autoren den bei Wälzpaarungen mit Partnern unterschiedlicher Steifigkeit auftretenden Schlupf, insbesondere den Tangentialschlupf, und vergleichen experimentelle mit rechnerischen Ergebnissen für die Werkstoffe PA66, POM, TPU und PUR. Besonders wird auf den Zusammenhang zwischen Leerlaufschlupf, der aus der Verformung entsteht, Tangentialkraft und Bandagenabplattung eingegangen.

Grundlegende Betrachtungen des Verhältnisses zwischen den viskoelastischen Eigenschaften von Gummi und dem Reibungsverhalten untersucht *K. A. Grosch* in seiner Arbeit von 1962 [gro63]. In Experimenten werden zwei Probenkörper mit flacher Oberfläche gegeneinander gedrückt und anschließend eine Tangentialkraft aufgebracht, bis eine Relativbewegung einsetzt. Einer der Probenkörper besteht aus Gummi, während das Material des Gegenkörpers variiert. Untersucht werden Sandpapier (Silikon-Karbid, Korngröße ca. 0,1 mm), leicht gewelltes Glas und nochmal das Sandpapier mit Magnesiumpulver als Zwischenstoff. Berücksichtigt wird ausschließlich das Reibungsverhalten bei unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten, es wird also keine Aussage über das Wälzverhalten oder das Verschleißverhalten unter Wälzbeanspruchung getroffen. *Grosch* kommt als erster zu dem Ergebnis, dass neben der mechanischen Verzahnung der Oberflächen ein adhäsiver Anteil die Reibung wesentlich beeinflusst.

[möh95] untersucht die Spannungsverläufe in zylindrischen Rädern mit einer dickwandigen Bandage auf einem Stahlkern, die auf einer Fahrbahn aus Stahl abwälzen. Betrachtet werden sowohl die Spannungsverläufe bei getriebenem als auch bei treibendem Rad. Der Autor vergleicht theoretisch ermittelte Werte mit den experimentell gemessenen Werten der Spannungen im Radkörper. Betrachtet werden Stahlräder mit einer Kunststoffbandage aus PUR, die

gegen eine Stahlfläche laufen. Zur experimentellen Ermittlung der Kontaktgrößen zwischen PUR-Rad und Stahlfahrbahn wird ein Messsystem vorgestellt, das die Messung der Druck- und Schubkraftverteilung während des Rollvorganges über die Berührungsflächenlänge und über die Reifenbreite ermöglicht. Verschleißfaktoren und -vorgänge werden nicht betrachtet.

Eine weitere Arbeit, die sich sehr ausführlich mit den Problemen der Radkörpererwärmung und der Abplattung der Lauffläche durch Fließvorgänge beschäftigt, ist mit [küh90] anzugeben. Diese Arbeit ist identisch mit [sev89a]. Inhalt der Arbeit ist neben der Zusammenfassung und dem Vergleich ähnlicher früherer Untersuchungen die Vorstellung eines Versuchsaufbaus, mit dessen Hilfe das mechanische und thermische Verhalten von Kunststoffrädern untersucht wird.

Weitere Arbeiten, die sich mit der Untersuchung des Schlupf- und Wälzverhaltens, der Ermittlung von Kennwerten polymerer Werkstoffe und den Kraft- und Bewegungsgrößen in der Kontaktfläche beschäftigen, sind [möh93], [ham97], [lüt84] und [str75].

Arbeiten, die das tribologische Verhalten von polymeren Werkstoffen experimentell untersuchen sind [czi82] und [zga90]. Jedoch wird hier in Anlehnung an die in Kap. 2.1 genannten Normen nur der Gleitverschleiß betrachtet.

Einen guten Überblick über die Forschungsergebnisse der letzten 10 Jahre bietet die Arbeit [sev99c] von 1999. Hier wird nochmals zusammenfassend die Ermittlung der Spannungsverteilung in der Kontaktzone zwischen Rad und Schiene, im Radkörper und in der Verbindungsstelle zwischen Nabe und Bandage dargestellt.

Es bleibt als Ergebnis der Sichtung der Literatur, dass nahezu alle Autoren, die sich mit der experimentellen Untersuchung von polymeren Radkörpern beschäftigen, sich auf die Probleme, die aus der inneren Reibung des Werkstoffes resultieren, und auf die Problematik des viskosen Fließens unter längerer statischer Belastung beschränken. Autoren, die den Verschleiß von polymeren Werkstoffen untersuchen, tun dies in Anlehnung an die erläuterten Normen und untersuchen somit nur den Gleitverschleiß ohne Überlagerung einer Wälzbewegung. Es fand sich auch unter den experimentellen Untersuchungen keine, die den Verschleiß von Radbandagen unter Einwirkung einer Tangentialkraft und Vorhandensein eines Zwischenstoffes grundlegend behandelt.

2.5 Vergleich mit anderen Beanspruchungsarten

Der Einsatz von polymerbeschichteten Reibrädern als Antrieb in Fördereinrichtungen weist auf den ersten Blick gewisse Parallelitäten gegenüber dem Einsatz von Gummi zur Herstellung von KFZ-Reifen und der damit verbundenen Beanspruchung auf. Ob das wirklich so ist, ist zu bezweifeln, vielmehr bestehen elementare Unterschiede:

- Fahrbahn ist aus Asphalt
- Reifen sind luftgefüllt (Einfluss auf Spannungsverteilung und innere Erwärmung)
- Reifen sind profiliert
- Umgebungsbedingungen sind vollständig anders (Zwischenstoffe, Temperatur)
- Übertragung von Seitenkräften
- Aufbau der Reifenkarkasse mit Textil- und Metallgeweben
- vergleichsweise hohe Winkelgeschwindigkeiten

Aus diesem Grund wird dieser spezielle Einsatzfall von angetriebenen und mit polymeren Laufflächen versehenen Rädern nicht weiter betrachtet. Dies gilt ebenfalls für den speziellen Fall von Kraffrädern, bei denen die Kraft auf das angetriebene Rad mittels eines Reibrades übertragen wird (z. B. Velo Solex). Hier ist der Kraftfluss umgekehrt von einem metallischem Reibrad mit kleinem Durchmesser auf einen luftgefüllten Gummireifen mit großem Durchmesser, was die Spannungsverteilung zusätzlich stark beeinflusst. Da darüber hinaus das Reibrad nicht glatt ist, sondern mit einer rauhen Oberflächenbeschichtung versehen ist, ist auch die Kraftschluss-Schlupffunktion unterschiedlich. Literatur, die die Problematik luftgefüllter Kraftfahrzeugreifen behandelt, ist in [bac98], [bre96], [bre98] und [gro89] gegeben.

Weiterhin bestehen KFZ-Reifen zu einem erheblichen Teil aus natürlichen und künstlichen Kautschuken. Die speziellen viskoelastischen Eigenschaften von Kautschuken, ihr Temperaturverhalten sowie ihren Einfluss auf das Verhalten und den Rollwiderstand von KFZ-Reifen behandelt *K. A. Grosch* in seiner Arbeit von 1989 [gro89].

Ein weiteres großes Einsatzfeld von hochbelasteten Rollen sind Laufrad-Schiene-Systeme, in denen beide Wälzkontaktpartner aus metallischen Werkstoffen bestehen. Naheliegender ist der Vergleich mit dem Einsatz an Eisenbahn-Radsätzen. Autoren, die sich mit der Untersuchung metallischer Wälzpaarungen befassen, sind dieselben, wie sie in der Aufzählung der theoretischen Untersuchung genannt wurden. Weiterhin existiert eine Dissertation, die das Problem Laufrad-Schiene explizit behandelt [hes83].

Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Reifen, Stahlrad und Kunststoffrad werden in [böh98] in Kapitel 2 erläutert und im Folgenden aufgelistet:

- Gemeinsamkeiten:
- Unterscheidung der Verformungszustände in globale und lokale (auf den Kontaktbereich beschränkte) Deformationen
 - Modellierungsbedingungen zur analytischen oder numerischen Berechnung
- Unterschiede:
- Druckverteilung in der Kontaktzone unterscheiden massive Zylinder und Luftreifen
 - Reibkennlinien (zur Berechnung der Reibkräfte im Gleitbereich) unterscheiden Polymere und Metalle

- Ertragbarkeit der elastischen Verzerrung (Polymere hoch, Metalle niedrig)
- elastische Eigenschaften (z. B. viskoelastisches Fließen)
- Einfluss der Randbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit
- Höhe der maximalen Flächenpressung, Steifigkeit
- Materialdämpfung, Rollwiderstand
- Abfederungsfähigkeit von Fahrbahnunebenheiten
- Abrollgeschwindigkeiten
- Dichte der Materialien und Masse der Radreifen

Es fällt auf, dass neben einer qualitativen Ähnlichkeit in den Verformungszuständen der unterschiedlichen Werkstoffe für Radreifen nur die Modellierungsbedingungen zur Ermittlung einer Berechnungsmöglichkeit für den Spannungsverlauf als Gemeinsamkeiten genannt sind. Die Unterschiede für die drei Arten von Radreifen überwiegen deutlich. Aus diesem Grund ist eine Übertragung von Ergebnissen aus Untersuchungen von KFZ-Reifen oder Laufrad-Schiene-Systemen mit metallischen Wälzpartnern auf das Problem des Verschleißverhaltens von Rädern mit polymeren Bandagen nicht möglich.

2.6 Spezielle Untersuchungen schlupfbehafteter Antriebe im Lagerwesen

Es existiert eine geringe Anzahl von Untersuchungen, in denen der Einsatz von polymeren Werkstoffen für Antriebsräder in Handlingsystemen für spezielle Einsatzfälle betrachtet wird.

In [gri64] geht der Autor auf die Ermittlung des Reibungsbeiwertes zwischen Trommel und Gurt einer Bandförderanlage ein. Er berücksichtigt bei seinen Untersuchungen den Einfluss der Werkstoffpaarung und deren Oberflächenbeschaffenheit, die Flächenpressung zwischen Trommel und Gurt sowie die Relativgeschwindigkeit der beiden Reibungspartner. Insbesondere der Einfluss von Zwischenstoffen zwischen Trommel und Gurt wird vernachlässigt. Im allgemeinen Teil wird neben den Grundlagen der trockenen Reibung das Reibungsverhalten von Gummi erläutert. Zur Messung der wirklichen Kontaktfläche wird die Ermittlung des elektrischen Widerstandes herangezogen, da die theoretischen numerischen Verfahren, wie sie oben beschrieben worden sind, zum Zeitpunkt dieser Untersuchung (1963) noch nicht bekannt waren. Im experimentellen Teil wird ein Versuchsaufbau beschrieben, mit dessen Hilfe die Reibungs- und Kraftübertragungsverhältnisse zwischen Gurt und Antriebstrommel untersucht werden können. Wesentliches Ergebnis der Untersuchungen ist, dass der Reibungsbeiwert von der Härte der Gurtlaufplatten abhängt. Weiterhin wurde eine Abhängigkeit vom Alter der Platten ermittelt, was durch die erhöhte Oberflächenrauigkeit neuer Platten und die mit zunehmendem Alter steigende Härte erklärt wird. Darüber hinaus ergibt sich aus einigen Diagrammen, dass der Reibungsbeiwert mit steigender Gleitgeschwindigkeit bis zu einer Grenz-

geschwindigkeit zunimmt. Für diese Beziehung wird eine Formel hergeleitet, in der die Abhängigkeit von Flächenpressung und Gleitgeschwindigkeit dargestellt wird:

$$\mu = \mu_{01} \cdot \frac{1 + a_0 w^{0,4}}{p^{0,167}} \quad (2.2)$$

Hierbei ist μ_{01} ein gemessener Reibungsbeiwert für eine Flächenpressung von $p = 1 \text{ kp/cm}^2$. Der Wert a_0 ist ein dimensionsbehafteter Gleitgeschwindigkeitsfaktor, der abhängig von den Gurtabmessungen ist, und w steht für die Gleitgeschwindigkeit.

Ebenso wie in [gri64] untersucht der Autor von [zed87] das Verhalten von Bandförderanlagen. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die Trommel eine Beschichtung aus Polymeren hat und nicht wie in [gri64] eine blanke, gedrehte Metalloberfläche. Diese polymere Beschichtung wird hinsichtlich des Kraftverlaufes im Belag, der Temperaturentwicklung und des Verschleißes untersucht. Zu diesem Zweck werden Versuchsstände entwickelt und Messungen an Förderanlagen des Braunkohletagebaus durchgeführt. Ziel der Arbeit von *Zeddies* ist im Einzelnen die Optimierung des Belagmaterials hinsichtlich Abrieb und Haftung sowie die Verringerung der Belagsbeanspruchung durch Optimierung der Betriebsumstände der Trommel (mech. Belastung, Verschmutzung etc.).

Da Bandförderanlagen in vielen Transportsystemen Verwendung finden, existieren zu dieser Thematik noch weitere Untersuchungen, auf die nicht im Einzelnen eingegangen wird. Diese sind [bra86], [gri66], [hoh77], [hoh75], [jos83], [wol89] und [zep83].

Einer der wesentlichen Unterschiede in den Untersuchungen von Bandförderanlagen besteht in dem großen Umschlingungswinkel des Gurtes auf der Trommel. Daraus resultieren wesentlich geringere Flächenpressungen und in Abhängigkeit vom Gurtmaterial auch geringere Schubspannungen. Weiterhin unterscheidet sich der Einsatz von Polymerbeschichtungen als Trommelbelag in Gurtförderanlagen durch die vorhandene Reibpaarung, die hier durch zwei u. U. unterschiedliche Polymere gestellt wird, von dem Einsatz in anderen Handlingsystemen. Darüber hinaus sind die Beanspruchungen, die sich aus dem Einfluss von Zwischenstoffen ergeben, bei Bandförderanlagen ebenfalls andere. So ist eine Trommel in solchen Anlagen meist mit horizontaler Drehachse eingebaut. Dies und die sich aus dem größeren Umschlingungswinkel ergebende wesentlich vergrößerte Kontaktzone beeinflussen nachhaltig das Anhaftungsverhalten von festen Zwischenstoffen an der Trommel. So kann sich ein vollständig anderes Verschleißverhalten einstellen, da sich auf diese Weise eine schützende Schicht am Umfang der Trommel bilden kann, die den Verschleiß und die Reibung wesentlich beeinflusst.

In [spi83] werden insbesondere reibschlüssige Antriebe in Druckwerken untersucht. Die Besonderheit von Antrieben in Druckwerken ist die von ihnen geforderte Genauigkeit, da schon der kleinste Winkelfehler als Druckunschärfe auffällt. Aus diesem Grund wird in Druckma-

schinen für den Antrieb ein formschlüssiges Getriebe gewählt. Der reibschlüssige Anteil in den Antrieben ergibt sich durch das Abwälzen der meist gummibeschichteten Druckwalzen aufeinander. Da durch das formschlüssige Getriebe jedoch die Bewegung aufgezwungen wird, resultiert das Schlupfverhalten zwischen den Walzen ausschließlich aus Deformationen und ist unabhängig von der Kraftübertragungsfunktion. Vielmehr ergibt sich aus dem Reibungsbeiwert eine Kraft, die in der Lagerung der Walzen aufgefangen werden muss. Es handelt sich in Druckwerken also um ein ein- oder mehrfach überbestimmtes Antriebssystem. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ein Versuchsaufbau beschrieben, mit dem es möglich ist, dieses überbestimmte Antriebssystem nachzubilden und die relevanten Größen wie Momente, Kräfte, Abstände, Drehzahlen, Übersetzungen und Schwingungen in Abhängigkeit von Gummiart, Radiendifferenz, Vorspannung und Zwischenmedium (Öle, Farbe, Wasser) zu ermitteln. Wichtigstes Ergebnis der Untersuchungen ist die Bedeutung der sogenannten Schmitzringe auf das Antriebs- und Schwingungsverhalten von Offsetrotationsdruckmaschinen. Diese Schmitzringe haben die Aufgabe, als ausgleichendes Reibgetriebe das Zusammenspiel zwischen gummibeschichteter Druckwalze und Zahnradgetriebe zu beeinflussen. Allgemeingültige Aussagen über das Verhalten von Polymeren in Reibpaarungen werden nicht getroffen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse dieser Arbeit keine Aussagekraft für den vorliegenden Einsatzfall haben werden, da die Beanspruchungen von mit Polymeren beschichteten Rädern in Handlingsystemen sich grundlegend von dem Einsatz in Druckwerken unterscheiden.

2.7 Ergebnisse aus der Literaturrecherche

Als wesentliches Ergebnis der Literaturrecherche ergibt sich, dass die Untersuchungen des viskoelastischen Rollkontaktproblems hinsichtlich der Dimensionierung von und der auftretenden Belastungen in polymerbeschichteten Rädern sowohl in theoretischer als auch experimenteller Hinsicht als umfassend betrachtet werden können. Es ist also nicht erforderlich und nicht das Ziel der Arbeit, die Problematik der belastungsgerechten Dimensionierung zu vertiefen.

Weiterhin sind in Kap. 2.6 Untersuchungen genannt, die sich mit dem Einsatz beschichteter Räder und Rollen in speziellen Anwendungsgebieten befassen. Diese Arbeiten behandeln das Gebiet des Verschleißes jedoch entweder nur unzureichend oder sind so speziell auf den jeweiligen Einsatzfall ausgerichtet, dass die Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf andere Anwendungen übertragen werden können.

Es ergibt sich, dass das Verschleißverhalten von polymerbeschichteten Schwerlastträgern im Einsatz in Handlingsystemen insbesondere unter Einwirkung von Zwischenstoffen in der Kontaktfläche zur Fahrbahn bisher nicht oder nur unzureichend geklärt ist. Es ist somit erforderlich, hier den Kenntnisstand zu erweitern. Das Auftreten von Zwischenstoffen in Hand-

lingsystemen geht meistens von Verunreinigungen oder vom Transportgut selber aus. Im Fall, dass das Transportgut selber den Zwischenstoff darstellt, handelt es sich meist um Schüttgüter, siehe auch [gri64], [wol89], [zed87]. Da in dieser Arbeit jedoch der Einsatz von Schwerlastträdern mit Polymerbandagen untersucht werden soll, sind der Einsatzfall und damit die Beanspruchung anders als in diesen Arbeiten. Darüber hinaus sollen als Zwischenstoffe nur solche berücksichtigt werden, die in Stückgut-Handling-Systemen tatsächlich als Verunreinigung zu erwarten sind. Eine genauere Auswahl der Zwischenstoffe findet in Kapitel 4 statt.

3 Ziel der Arbeit und Vorgehensweise

3.1 Ziel- und Aufgabenstellung

Kunststoffbeschichtete oder vollständig aus Polymeren hergestellte Räder und Rollen finden in zahlreichen mechanischen Handlingsystemen ihre Anwendung und sind aus dem täglichen Gebrauch nicht mehr wegzudenken. Die Anwendungsmöglichkeiten sind dabei ebenso komplex, wie die Bauformen und Materialarten der Räder. Das wesentlichste Unterscheidungsmerkmal ist die Trennung in angetriebene und nicht angetriebene Räder und Rollen. Hierbei ist anzumerken, dass an angetriebene und nicht angetriebene Rollen grundsätzlich unterschiedliche Anforderungen gestellt werden. Stehen bei nicht angetriebenen Rollen, vergleichbar zu Gleitlagerwerkstoffen, die Festigkeit, Verschleißbeständigkeit und Reibungsarmut im Vordergrund, so ist bei angetriebenen Rädern meist eine Optimierung hinsichtlich ihres Haftungs- und Schlupfverhaltens angestrebt, was meist einen Kompromiss hinsichtlich Festigkeit, Reibung und Verschleißverhalten erforderlich macht. Daher und aufgrund ihrer besonderen mechanischen Eigenschaften finden für den Einsatz in angetriebenen Rädern Bandagen aus Polyurethanen die weiteste Verbreitung.

Das Literaturstudium hat gezeigt, dass wegen ihrer Bedeutung in der Fördertechnik bereits zahlreiche Untersuchungen von mit Polymeren beschichteten Rädern und Rollen existieren. Während in vielen Arbeiten das Problem des Abrollens zweier viskoelastischer Körper theoretisch betrachtet wird, behandeln andere Untersuchungen meist experimentell oder empirisch das Verhalten sowohl von nicht angetriebenen als auch von angetriebenen Rollen. Es wird also im Weiteren davon ausgegangen, dass das Problem der belastungsgerechten Auslegung von polymeren Rädern und Rollen weitestgehend gelöst ist.

Eine weitere große Anzahl von Untersuchungen befasst sich mit dem sehr speziellen Gebiet von Fahrzeugreifen und ihrem Verhalten auf der Fahrbahn. In Kapitel 2.5 wurden die Gründe genannt, die gegen einen direkten Vergleich dieses Einsatzfalles mit dem Einsatz von Rollen aus Polymerwerkstoffen in Handlingsystemen sprechen.

Da keine oder von den Randbedingungen nur unzureichend vergleichbare Untersuchungen existieren, die das Verschleißverhalten von Rädern aus Polymerwerkstoffen behandeln, soll es das Ziel dieser Arbeit sein, auf experimenteller Ebene eine Grundlage zu schaffen, um angetriebene Räder mit Polyurethanbandage für den Einsatz in Handlingsystemen hinsichtlich ihres Verschleißverhaltens zu untersuchen und so die Möglichkeit zu bieten, bei der Auswahl von Werkstoffen und der Auslegung von Antriebsrädern auf gesicherte Erkenntnisse zurückzugreifen. Weiterhin wird bei den Untersuchungen ein besonderes Augenmerk auf vorhandene Zwischenstoffe in der Kontaktfläche und ihren Einfluss auf das Verschleißverhalten gelegt,

da das Auftreten derartiger Stoffe in Fördersystemen für keinen Einsatzfall vollständig ausgeschlossen werden kann.

3.2 Motivation für die Arbeit

Wie bereits angesprochen wurde existieren eine Vielzahl von Untersuchungen zur beanspruchungsgerechten Dimensionierung von polymerbeschichteten Antriebsrädern für reibschlüssige Antriebe. Ebenso werden von allen größeren Herstellern solcher Räder auf eigenen Versuchseinrichtungen Belastungsversuche durchgeführt. Ein Mangel herrscht zur Zeit jedoch immer noch hinsichtlich der Untersuchung des Verschleißverhaltens von polymerbeschichteten Antriebsrädern für reibschlüssige Antriebe, die im Wesentlichen in der Fördertechnik eingesetzt werden, aber auch in anderen Bereichen Anwendungen finden.

Da die Bauformen, Beschichtungs- und Werkstoffarten sowie die Einsatzbereiche sehr unterschiedlich sein können, unterscheiden sich auch die Prüfverfahren unter Umständen sehr erheblich. Hinzu kommt, dass die Hersteller solcher Räder und Rollen nicht ihre Prüfverfahren und die daraus resultierenden Ergebnisse preisgeben, so dass das bereits gewonnene Know-how nicht direkt zur Verfügung steht.

Es ist also wünschenswert, ein möglichst breit anwendbares und leicht reproduzierbares Verschleißprüfungsverfahren zu entwickeln, das es ermöglicht, aus unterschiedlichen Werkstoffen hergestellte, angetriebene Räder und Rollen verschiedener Hersteller miteinander hinsichtlich ihres Verschleißverhaltens zu vergleichen.

Darüber hinaus ist es sinnvoll, den Prüfaufbau und –ablauf möglichst einfach zu gestalten, so dass er ohne großen Aufwand auch von kleineren Unternehmen nachgebaut werden kann. So kann es erreicht werden, dass auch nachträglich Ergebnisse, die nicht direkt aus dieser Arbeit hervorgehen, noch mit verhältnismäßig geringem Aufwand ermittelt werden können.

3.3 Vorgehensweise

Ausgehend von den Anforderungen, die sich aus der Forderung des Einsatzes in Handlingsystemen ergeben, wird ein Versuchsstand entwickelt, mit dessen Hilfe die Belastungen eines angetriebenen, kunststoffbeschichteten Rades möglichst realitätsnah und einfach nachgebildet werden können.

Berücksichtigt werden soll der kombinierte Einfluss von Werkstoffart der Radbandage, Wälzgeschwindigkeit, Schlupfverhältnissen, Zwischenstoffen, übertragener Leistung und Normalkraft.

Zur Eingrenzung der durchzuführenden Untersuchungen werden die folgenden Voraussetzungen angenommen:

- Die Belastungen durch die Rollgeschwindigkeit und Normalkraft sind so gering, dass die Erwärmung aufgrund der Dämpfung im Werkstoff auf keinen Fall zur Zerstörung des Reibbelages führen kann.
- Normalkraft und Wälzgeschwindigkeit werden in diskrete Schritte unterteilt (siehe Kap. 4).
- Die Radabmessungen und die Abmessungen der polymeren Bandage sind so gewählt, dass der Schlupf, der aus der Tangentialkraftübertragung resultiert, weit über dem Deformationsschlupf liegt. Der Schlupf wird durch geeignete Einmessverfahren nur als Lastschlupf ermittelt, der aus der Tangentialkraftübertragung resultiert.
- Die Untersuchungen werden nur für ausgewählte Radmaterialien durchgeführt (siehe Kap. 4.5).
- Es werden nur Prüfkörper mit identischen Abmessungen untersucht (siehe Kap. 4.6).
- Als Gegenfläche dient immer dasselbe Schwungrad mit blanker Stahloberfläche (siehe Kap. 5.1.2).
- Die untersuchten Zwischenstoffe werden systematisiert (siehe Kap. 4).

Um den Einfluss der einzelnen Versuchsparameter bestimmen zu können ist es wichtig, dass diese Voraussetzungen strikt eingehalten werden. Obwohl auf diese Weise die Anzahl der Versuchsergebnisse eingeschränkt wird, reicht bei geschickter Kombination der Parameter der Informationsgehalt der Messungen, um dennoch das Verhalten bestimmter Radbandagen unter nicht explizit geprüften Versuchsbedingungen abschätzen zu können. Die Festlegung und Kombination der Versuchsparameter wird in Kap. 6 dargestellt.

Um die Versuchsergebnisse systematisch zu dokumentieren wird in Anlehnung an DIN 50320 ein Messbogen erarbeitet, in dem die Ergebnisse einer einzelnen Messung festgehalten werden. Dieser Messbogen ist im Anhang B beispielhaft dargestellt.

4 Randbedingungen

4.1 Grundlagen der Herstellung von Radbandagen aus Polyurethanen

Polyurethane gehören zur Gruppe der Elastomere. Ihre Herstellung und Verarbeitung unterscheidet sich grundlegend von der bei Thermoplasten gebräuchlichen Vorgehensweise, da hier eine Vernetzung der Kettenmoleküle durch geeignete Additive erreicht wird. Grundsätzlich bestehen Polyurethane aus drei Bausteinen. Das elastische Grundgerüst bilden kurze, fadenförmige Moleküle, die sogenannten Polyole. Diese werden mit Diisocyanaten zum nicht zeitstabilen Prepolymer verknüpft, das in einem weiteren Schritt mit einem Vernetzer vermischt wird und so aus den Molekülketten ein stabiles Netzwerk bilden.

Massives Polyurethan, wie es in Radbandagen zum Einsatz kommt, wird im sogenannten Niederdruck-Heißgießverfahren verarbeitet. Die Vorgehensweise ist dabei folgendermaßen:

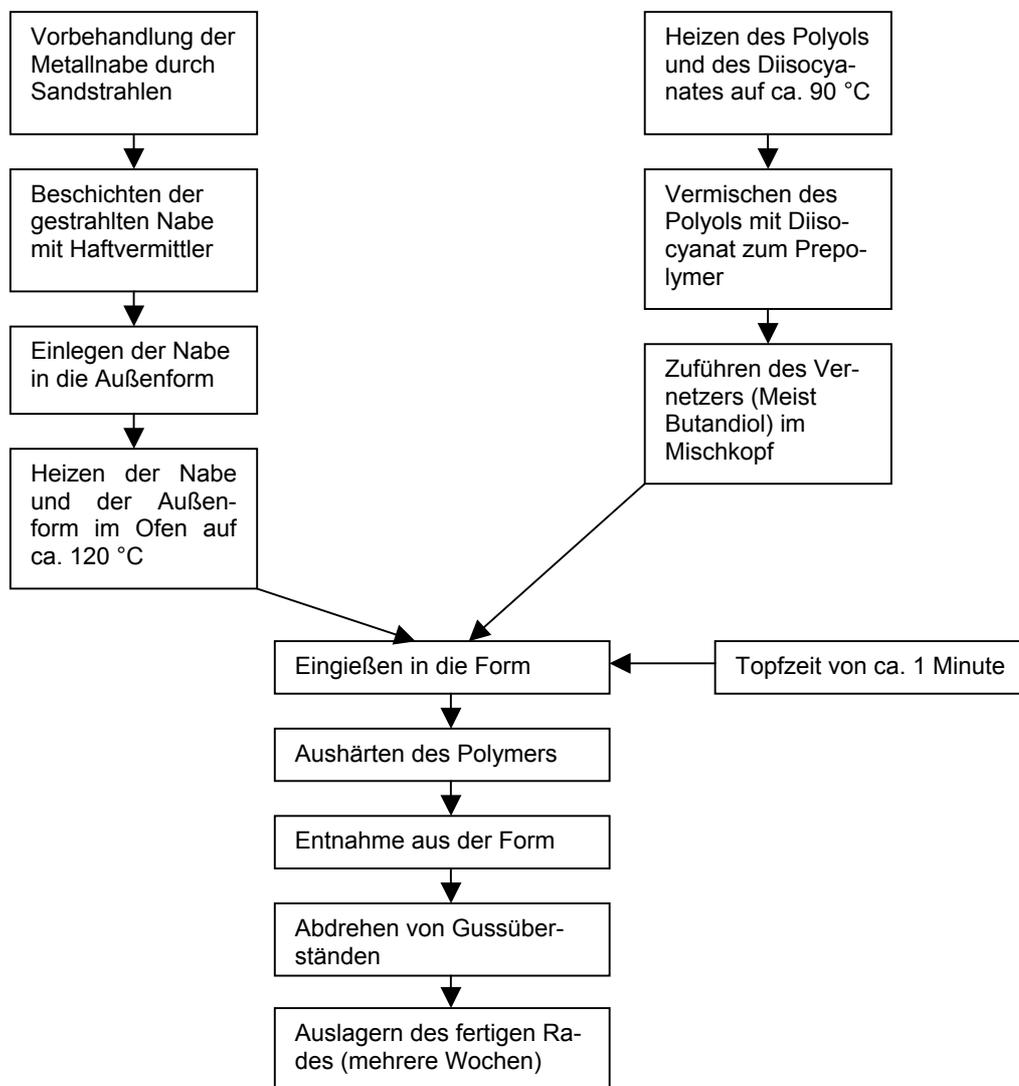


Abb. 4.1: Schematische Vorgehensweise beim Vergießen von Polyurethan zu Schwerlastträgern.

Unterscheiden lassen sich die unterschiedlichen Polyurethane hauptsächlich durch die Art des eingesetzten Diisocyanates. Zum Einsatz kommen hier drei unterschiedliche Diisocyanate:

- **TDI** (Toluoldiisocyanat) mit Vernetzer MbOCA
- **MDI** (Methylen-diphenyldiisocyanat) mit Vernetzer Butandiol
- **NDI** (Naphtalindiisocyanat) mit Vernetzer Butandiol

Da der Vernetzer MbOCA krebserregend ist, finden Polyurethane auf MDI- bzw. NDI-Basis in Europa eine wesentlich weitere Verbreitung. Polyurethane auf NDI-Basis zeichnen sich dabei durch besonders gute mechanische Eigenschaften, wie Weiterreißfestigkeit und Dämpfung aus. Sie werden auch als Vulkollan[®] bezeichnet und ausschließlich von der Firma Bayer in Leverkusen bzw. in Lizenz hergestellt.

4.2 Grundlagen polymerer Werkstoffe im Einsatz als Radkörper

Das Hauptproblem bei der Verwendung polymerer Werkstoffe resultiert aus ihrer geringen Steifigkeit im Vergleich zu metallischen Werkstoffen. Aus dieser geringen Steifigkeit ergibt sich die Tatsache, dass Bauteile aus polymeren Werkstoffen den Großteil der Dehnung verursachen (**Abb. 4.2**).

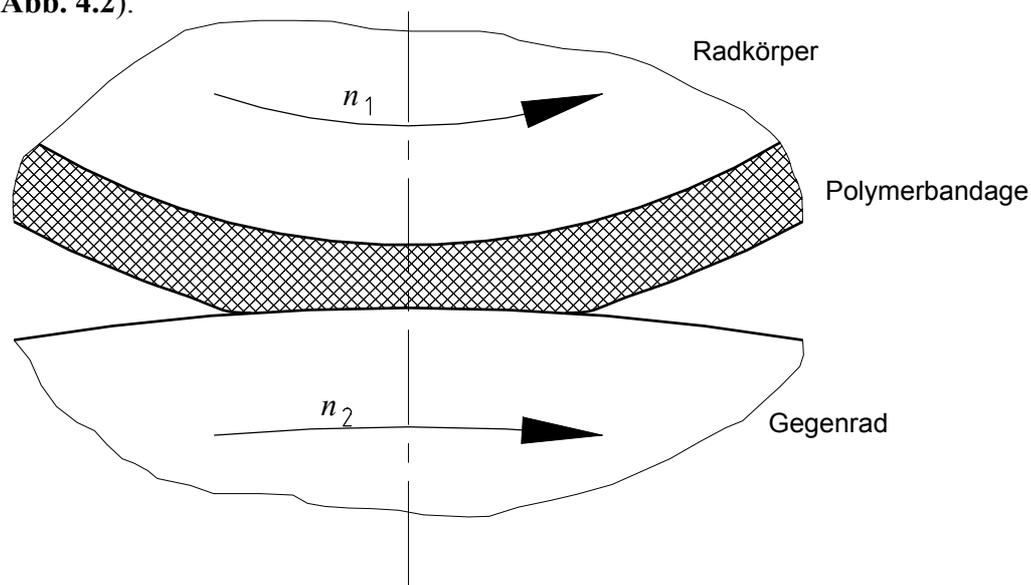


Abb. 4.2: Deformation in der Kontaktzone zwischen Schwerlastrad mit Polymerbandage (oben) und Gegenrad (unten).

Im Einsatz als Radkörper führt diese Eigenschaft dazu, dass beim Abwälzen von polymerbeschichteten Rädern auf Metalloberflächen immer ein Schlupf auftritt. Dieser Schlupf, der sich aus den Schubspannungen ergibt, wird Deformationsschlupf genannt und tritt insbesondere an den Rändern der Bandagenauflagefläche auf. Wird während des Abwälzens zusätzlich ein Drehmoment übertragen, führt die auftretende Tangentialkraft in der Kontaktfläche zu einer weiteren Schlupfkomponente, die die Kontaktfläche zwischen Kunststoffrad und Stahlfahrbahn in einen Haftanteil und einen Gleitanteil aufteilt (siehe **Abb. 2.1**).

Als Ergebnis ergibt sich ein vollständig anderes Reibungsverhalten, als es bei metallischen Werkstoffen auftritt, da nicht nur die Gleitzzone größer ist, sondern auch die Anteile der einzelnen Reibungskomponenten z. T. um Größenordnungen höher bzw. niedriger ausfallen. So teilt *Geyer* [gey71] die Reibkraft bei Gummi in vier Komponenten auf:

$$F_{\text{Reib}} = F_{\text{Adhäsion}} + F_{\text{Kohäsion}} + F_{\text{Hysterese}} + F_{\text{Viskose}} \quad (4.1)$$

Der **Adhäsionsanteil** an der Reibkraft ist zum Trennen der molekularen Bindungen in der mikroskopischen Berührfläche der beiden Körper erforderlich und wird im Wesentlichen von den Eigenschaften des Polymers und vorhandenen Zwischenstoffen bestimmt.

Der **Kohäsionsanteil** tritt nur in Verbindung mit Schlupf auf und beschreibt den Anteil der zur Bildung von Abrieb und zur Erzeugung von Rissen in der Polymerbandage benötigt wird. Nach *Bekel* [bek92] beschreibt dieser Anteil die Energie, die zur Veränderung der Oberflächen benötigt wird, sie ist im Allgemeinen vernachlässigbar.

Der **Hystereseanteil** beschreibt die bereits erwähnten viskoelastischen Eigenschaften des Werkstoffes und wird auch als innere Reibung bezeichnet. Er resultiert aus der Tatsache, dass die Energie zur Verformung eines Polymers größer ist als die bei der Entspannung freiwerdende Energie.

Mit dem **Viskoseanteil** bezeichnet *Geyer* den Anteil, der sich aus der Scherkraft in einer zwischen den berührenden Körpern befindlichen Flüssigkeit ergibt. Dieser Anteil tritt dementsprechend nur bei flüssigen Zwischenstoffen auf. Bei festen Zwischenstoffen ist zu unterscheiden, ob nur eine unvollständige Schicht, genau eine Lage oder mehrere Lagen von Partikeln zwischen den Gleitflächen liegen.

Problematisch sind diese Reibungseigenschaften, da polymere Werkstoffe eine vergleichsweise schlechte thermische Leitfähigkeit besitzen. Die Verbindung der Reibungseigenschaften mit der schlechten Wärmeleitfähigkeit resultiert bei falscher Auslegung in einer hohen thermischen Belastung, die die Bandage bis zur Zerstörung erhitzen kann (siehe **Abb. 4.3**). Da unterschiedliche Polymere unterschiedliche Werte für die innere Reibung aufweisen und es insbesondere bei einigen Polyurthanen Zusammensetzungen gibt, bei denen die Reibung mit ansteigender Temperatur zunächst abnimmt, spielt auch die Wahl des Werkstoffes eine entscheidende Rolle bei der Lebensdauererwartung einer Radbandage. Weitere Einflüsse, die bei diesem Vorgang eine Rolle spielen, sind die Umgebungstemperatur, die Normalkraft, die Radgeometrie (und damit die Kontaktflächengeometrie), die Rauhtiefe der Gegenfläche sowie in engen Grenzen die Luftfeuchtigkeit.

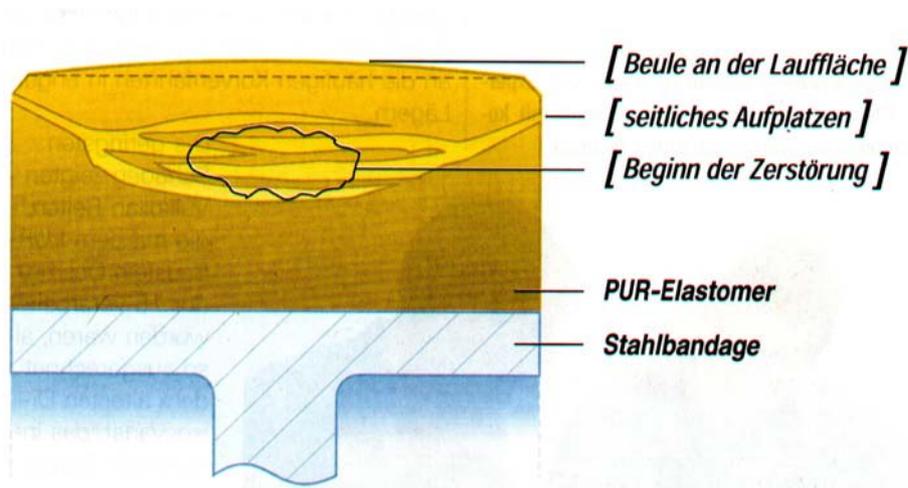


Abb. 4.3: Schädigung einer Polyurethanbandage durch innere Überhitzung [pla00b]

Auf der anderen Seite hat die geringe Steifigkeit polymerer Werkstoffe gerade im Einsatz als Lauffläche angetriebener Schwerlasträder auch einige Vorteile, insbesondere was das Haftungsverhalten angeht. So besteht bei einer geeignet strukturierten Oberfläche der Stahlgegenfläche die Möglichkeit, den Reibbeiwert auf Werte größer 1 anzuheben. Dies resultiert auf der einen Seite aus einer Art „Verzahnung“ im mikroskopischen Bereich der beiden Kontaktflächen miteinander (siehe **Abb. 4.4**), andererseits ist bei dem Werkstoff PUR die Adhäsionskomponente auch im Haftgebiet der Kontaktfläche für eine signifikante Erhöhung der Reibbeiwerte verantwortlich.

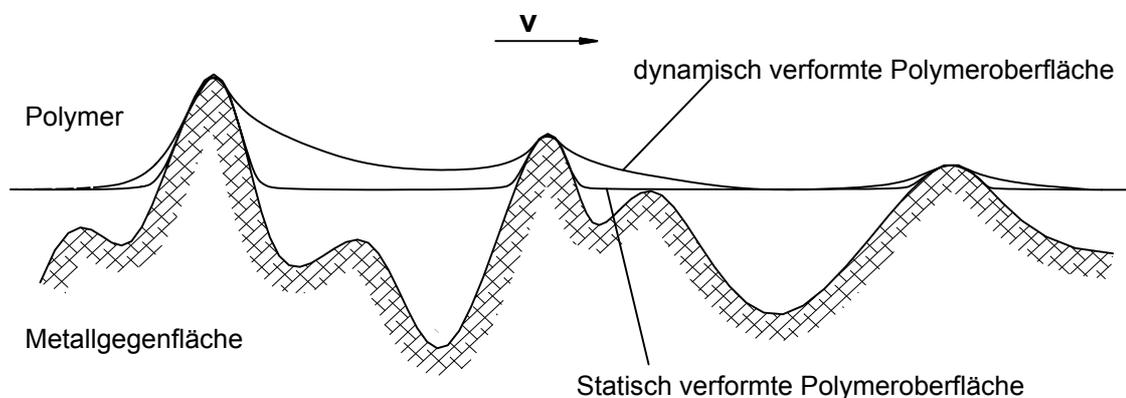


Abb. 4.4: Anschmiegung der Polymeroberfläche im mikroskopischen Bereich.

Ein weiteres Resultat der viskoelastischen Eigenschaften polymerer Werkstoffe ist das Fließen des Materials unter lang andauernder statischer Belastung, d. h. die Höhe der plastischen Verformung des Werkstoffes ist abhängig von der Verformungsdauer und der Verformungsgeschwindigkeit. Dieses Verhalten hat bei längerem Stillstand eines Rades unter Einwirkung einer Belastung ein Abplatten der Laufflächenrundung zur Folge. Diese Abplattung bildet sich in Abhängigkeit von der Werkstoffzusammensetzung nach einiger Zeit des Laufes teilweise oder vollständig wieder zurück, beeinträchtigt während dessen jedoch wesentlich die

Laufruhe und den Benutzungskomfort. Darüber hinaus können sich durch den unrunder Lauf Spannungsspitzen in der Belastung der Teile bilden, welche das Rad aufnehmen.

Werden polymere Werkstoffe feuchten Umgebungsbedingungen ausgesetzt, so zeigen sie die Eigenschaft, Wasser in z. T. erheblichen Mengen aufzunehmen. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften und wirkt sich auf das Reibungs- und Verschleißverhalten aus. So kommen *Severin* und *Liu* in [sev99b] zu dem Ergebnis, dass sich mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit die Wasseraufnahme von Polymeren (hier Polyamide) erhöht und dass sich damit einhergehend die Länge einer Probe vergrößert, während sich die Zugfestigkeit verringert. Das bedeutet, dass die Festigkeit des Werkstoffes herabgesetzt wird und die Spannungsverteilung in der Polymerbandage verändert wird. Dies gilt für den Werkstoff Polyurethan jedoch nur in sehr eingeschränktem Maße, da die Aufnahmefähigkeit für Wasser aus der Feuchtigkeit der Umgebungsluft, d. h. das Quellvermögen des Werkstoffes, als sehr gering einzustufen ist. Da jedoch der Werkstoff Polyurethan sehr kritisch auf eingetretenes Wasser reagiert und zu erwarten ist, dass Räder und Rollen während ihres Betriebes auch in feuchten bzw. nassen Umgebungen eingesetzt werden, ist es sinnvoll, diesen Einfluss bei der Durchführung der Versuche und insbesondere der Wahl der Zwischenstoffe mit zu berücksichtigen.

4.3 Einsatzgebiete reibschlüssiger Antriebe

Reibschlüssige Antriebe sind in ihren charakteristischen Merkmalen zumeist gleichartig aufgebaut. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem Motor als Antriebseinheit, einem Getriebe zur Drehmoment- und Drehzahlwandlung und dem eigentlichen Element zur Kraftübertragung auf das zu fördernde Gut bzw. auf ein Lastaufnahmemittel (LAM) (siehe **Abb. 4.5**). Dieses Element ist bei kraftschlüssiger Leistungsübertragung naheliegender Weise ein Rad. Dieses Rad wird aus den in Kapitel 1 genannten Vorteilen zumeist mit einer Bandage aus polymeren Werkstoffen versehen, deren Untersuchung Inhalt der vorliegenden Arbeit ist.

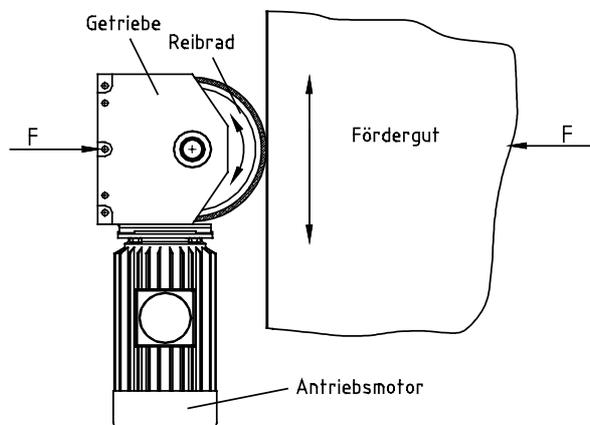


Abb. 4.5: Typische Ausführungsform eines reibschlüssigen Antriebes.

Die wesentlichen Vorteile von Reibradantrieben liegen in ihrem hohen Wirkungsgrad, ihrer einfachen Montage und ihren geringen Abmessungen. Daraus resultieren vergleichsweise geringe Investitions- und Betriebskosten. Aufgrund dieser und der bereits erwähnten weiteren Vorteile finden reibschlüssige Antriebe mit polymerbeschichteten Reibrädern ihren Einsatz in einer Vielzahl von unterschiedlichen Systemen. Beispielhaft zu nennen sind:

- Palettenförderanlagen
- Gurtförderanlagen
- Stückgut-Sortieranlagen
- Laufkatzen von Kranen
- Flurförderzeuge
- Paketförderbänder
- Druckwerke
- Automatische Parksysteme
- Fahrgeschäfte bei Vergnügungsveranstaltungen

Insbesondere in Förder- und Handlingsystemen sind Reibradantriebe weit verbreitet und haben im Laufe der vergangenen 3 Jahrzehnte vollständig aus Metallen bestehende Radsysteme weitestgehend verdrängt. Dies gilt besonders für Einsatzgebiete, in denen geringe bis mittlere Belastungen durch Normalkraft, thermische Einwirkungen, Drehzahlen und Quer- sowie Tangentialkraft auftreten.

Die Reibräder sind so aufgebaut, dass auf einem metallischen Grundkörper, der Nabe, die polymere Bandage aufgebracht wird (**Abb. 4.6**). Als Bandagenwerkstoff für angetriebene Räder kommen in den meisten Fällen Polyurethane unterschiedlicher Vernetzungs- und Härtegrade zum Einsatz.

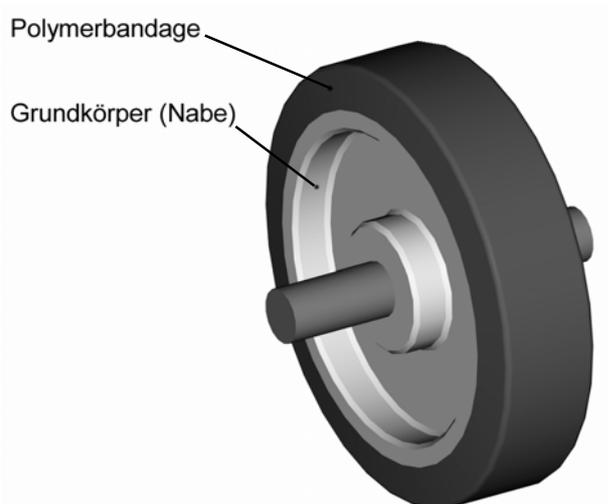


Abb. 4.6: Bauform eines Reibrades für einen reibschlüssigen Antrieb.

Räder aus Polyamid oder anderen thermoplastischen Kunststoffen werden häufig ohne tragende Metallnabe ausgeführt und finden als Reibräder zur Übertragung von Drehmomenten keine Verwendung.

4.4 Systemtechnische Randbedingungen

In DIN 30781 wird Stückgut als „ein individualisiertes Gut, das stückweise in die Transportinformation eingeht“ definiert. Dabei kann das Stückgut sowohl verpackt als auch unverpackt vorliegen. Somit sind auch Packstücke und Ladeeinheiten Stückgüter. Liegt ein Gut in einer Form vor, in der es nicht ohne Weiteres zu einem Stückgut gezählt werden kann (Schüttgüter, Flüssigkeiten, Gase), so wird es mit Hilfe von Packmitteln und Packhilfsmitteln zu Packstücken bzw. Ladeeinheiten geformt und bildet anschließend ebenfalls ein Stückgut im Sinne der Norm.

Nicht weiter definiert wird die Form, Größe und Oberfläche von Stückgütern, die vom Gut selber und bei verpackten Gütern vom Packstoff, aus dem Packmittel und Packhilfsmittel bestehen, gebildet wird. In reibschlüssigen und automatisierten Handlingsystemen ist jedoch insbesondere diese Information ein entscheidender Faktor zur Auslegung der Form, Größe, Anordnung und Anzahl von Antrieben. Weiterhin wichtig ist bei der Bildung von Ladeeinheiten aus mehreren kleinen Stückgütern auf Ladehilfsmitteln (z. B. Palette, Box) die Gestaltung dieser Ladehilfsmittel und die Klärung der Frage, ob sie bereits eine für den reibschlüssigen Transport geeignete Oberfläche besitzen oder ob diese extra anzubringen ist.

Während bei kleinen bis mittelgroßen Stückgütern oft noch Stetigförderer Anwendung finden und die Verpackung selber die Gegenfläche für reibschlüssige Antriebe in Handlingsystemen darstellt (**Abb. 4.7**), werden große Stückgüter bzw. Ladeeinheiten zumeist unstetig gefördert. Dies macht es sinnvoll, insbesondere bei größeren Ladehilfsmitteln eine speziell konstruierte Oberfläche für den Kontakt zwischen Reibradantrieb und Stückgut vorzusehen (**Abb. 4.8**). Diese sogenannte Gegenfläche ist meist aus Metall, überwiegend Stahl gefertigt.

Das Reibrad von reibschlüssig funktionierenden Antrieben stellt anlagenseitig die Systemgrenze zum zu fördernden Gut dar und wird in seiner Ausführung und Bauweise ebenfalls entscheidend durch dessen Eigenschaften bestimmt. Weiterhin beeinflusst durch die Form und Größe des Stückgutes bzw. die Art des Ladehilfsmittel ist die Orientierung der Kontaktfläche im Raum. So ist es oftmals erstrebenswert, eine senkrecht angeordnete Kontaktfläche vorzusehen, um einen gewissen Effekt der Selbstreinigung, speziell bei Vorhandensein von Zwischenstoffen, zu erreichen. Zusätzlich wird die Reibfläche oft unterhalb des Ladehilfsmittels angeordnet, um ebenfalls einen gewissen Schutz vor Störstoffen zu erreichen und außerdem die Antriebe kompakter ausführen zu können. Darüber hinaus wird es dadurch möglich, die Anpresskraft der Reibräder unabhängig vom Stückgutgewicht aufzubringen, was eine Optimierung hinsichtlich der Reibradwerkstoffe und Beschleunigungswerte ermöglicht.

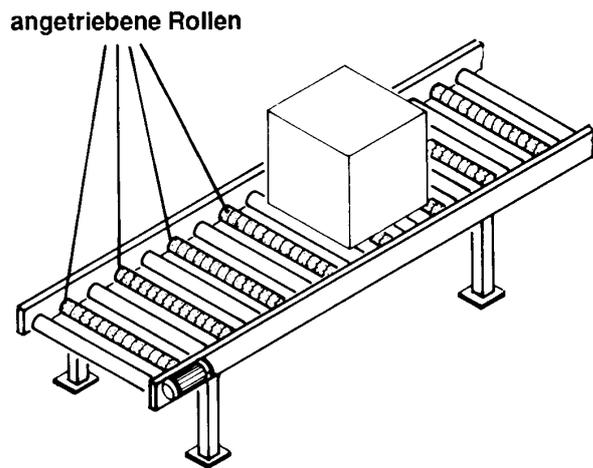


Abb. 4.7: Rollenbahn (angetrieben) als typisches Beispiel für ein stetig förderndes Handlingsystem für kleine bis mittlere Stückgutabmessungen und Gewichte. Kontaktfläche direkt am Stückgut, waagerechte Orientierung. [jün89]

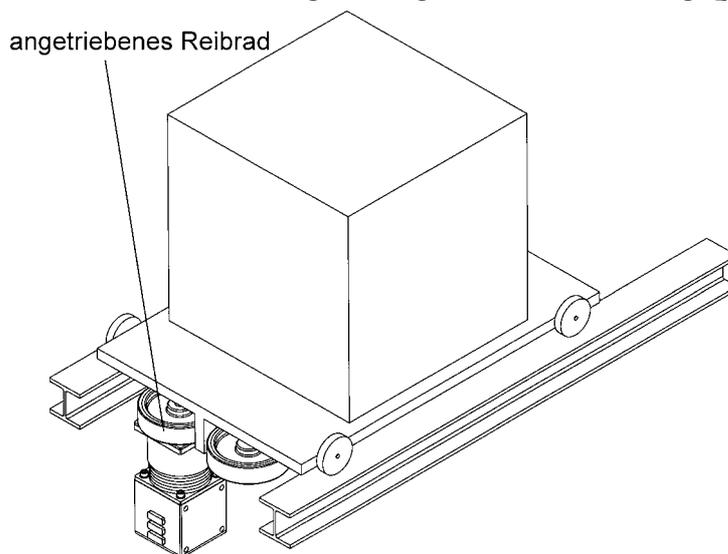


Abb. 4.8: Stückgut auf Palette mit besonderen Reibflächen unterhalb des Ladehilfsmittels. Förderung unstetig, zumeist automatisiert. Orientierung der Kontaktfläche senkrecht.

Aus diesen sogenannten systemtechnischen Randbedingungen ergeben sich nun die Anforderungen, die an die durchzuführenden Untersuchungen zu stellen sind, um eine zwar einfach aufgebaute, aber dennoch weitestgehend beanspruchungsgerechte Nachbildung der Radbelastung zu erreichen. Diese sind im Einzelnen:

- Senkrechte Kontaktfläche
- Gegenfläche aus Stahl
- Einstellbare Normalkraft
- Einstellbare Leistungsübertragung

- Einstellbarkeit der Drehzahlen
- Einbringung von unterschiedlichen Störstoffen

Um eine vollständige Übereinstimmung der Beanspruchung zu erreichen, müsste die Gegenfläche, welche die Kontaktfläche am Ladehilfsmittel nachbildet, ebenfalls gerade sein. Wird anstelle dessen eine Zylinderoberfläche gewählt so resultiert hieraus eine Verkleinerung der Kontaktfläche. Der Faktor mit, dem sich die Kontaktfläche verkleinert, berechnet sich gemäß [sev99b] und nach Umstellung der Formeln wie folgt:

$$x = \sqrt{1 + \frac{r_{\text{rad}}}{r_{\text{Gegenfl}}}} \quad (4.2)$$

Wobei gilt:

$$A_{\text{eben}} = x \cdot A_{\text{zyl}} \quad (4.3)$$

mit A_{eben} als Kontaktflächengröße für eine ebene und A_{zyl} für eine zylindrische Gegenfläche.

Durch die veränderte Gegenflächengeometrie wird neben der Kontaktfläche auch die Flächenpressung in der Kontaktfläche beeinflusst. Nach [sev99b] berechnet sich die maximale Pressung p_0 zu:

$$p_0 = \frac{2 \cdot F_N}{\pi \cdot A} \quad (4.4)$$

mit F_N als Normalkraft. Sie hängt somit linear von der Kontaktflächengröße ab und verändert sich mit dem gleichen Faktor x .

Ist das Verhältnis von Radius der Gegenfläche zum Radius des Reibrades groß genug, so ist der hierdurch eingebrachte Fehler im Vergleich zur ebenen Gegenfläche, unter Berücksichtigung aller Messungenauigkeiten, vergleichsweise gering.

Ein weiterer wesentlicher Faktor, der sich aus der Bedingung des Einsatzes im Stückguthandling ergibt, ist das Vorhandensein der bereits angesprochenen Störstoffe. Diese sind prinzipiell zu unterteilen in feste und in flüssige Stoffe. Während die festen Stoffe die Polymerbandage meist durch ihre abrasive Wirkung beeinträchtigen, geht von den flüssigen Stoffen, neben der Trennung der Kontaktflächen (vgl. Aquaplaning), überwiegend eine chemische Wirkung auf den Bandagenwerkstoff aus. Darüber hinaus nimmt Wasser als flüssiger Zwischenstoff eine Sonderrolle ein, da polymere Werkstoffe die bereits genannte Eigenschaft haben, durch das sogenannte Aufquellen Wasser in ihrem Molekülverbund einzulagern. Diese Eigenschaft beeinflusst nachhaltig Werkstoffeigenschaften wie Festigkeit und Härte sowie Haftungsverhalten der polymeren Bandage. Sowohl den festen als auch den flüssigen Stoffen gemeinsam ist die Eigenschaft, sich zwischen die Kontaktfläche zu legen und einen direkten Kontakt von Reibradoberfläche und Gegenfläche zu verhindern.

Als zu untersuchende Störstoffe lassen sich die Folgenden aufzählen:

Feststoffe:

- Quarzsand
- Metallspäne

Flüssigkeiten:

- Wasser
- Öl/Wasser-Emulsionen (Schneid-Kühl-Flüssigkeiten)

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

Gemische:

- Quarzsand mit Wasser
- Metallspäne mit Öl/Wasser-Emulsionen (Schneid-Kühl-Flüssigkeiten)

Zwei weitere Einflussgrößen sind die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur der Umgebungsluft. Es erscheint jedoch nicht sinnvoll, diese Größen in einer Klimakammer einzustellen, da die Bedingungen im realen Einsatz eines Handlingsystems und die im Versuchsfeld auftretenden mit wenigen Ausnahmen als gleich zu betrachten sind. Aus diesem Grund werden diese Einflussgrößen nur überwachend gemessen.

4.5 Geometrische Randbedingungen

Die geometrischen Randbedingungen umfassen alle Abmessungen des Reibrades sowie die Form, Größe und Oberflächenbeschaffenheit der Gegenfläche am Stückgut bzw. Ladehilfsmittel. Sie lassen sich nicht ohne weiteres aus dem Einsatzfall Stückguthandling ableiten, da hier zu viele Bauformen und Baugrößen Verwendung finden. Dennoch ist eine gewisse Eingrenzung möglich, da Schwerlasträder mit Metallnabe und Polymerbandage gängige Größen von 80 bis 500 mm im Durchmesser und 30 bis 100 mm in der Breite aufweisen. Dabei sind solche Räder mit Polyurethanbandage meist zylindrisch und unprofiliert ausgeführt, während bei Vollgummibandagen oft eine Balligkeit und / oder eine Profilierung anzutreffen ist.

Für die Abmessungen der Gegenfläche gilt prinzipiell der gleiche Einwand wie für die Räder, da hier ebenfalls die Möglichkeiten der Gestaltung weit gestreut sind. Aber auch hier lässt sich eine zulässige Einschränkung treffen, da Schwerlasträder zumeist bei größeren Stückgütern bzw. Ladeeinheiten zum Einsatz kommen. Die Ladehilfsmittel solcher größeren Ladeeinheiten sind meist aus Metall gefertigt, so dass die bereits angesprochene spezielle Gegenfläche für den Kontakt mit dem Schwerlastrad naheliegender Weise ebenfalls aus Metall gefertigt ist. Die Annäherung der ebenen Metalloberfläche durch eine Zylinderoberfläche mit ausreichend großem Radius wurde bereits angesprochen. Um dabei eine Reproduzierbarkeit der

Untersuchungsergebnisse zu erreichen soll die Rauigkeit der Gegenradoberfläche überwacht werden und, falls sie durch Einwirkung abrasiver Zwischenstoffe einen Grenzwert überschreitet, nachbearbeitet oder ausgetauscht werden.

Da es Ziel der Arbeit ist, den Einfluss von Störstoffen auf das Verschleißverhalten zu untersuchen, ist es ausreichend, Probenräder in wenigen Abmessungen zu untersuchen, und so den Einfluss der Proberadgröße zu berücksichtigen.

Gewählt werden für die Durchführung der Versuche die folgenden Abmessungen:

Durchmesser	Breite	Bandagenstärke
100 mm	30 mm	10 mm
200 mm	50 mm	15 mm

Abb. 4.9: Tabellarische Aufstellung der Prüfradabmessungen.

Bei der Wahl der Bandagenstärke wurden die Abmessungen handelsüblicher Räder berücksichtigt.

Für die Gegenfläche wird eine massive Stahlscheibe mit den folgenden Abmessungen ausgewählt:

Durchmesser	Breite
600 mm	60 mm

Abb. 4.10: Tabellarische Aufstellung der Abmessungen des Gegenrades.

Damit ergibt sich der Faktor x für die Berechnung der Kontaktflächengröße nach Formel 4.2 für die unterschiedlichen Raddurchmesser zu:

$$x_{200} = 1,15 \quad \text{für 200 mm Raddurchmesser}$$

$$x_{100} = 1,08 \quad \text{für 100 mm Raddurchmesser}$$

Obwohl dies zunächst relativ groß erscheint, kann ein Faktor in dieser Höhe akzeptiert werden, da der Einfluss der wesentlichen Verschleißmechanismen nicht durch die Kontaktflächengröße, sondern durch die Spannungsverteilung in der Kontaktfläche beeinflusst wird. Die Spannungsverteilung ist zwar abhängig von dem Faktor x , wird darüber hinaus jedoch auch von der Bandagenstärke und der einwirkenden Normalkraft und dem übertragenen Drehmoment beeinflusst, so dass der Einfluss des Faktors x vergleichsweise gering ist. Auf der anderen Seite erhält man aber den Vorteil eines kompakt aufgebauten Versuchszustandes.

4.6 Dynamische Randbedingungen

Zu den dynamischen Randbedingungen gehören aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften von polymeren Werkstoffen insbesondere auch die Härtegrade der Bandagen. Für angetriebene Reibräder finden im Allgemeinen etwas weichere Werkstoffe Verwendung als für nicht angetriebene Räder. Üblich sind hier Werte zwischen 80 und 95 Shore-A. Für die Proben mit Polyurethanbandage wird daher dieser Bereich in der handelsüblichen Abstufung gewählt. Diese sind:

- 75 Shore-A
- 80 Shore-A
- 85 Shore-A
- 92 Shore-A

Da jedoch aufgrund der normalen Streuung im Fertigungsablauf die tatsächliche Härte der Bandagen variieren kann, wird sie für jedes Rad vor Versuchsbeginn einzeln ermittelt. Weiterhin ist damit zu rechnen, dass die Härte der Bandagen mit fortschreitender Versuchsdauer leicht absinkt, da im mikroskopischen Bereich die Molekülbindungen durch die Walkarbeit teilweise zerstört werden können.

Weitere wichtige dynamische Randbedingungen sind die auftretenden Beschleunigungen. Diese werden jedoch vernachlässigt, da die Beanspruchung einer Radbandage aufgrund einer dauernden mechanischen Belastung in den meisten Fällen als höher anzusehen ist und damit auch ihr Einfluss auf das Verschleißverhalten.

Wichtiger als die Berücksichtigung auftretender Beschleunigungen ist die Berücksichtigung des vorhandenen Schlupfes, da aus diesem in Abhängigkeit vom vorhandenem Zwischenstoff eine direkte abrasive Wirkung hervorgehen kann. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass der Schlupf eine wesentliche Rolle bei der Wärmeentwicklung in der Radbandage spielt. Aus diesem Grund soll der Schlupf über die gesamte Versuchsdauer gemessen und aufgezeichnet werden.

4.7 Kinematische Randbedingungen

Als kinematische Randbedingungen sind für Reibradantriebe, wie sie in Stückguthandlingssystemen Verwendung finden, im Wesentlichen die Drehzahlen der Reibräder und damit die Handlinggeschwindigkeiten sowie die auftretenden Kräfte und Momente zu berücksichtigen. Für die kinematischen Randbedingungen gilt ebenso wie für die geometrischen Randbedingungen, dass eine Vielzahl von Belastungsgrößen in unterschiedlichen Handlingsystemen auftreten können. Da jedoch bereits bei den geometrischen Randbedingungen Einschränkungen hinsichtlich der zu betrachtenden Baugrößen und Abmessungen getroffen worden sind,

wirkt sich dies auch auf die kinematischen Randbedingungen aus. So lässt sich die Drehzahl und die maximale Normalkraft aus den Belastungsgrenzen für ein Antriebsrad ermitteln.

Die wichtigsten Einflussgrößen, aus denen sich die Belastungsgrenze bei Reibrädern ergibt, sind die Normalkraft, die Drehzahl und die Tangentialkraft, deren theoretischer Maximalwert sich aus Haftbeiwert und Normalkraft ergibt.

Für **die Normalkraft** ergibt sich als Faustformel nach [bay98] zur Ermittlung der Radbelastbarkeit für Geschwindigkeiten bis 7 km/h der folgende Zusammenhang zwischen den Radabmessungen Breite (B) und Außendurchmesser (D) und der maximal zulässigen Normalkraft:

$$F_{N,\max} = 800\text{N} \cdot \frac{B}{10\text{mm}} \cdot \frac{D}{100\text{mm}} \quad (4.5)$$

Bei dieser Grobauslegung unberücksichtigt bleibt die Härte sowie die Stärke der Bandage, so ist besonders für weiche Bandagenwerkstoffe (75 Shore-A) der auf diese Weise ermittelte Wert zu hoch. Aus diesem Grund wird die Normalkraft in Abhängigkeit von der Kontaktflächenlänge gewählt (siehe Abb. 4.11). Zu diesem Zweck werden Prüfräder der unterschiedlichen Abmessungen und Bandagenhärten der Normalkraft ausgesetzt und die Kontaktflächenlänge L gemessen. Aufgrund von durchgeführten Vorversuchen ergab sich ein maximaler Wert für L , der bei Rädern mit 100 mm Durchmesser bei 21 bis 23 mm lag und für Räder mit 200 mm Durchmesser bei 27 bis 35 mm. Mit diesen Angaben werden die in der tabellarischen Aufstellung in **Abb. 4.12** genannten Werte für die Normalkraft ermittelt.

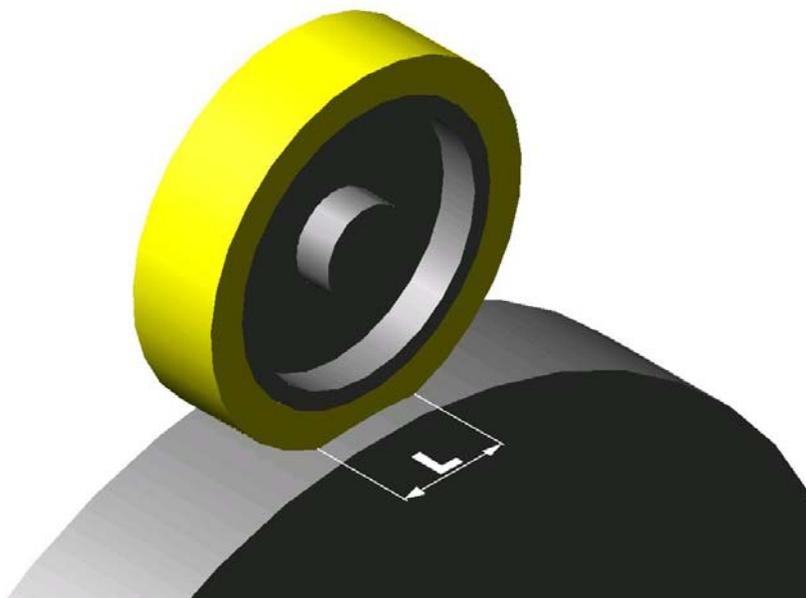


Abb. 4.11: Kontaktflächenlänge L zwischen Prüfrad und Gegenscheibe.

Die Drehzahlen ergeben sich aus der Rollgeschwindigkeit. Diese wird für Schwerlasträder in Katalogen von Herstellern zumeist mit maximal 10 km/h angegeben.

Die Tangentialkraft, die maximal übertragbar ist, hängt stark von der Art des eingebrachten Zwischenstoffes ab. Für saubere Kontaktflächen wird von Herstellern ein Wert von $\mu = 0,3$ bis

0,5 angegeben. Zu erwarten ist, dass dieser Wert für benetzende Zwischenstoffe wie z. B. Wasser stark nach unten korrigiert werden muss. Um sowohl den maximal erreichbaren Haftbeiwert zu ermitteln als auch das untersuchte Rad maximal mechanisch zu belasten, wird die Tangentialkraft auf den maximal erreichbaren Wert eingestellt.

Werden die Belastungsgrößen auf diese Weise festgelegt, ergeben sich für die zu untersuchenden Radabmessungen, Bandagenwerkstoffe und Randbedingungen die im Folgenden aufgelisteten Normalkräfte und Drehzahlen.

Durchmesser [mm]	Bandagenstärke [mm]	Breite [mm]	Härte [Shore-A]	Normalkraft	Drehzahl [min ⁻¹]
100	10	30	75	1380 N	530,5
100	10	30	80	2450 N	530,5
100	10	30	85	3000 N	530,5
100	10	30	90	3400 N	530,5
100	10	30	92	3400 N	530,5
200	15	50	75	4400 N	265,3
200	15	50	80	5000 N	265,3
200	15	50	85	5400 N	265,3
200	15	50	90	5400 N	265,3
200	15	50	92	5400 N	265,3

Abb. 4.12: Tabellarische Aufstellung der zulässigen Normalkräfte und Drehzahlen der Prüfräder

Da die Drehzahl, die direkt von der geforderten Fördergeschwindigkeit abhängt, möglichst konstant hoch für ca. 10 km/h gehalten werden soll, ergibt sich aufgrund des schlechteren Wärmeübergangs in stärkeren Bandagen eine entsprechend geringere zulässige Normalkraft für gleiche Werkstoffe und Radabmessungen.

4.8 Zusammenfassung der Randbedingungen

Für die Durchführung der Untersuchungen ergeben sich somit die folgenden Randbedingungen:

- Es werden ausschließlich Schwerlasträder mit polymerer Bandage und metallischer Nabe untersucht.
- Die Gegenfläche ist metallisch.
- Die Gegenfläche ist eine Zylinderoberfläche mit 600 mm Durchmesser.
- Die Kontakfläche liegt senkrecht.

- Es werden die folgenden Zwischenstoffe in die Kontaktfläche eingebracht, um ihren Einfluss auf das Verschleißverhalten zu betrachten:

Feststoffe:

- Quarzsand
- Metallspäne

Flüssigkeiten:

- Wasser
- Öl/Wasser-Emulsionen

Gemische:

- Quarzsand mit Wasser
- Metallspäne mit Öl/Wasser-Emulsionen

- Die Abmessungen der Probenräder betragen:

Durchmesser	Breite	Bandagenstärke
100 mm	30 mm	10 mm
200 mm	50 mm	15 mm

- Die Härtegrade der untersuchten Bandagen liegen zwischen 75 und 92 Shore-A
- Die Drehzahlen der Probenräder betragen 530,5 U/min für 100 mm Durchmesser und 265,3 U/min für 200 mm Durchmesser.
- Die übertragenen Drehmomente werden in Abhängigkeit vom Zwischenstoff für jedes Rad auf einen Maximalwert eingestellt

Für jeden Versuch wird ein Versuchsprotokoll erstellt, in dem die Randbedingungen und der Verlauf der gemessenen Größen festgehalten werden. In diesem Protokoll werden auch die nach Versuchsende ermittelten erreichten Reibungsbeiwerte notiert.

5 Versuchsaufbau

Es wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, die im vorangegangenen Kapitel erläuterten Randbedingungen möglichst realitätsnah umzusetzen und auf diese Weise Reibräder den genannten Beanspruchungen auszusetzen. **Abb. 5.1** zeigt den schematischen Aufbau des Versuchsstandes mit seinen wesentlichen Bestandteilen.

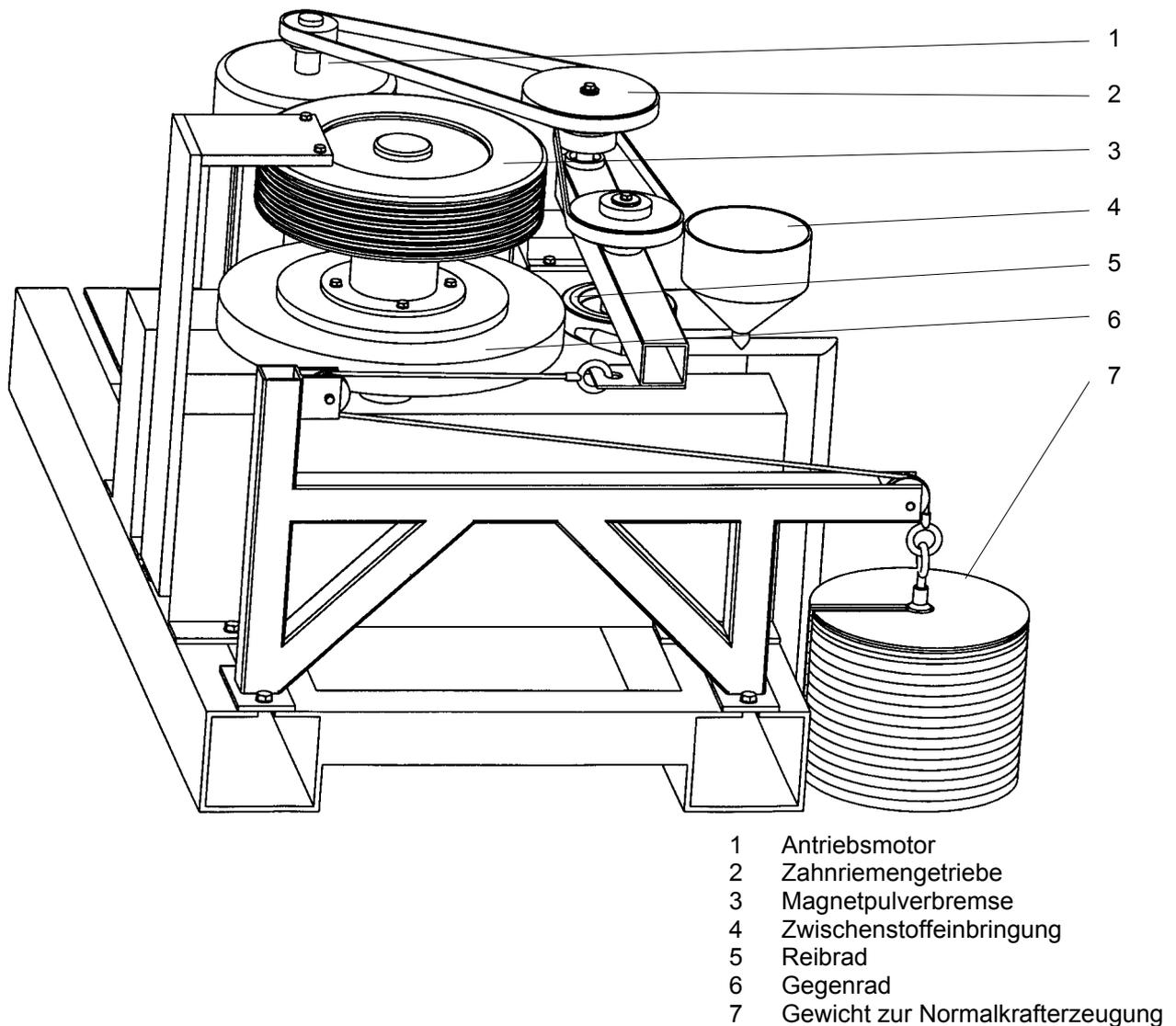


Abb. 5.1: Dreidimensionale schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Bei dem entwickelten Versuchsaufbau handelt es sich um einen sogenannten Rollenversuchsstand mit fliegend gelagertem Prüfrad. Die wesentlichen Komponenten sind das zu untersuchende Prüf- oder Reibrad (5) und das metallische Gegenrad (6), welches die ebene Gegenfläche simuliert. Der Kraftfluss erfolgt, erzeugt von einer drehzahlgeregelten Gleichstrommaschine (1), über ein zweistufiges Zahnriemengetriebe (2) auf das Reibrad (5). Dort wird über die Kontaktfläche zwischen Reibrad und Gegenrad (6) eine Tangentialkraft übertragen, deren Gegenkraft durch das in der Magnetpulverbremse (3) aufgebaute Bremsmoment erzeugt wird.

Die Erzeugung der Normalkraft zwischen Reibrad und Gegenrad erfolgt über Gewichte (7), die über ein umgelenktes Stahlseil mit dem Träger des Reibrades verbunden sind.

5.1 Reibrad

Das Reibrad ist der zu untersuchende Prüfkörper und stellt somit das wesentliche Element des Versuchsaufbaues dar. Bereits in Kapitel 4.5 wurden die geometrischen Abmessungen der Reibräder aufgrund der dort erläuterten Randbedingungen festgelegt. Die Prüf- oder Reibräder weisen die folgenden Abmessungen auf:

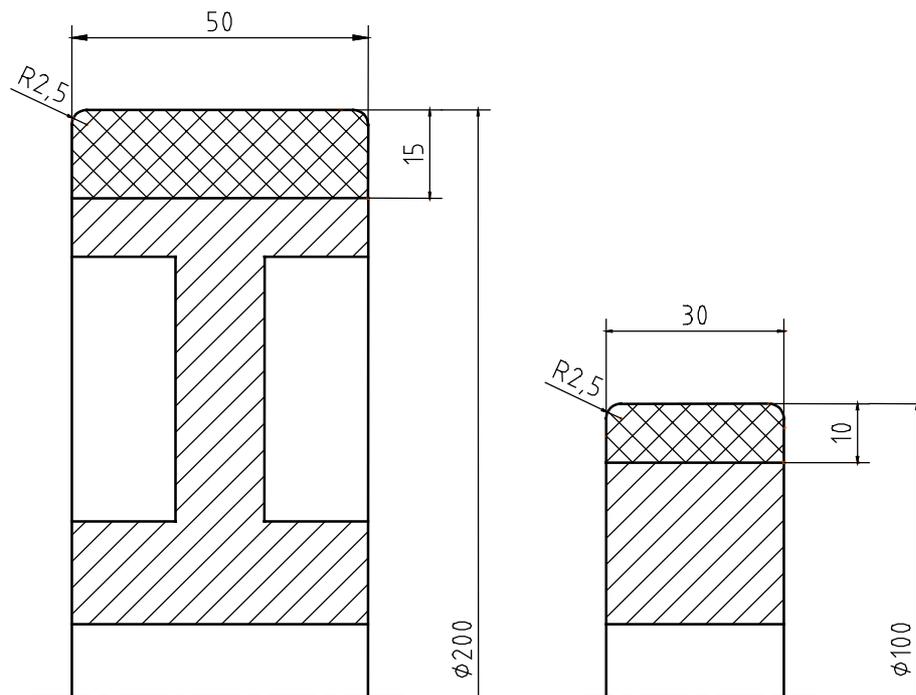


Abb. 5.2: Abmessungen der Prüfräder

Die wichtigsten Größen, die auf die Belastung des Reibrades Einfluss nehmen, sind:

- Normalkraft
- Tangentialkraft
- Drehzahl
- Zwischenstoff
- Schlupf

Die Normalkraft wird über Gewichte erzeugt und so in diskreten Schritten erhöht bzw. verringert (siehe auch Kap. 4.6). Ihr wesentlicher Einfluss basiert auf der Beziehung, die zwischen Normalkraft und Kontaktflächengröße herrscht (siehe auch Kap. 4.3). Die Größe der Kontaktfläche lässt sich unterscheiden in eine mikroskopische Betrachtung, die sogenannte tatsächliche Berührungsfläche, und in die makroskopische Berührungsfläche, die sich aus der äußeren Begrenzung der Kontaktzone ergibt. Für die Untersuchungen wird lediglich die

makroskopische Berührungsfläche betrachtet, da nicht die elementaren Vorgänge, die zum Verschleiß führen, betrachtet werden, sondern der Einfluss von Störstoffen und den genannten äußeren Einflussgrößen auf den Verschleiß untersucht wird. Zu diesem Zweck wird die makroskopische Berührungsfläche zu Beginn eines jeden Versuches ermittelt, indem ein Tuscheabdruck der Kontaktzone auf einem Blatt Papier aufgebracht wird. Auf diese Weise wird die statische Berührungsfläche ermittelt, deren Größe abhängig von den Radabmessungen Durchmesser, Breite und Bandagenstärke sowie von der Normalkraft und der Bandagenhärte ist. Änderungen der Kontaktfläche aufgrund dynamischer Vorgänge wie z. B. Schwingungen, die während der Versuchsdurchführung auftreten, werden bei dieser Vorgehensweise nicht berücksichtigt.

Die Tangentialkraft ist die Größe, die zusammen mit der **Drehzahl** die Leistungsübertragung bestimmt und somit wesentlichen Einfluss auf das Belastungskollektiv des Reibrades hat. Erzeugt wird die Tangentialkraft auf der Antriebsseite durch einen Gleichstrommotor, der seine Leistung über ein Zahnriemengetriebe auf das Reibrad überträgt, und auf der Abtriebsseite durch eine Magnetpulverbremse, die über eine Drehmomentmessnabe mit der Gegenscheibe verbunden ist und über die ein konstantes Bremsmoment abgeführt wird. Der Drehmomentverlauf in der Welle zwischen Gegenrad und Bremse wird ständig gemessen und aufgezeichnet, um die Höhe der momentanen übertragenen Leistung zwischen Reibrad und Gegenrad und damit die Belastungshöhe der Polymerbandage zu kennen. Zudem kann man durch Messen des Momentenverlaufes den Zustand der Bandage überprüfen, da bei Totalversagen der Bandage durch z. B. Ablösung das Moment schlagartig auf einen geringeren Wert abfällt.

In Kapitel 4.6 wurde die maximal Laufgeschwindigkeit für angetriebene Reibräder bereits mit 10 km/h angegeben. Daraus ergeben sich für das Reibrad und den Motor in Abhängigkeit vom Durchmesser und dem Übersetzungsverhältnis des Zahnriemengetriebes die folgenden Drehzahlen:

Raddurchmesser	Drehzahl Rad	Drehzahl Motor ($i = 0,2241$)
100 mm	530 min^{-1}	2370 min^{-1}
200 mm	265 min^{-1}	1185 min^{-1}

Die Zwischenstoffe (siehe auch Kap. 4.3) bilden einen wesentlichen Aspekt der Untersuchungen, da genau ihr Einfluss auf das Verschleißverhalten untersucht werden soll. Von besonderem Interesse sind dabei abrasive und chemische Einflüsse der Zwischenstoffe in der Kontaktfläche und ihr Einfluss auf das Schlupfverhalten.

Dem Schlupf wird als wesentlicher Einflussgröße auf den Verschleiß besondere Beachtung geschenkt. Zu seiner Ermittlung werden während eines Versuches die Drehzahlen von Motor und Gegenrad gemessen, ständig miteinander verglichen und zusammen mit ihrer Differenz

aufgezeichnet, um den auftretenden Schlupf, den Zeitpunkt seines Auftretens und so seinen Einfluss auf den Verschleiß zu ermitteln.

5.2 Gegenfläche

Das zweite wesentliche Bauteil der Versuchseinrichtung ist die Schwungscheibe, die mit ihrer Mantelfläche die Gegenfläche der Kontaktzone darstellt. Die Schwungscheibe stellt mit ihrem endlichen Radius nur eine Annäherung an die in den meisten Anwendungen ebene Gegenfläche dar (siehe auch Kap. 4.3). Die Abmessungen der Schwungscheibe werden im Wesentlichen vorgegeben durch die Geometrie der zu untersuchenden Radkörper. Ebenfalls in Kapitel 4.3 erläutert wurde der Faktor x für die Verkleinerung der Kontaktfläche. Unter Berücksichtigung dieses Faktors wurde der Durchmesser der Schwungscheibe mit 600 mm festgelegt. Bei der Breite der Schwungscheibe ist lediglich darauf zu achten, dass die Prüfräder auf ihrer vollen Breite auf der Schwungscheibe aufliegen können. Da die maximale Breite der Prüfräder 50 mm beträgt, ist eine Breite von 60 mm für die Schwungscheibe ausreichend.

Ein weiterer wichtiger Faktor, der auf die Beanspruchung der Proberäder Einfluss nimmt, ist die Beschaffenheit der Schwungscheibenoberfläche. Da in den meisten Handlingsystemen keine besonders behandelten Stahloberflächen eingesetzt werden, ist es naheliegend, auch für den Versuchsaufbau eine glattgedrehte Schwungscheibenoberfläche zu wählen, die gewisse Rauigkeitswerte einhält. Diese Rauigkeitsobergrenze wird mit 25 μm festgelegt, und ihre Einhaltung wird durch regelmäßige Oberflächenmessungen überwacht.

5.3 Bremse

Neben dem Motor auf der einen Seite ist die Bremse auf der anderen Seite das wichtige Element zur Erzeugung der Tangentialkraft in der Kontaktfläche. Sie gewährleistet die Leistungsübertragung zwischen Proberad und Gegenscheibe. Zum Einsatz kommt eine Magnetpulverbremse, die es gestattet ein konstantes Bremsmoment in Unabhängigkeit von der Drehzahl zu erzeugen. Darüber hinaus ist dieser Bremsentyp besonders dazu geeignet den hohen Belastungen im sogenannten Dauerschlupfbetrieb zu widerstehen.

5.4 Normalkraft

Zur Erzeugung der Normalkraft in der Kontaktzone ist das Prüfrad an einem Hebel angebracht, der sich mit Hilfe von Gewichten, die über ein Stahlseil und Umlenkrollen an diesem Hebel befestigt sind, gegen die Gegenscheibe ziehen lässt. Auf diese Weise ist eine relativ einfache Erzeugung der Normalkraft in diskreten Schritten möglich. Darüber hinaus gelingt es

auf diese Weise durch die Eigenschaften der Massenträgheit der Gewichte, insbesondere die dynamischen Belastungen aus dem realen Einsatz gut nachzubilden.

Das Hebelverhältnis zwischen Prüfradaufnahme und Angriffspunkt der Zugkraft beträgt 2:1, so dass aus der Gewichtskraft der angehängten Gewichte die doppelte Normalkraft in der Kontaktzone resultiert. Die Gewichte selber haben eine Masse von jeweils 16,7 kg, zur feineren Abstufung stehen noch Gewichte mit 8,35 kg und 4,2 kg zur Verfügung. Damit ergibt sich eine Abstufung der Normalkraft in ca. 82 Newton-Schritten, was sich als ausreichend fein für die Abstimmung der Normalkraft erwiesen hat.

Die endgültige Wahl der Vorspannung erfolgt über die in Kapitel 5.1.1 bereits erläuterte Methode des statischen Kontaktflächenabdruckes, aus dem sich unabhängig von der Kraftverteilung eine sogenannte Kontaktflächenlänge L (vergl. **Abb. 4.11**) ermitteln lässt, die direkte Aussagen über die Verformung der Polymerbandage ermöglicht. In **Abb. 5.2** ist ein solcher statischer Kontaktflächenabdruck dargestellt.



Abb 5.3: Statischer Kontaktflächenabdruck eines Rades mit 100 mm Durchmesser und 85 Shore-A Bandage unter Einwirkung von 3.000 N Normalkraft; Kontaktflächenlänge $L = 22$ mm

Als sinnvolle Werte für die Kontaktflächenlänge haben sich die folgenden Werte erwiesen:

Raddurchmesser	Kontaktflächenlänge
100 mm	21 ... 23 mm
200 mm	27 ... 35 mm

Bei der Ermittlung der Normalkraft durch Messen der Kontaktflächenlänge ergibt sich weiterhin der Vorteil, dass der Einfluss der Bandagenstärke berücksichtigt wird, der ebenfalls großen Einfluss auf die Spannungsverteilung in der Kontaktfläche und in der Bandage hat.

5.5 Simulation von äußeren Einflussgrößen

Die äußeren Einflussgrößen, die bei der Durchführung der Versuche Beachtung finden sollen, sind primär Zwischenstoffe, die in der Kontaktfläche zwischen Prüfrad und Gegenscheibe vorkommen können. Diese Zwischenstoffe sind bereits in Kapitel 4.4 aufgezählt und kombiniert worden. Da die Ermittlung des Verschleißes unter Einwirkung dieser Zwischenstoffe der wesentliche Bestandteil der Arbeit, ist werden die Zwischenstoffe im Folgenden näher erläutert:

Quarzsand: Eingesetzt wird ein mittelfeiner Quarzsand wie in **Abb. 5.4** dargestellt eingesetzt.

Metallspäne: Es werden Metallspäne, wie sie bei der Zerspanung von Gusseisen entstehen verwendet. Diese Späne sind verhältnismäßig klein und scharfkantig (siehe **Abb. 5.5**).

Wasser: Für die Versuche wird normales Leitungswasser mit allen enthaltenen Zusatzstoffen verwendet.

Öl-Wasser-Emulsion: Als Schneid-Kühl-Flüssigkeit wird der Kühlschmierstoff Kutwell® BR40 der Firma Esso eingesetzt. Das Mischungsverhältnis in Wasser beträgt 6%. Da dieser Stoff sowohl reizend, als auch stark wassergefährdend ist, sind hier besondere Maßnahmen zum Schutz gegen Berührung und gegen das Abfließen in das Abwasser zu treffen.



Abb 5.4: Mittelfeiner Quarzsand zum Einsatz als Zwischenstoff.

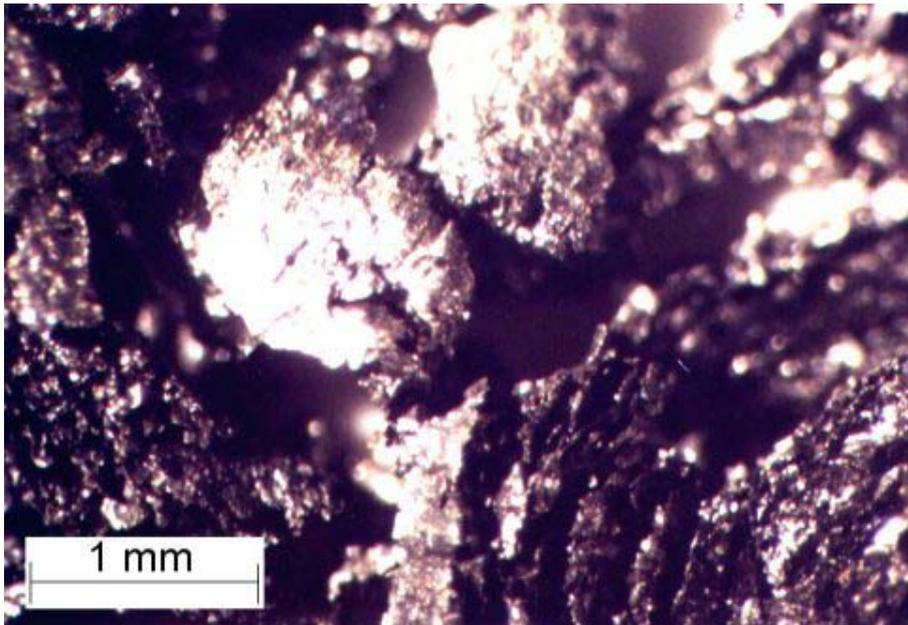


Abb 5.5: Metallspäne zum Einsatz als Zwischenstoff.

Zur Einbringung dieser Zwischenstoffe in die Kontaktfläche wird sowohl für flüssige als auch feste Stoffe Druckluft eingesetzt. Dabei wird für feste Stoffe durch eine geeignete Fördereinrichtung in Form eines Förderrades (siehe **Abb. 5.6**) der Zwischenstoff in den Luftstrom einer Düse eingebracht, die in Laufrichtung direkt in den Spalt zwischen Rädern und Schwungscheibe gerichtet ist. Für flüssige Stoffe wird ein Rohr, das über einen Kugelhahn mit dem Vorratsbehälter verbunden ist, in den Luftstrom der Düse gehalten.

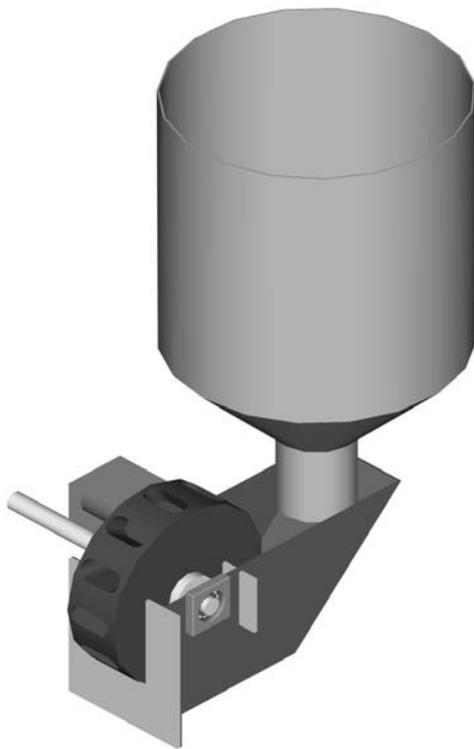


Abb 5.6: Vorrichtung zur Förderung fester Zwischenstoffe in den Luftstrom.

Nicht zu vernachlässigen bei der Verwendung von Druckluft zur Stoffeinbringung ist der kühlende Effekt. Jedoch wird durch zwei weitere Faktoren die Temperatur der direkten Radumgebung beeinflusst:

1. Als Gegenfläche wird eine Scheibe eingesetzt. Dies führt zwangsläufig zu einem vielfach wiederholten Überwälzen von Punkten auf dieser Scheibe, so dass eine kontinuierliche Erwärmung der Scheibe und damit eine Erhöhung der Temperatur in der Kontaktfläche auftritt.
2. Durch den räumlichen Abschluss des Versuchsraumes kommt es zu einer Erwärmung der Umgebungsluft durch die Kühlluft der Bremse und des Motors, so dass es auch hier zu einer Erhöhung der thermischen Belastung der Prüfräder kommt.

Diese beiden Effekte wirken der Kühlung der Bandage durch die Druckluft entgegen. Inwieweit die resultierende thermische Belastung des Prüfrades von der realen Belastung abweicht, ist auf diese Weise nicht genau zu ermitteln, jedoch ist es sinnvoll, diesen Einfluss in Kauf zu nehmen, um auf diese Weise eine senkrechte Anordnung der Drehachsen von Prüfrad und Gegenscheibe zu ermöglichen und so den Selbstreinigungseffekt, der sich aus dieser Anordnung ergibt, nutzen zu können (vergl. Kap. 4.3).

5.6 Eingebachte Zwischenstoffmengen

Neben der Wahl der Zwischenstoffe ist die Bestimmung der eingebrachten Menge an Zwischenstoff ein entscheidender Versuchsparameter. Wichtig ist unter diesem Aspekt insbesondere eine möglichst realitätsnahe Zwischenstoffmenge sowie ein über der Versuchsdauer stationärer Zwischenstofffluss.

Daher werden die Zwischenstoffmengen wie folgt festgelegt:

- Quarzsand: 0,5 ... 0,75 kg/h
- Metallspäne: 0,6 ... 0,8 kg/h
- Wasser: 4 ... 5,5 l/h
- Öl-Wasser-Emulsion: 4 ... 5,5 l/h

Werden die Zwischenstoff in den dargestellten Mengen in die Kontaktfläche eingebracht, ist während der gesamten Versuchsdauer ein permanentes Vorhandensein von Partikeln bzw. Flüssigkeit zwischen Prüfrad und Gegenscheibe gewährleistet. Eingestellt wird die Zwischenstoffmenge durch Regulierung der Speisespannung, mit der die Fördermotoren und Pumpenmotoren angetrieben werden.

6 Versuchsdurchführung

6.1 Grundlegende Betrachtungen zur Belastung eines Reibrades

Wie in Kap. 5 erläutert resultiert die Belastung eines angetriebenen Rades im Wesentlichen aus den folgenden Beanspruchungen:

- Normalkraft
- Tangentialkraft
- Drehzahl
- Schlupf

Aus Normal- und Tangentialkraft resultiert eine Spannungsverteilung im Rad, aus der sich die Beanspruchung des Werkstoffes ergibt. Bei Rädern mit polymerer Bandage hat insbesondere die Spannungsverteilung in der Bandage Einfluss auf die Beanspruchung des Rades, da der polymere Werkstoff aufgrund seiner geringeren Festigkeitswerte wesentlich näher an seiner Belastungsgrenze liegt als der metallische Werkstoff der Radnabe.

Nach [küh] und [sev89a] liegen die Orte maximaler Spannung und damit maximaler Deformation einmal direkt in der Teilfuge zwischen metallischer Nabe und polymerer Bandage und weiterhin in der Bandagenmitte einige Millimeter unterhalb der Oberfläche.

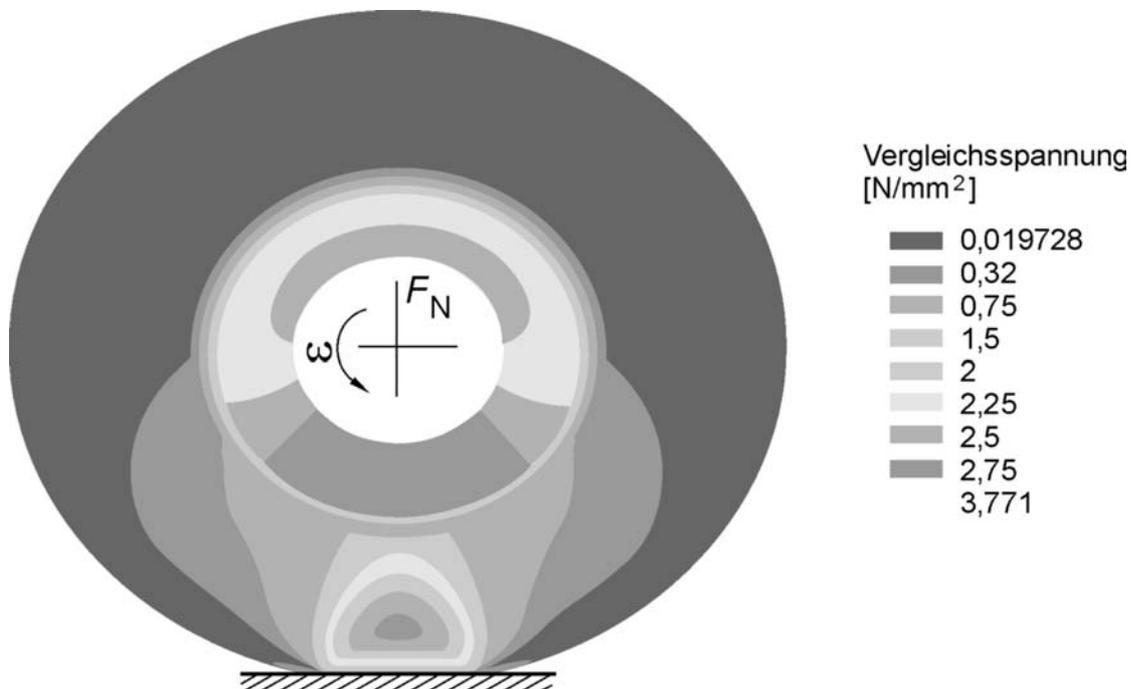


Abb. 6.1: Verteilung der Vergleichsspannung im rollenden Radkörper mit Stahlhülse und Polymerbandage nach Liu [liu00]

Während in der Teilfuge die Wärme gut über die Metallhülse abgeführt werden kann, führt die hohe Dämpfung in Verbindung mit der schlechten Wärmeleitfähigkeit von polymeren Werk-

stoffen zu einer hohen thermischen Belastung unterhalb der Oberfläche der Bandage. Diese Eigenschaft führt bei mechanischer Überlastung zu einem Aufschmelzen des Werkstoffes und ist der Hauptausfallgrund für derartige Räder (vgl. auch **Abb. 4.2**). Aus der Drehzahl ergibt sich die Anzahl der Überwalkungen eines Volumenelementes der Bandage pro Zeiteinheit. Damit nimmt sie direkten Einfluss auf die Höhe der mechanischen und damit thermischen Belastung, da die Menge des Wärmetransportes durch die Bandage eingeschränkt ist.

Diesen Beanspruchungen überlagert sich zusätzlich der Schlupf, der sich aus dem sogenannten Leerlaufschlupf, der aus der hohen Verformung der Bandage resultiert (vgl. Kap. 2.2), und dem Lastschlupf, der sich aus der Tangentialkraft ergibt, zusammensetzt. Die Beanspruchung durch den Schlupf lässt sich in zwei Teile unterscheiden. Auf der einen Seite resultiert aus der mit dem Schlupf einhergehenden Reibung eine zusätzliche thermische Belastung, auf der anderen Seite wird die Bandagenoberfläche durch abrasive Vorgänge direkt mechanisch belastet. Diese Belastung ist direkt abhängig von der Beschaffenheit der Gegenfläche, da der polymere Werkstoff aufgrund der angesprochenen Fähigkeit der hohen Dehnbarkeit die Fähigkeit besitzt, sich mit den Rauigkeitsspitzen der Gegenfläche zu verzahnen. Auf diese Weise kann es partiell zu sehr hohen Haftreibungskoeffizienten kommen, was unter Einwirkung einer hohen tangentialen Kraft dazu führt, dass die Dehngrenze des Werkstoffes überschritten wird und sich ein Risskeim ausbildet, der sich bei weiterer Überwalkung und Beanspruchung durch Dehnung weiter ausbreitet.

Dieses Beanspruchungskollektiv und die damit einhergehenden Zusammenhänge machen die nachfolgend näher erläuterten Messungen zur Überwachung der tatsächlich auftretenden Beanspruchung der untersuchten Räder erforderlich.

6.2 Durchgeführte Messungen

Bandagenhärte / -abmessungen

Bereits bei Anlieferung der Räder werden die folgenden Parameter festgehalten:

- Bandagenhärte nach DIN 53505 Shore-A
- exakter Raddurchmesser
- Bandagenbreite
- Bandagenstärke
- Ausgangsgewicht

Auf diese Weise wird späteren Verwechslungen vorgebeugt.

Obwohl bei der Messung der Bandagenhärte ab 90 Shore-A die Messung nach Shore-D vorgesehen ist, wird für die Prüflinge mit einer 92 Shore-A-Bandage (entspricht 36 Shore-D), im Einklang mit der branchenüblichen Bezeichnung, die Härte dennoch in Shore-A angegeben.

Normalkraft

Um die Räder realitätsnah und unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften der Bandage vergleichbar zu belasten, wird ein Verfahren angewendet, mit dessen Hilfe es erreicht wird, dass die Dehnung aufgrund der Normalkraft für unterschiedliche Bandagenhärten nahezu konstant bleibt. Hierzu wird im Stillstand mit Hilfe von Tuschierpaste ein Kontaktflächenabdruck angefertigt, dessen Länge anschließend gemessen wird (vgl. Kap. 5.1.4). Für Rollen mit gleicher Belagstärke wird nun die Normalkraft so lange variiert, bis sich der gewünschte Wert von ca. 21 – 23 mm für Rollen mit 100 mm Durchmesser bzw. 27 – 35 mm für Rollen mit 200 mm Durchmesser einstellt. Die so festgelegte Normalkraft wird im Versuchsprotokoll (siehe Anhang B) festgehalten. Diese Normalkraft wird sich aufgrund der Versuchsstandkonstruktion im weiteren Versuchsablauf nicht mehr ändern.

Umgebungsbedingungen

Da die Umgebungsbedingungen insbesondere für die Alterung des Werkstoffes Polyurethan eine wichtige Rolle spielen, werden sowohl vor als auch nach jedem Versuch die Umgebungslufttemperatur und die relative Luftfeuchte gemessen und festgehalten. Hierzu wird ein handelsübliches Thermometer sowie ein einfaches Hygrometer zur Wandmontage eingesetzt.

Rauhtiefe der Gegenfläche

Bereits in Kapitel 6.1 wurde der Einfluss der Gegenflächenrauigkeit dargestellt. Aus diesem Grund wird die Rauhtiefe der Schwungscheibenoberfläche gemessen. Da sich durch Einwirkung von abrasiven Zwischenstoffen die Beschaffenheit der Oberfläche ändern kann, wird die Rauhtiefe jeweils vor und nach jedem Versuch gemessen. Die Messung erfolgt mit einem elektrischen Tastschnittgerät der Firma Hommelwerke Schweningen. Ermittelt wird die mittlere Rauhtiefe R_z nach DIN 4768. Da davon ausgegangen werden kann, dass in den meisten logistischen Systemen keine besonders glatten Oberflächen als Lauffläche für Antriebsräder verwendet werden, ist eine Ausgangsrauhtiefe von $R_z = 25 \mu\text{m}$ als ausreichend glatt zu betrachten. Sollte während der Durchführung der Versuche dieser Wert überschritten werden, wird die Schwungscheibe erneut spangebend bearbeitet, bis die Ausgangsrauhtiefe wieder erreicht worden ist.

Radgewicht / -durchmesser

Die wichtigsten Indikatoren für den Verschleiß der Bandage sind die Abnahme des Radgewichtes und des Raddurchmessers. Daher wird ihr Verlauf in konkreten Abständen überprüft und aufgezeichnet. Wichtig ist hier neben der Erfassung des Abriebes und der Durchmesserabnahme über die gesamte Versuchsdauer insbesondere eine genauere Betrachtung zu Beginn der Versuche. Aus diesem Grund wird das Rad im ersten Drittel der Versuche in regelmäßigen Abständen ausgebaut, vermessen und gewogen. Bei der Durchmesserermittlung ist darüber hinaus die Berücksichtigung der Ausdehnung infolge der Raderwärmung von Bedeutung; daher ist es wichtig, nach Versuchsende das Rad abkühlen zu lassen und den Durchmes-

ser erneut zu messen (Siehe auch Anhang B „Bewertungsformular zur Beschreibung und Analyse von Verschleißvorgängen“).

Drehzahl

Die Drehzahl ist, wie bereits angesprochen, eine der wesentlichen Einflussgrößen auf die Belastung einer Schwerlastrolle. Aus diesem Grund wird die Drehzahl ständig überwacht und zur späteren Ermittlung des Schlupfes aufgezeichnet. Aus Katalogangaben der Hersteller ergibt sich eine übliche Höchstgeschwindigkeit für Schwerlastrollen von maximal ca. 10 km/h (vergl. Kap. 4.6). Bei einem Schwungscheibendurchmesser von 0,6 m ergibt sich eine Schwungscheibendrehzahl von ca. 88 U/min. Da der Trend in logistischen Systemen jedoch zu immer höheren Fördergeschwindigkeiten geht, wird die Drehzahl der Schwungscheibe auf ca. 100 U/min festgelegt, was für die Rollen in Abhängigkeit vom Durchmesser den folgenden Drehzahlen entspricht:

$$n_{\varnothing 100} = 600 \text{ U/min}$$

$$n_{\varnothing 200} = 300 \text{ U/min}$$

Hieraus ergibt sich eine erhöhte mechanische Belastung, die insbesondere bei den kleineren Rollen einen kritischen Wert erreichen kann. Da jedoch die Normalkraft nicht exakt aus den Katalogangaben übernommen wird, kann eine Anpassung der mechanischen Beanspruchung über die Vorspannung erfolgen. Diese entspricht in der Praxis einer höheren Dimensionierung der Räder für höhere Geschwindigkeiten.

Schlupf

Bereits erwähnt wurde, dass sich der Schlupf aus dem Leerlaufschlupf und dem Lastschlupf zusammensetzt. Die Höhe des Leerlaufschlupfes steht in direktem Zusammenhang mit der Höhe der Normalkraft, während sich der Lastschlupf aus der Höhe der übertragenen Tangentialkraft ergibt. Da sich über die Regulierung der Normalkraft über das Messen der Kontakflächenlänge für die Versuche ein näherungsweise konstanter Leerlaufschlupf ergibt, ist es für die Betrachtung des Einflusses, den der Schlupf auf den Verschleiß ausübt, ausreichend, den Lastschlupf zu ermitteln. Hierzu wird die Drehzahl von Motor und Schwungscheibe aufgenommen. Da sich zwischen Motor und Schwerlastrolle ein formschlüssiges Zahnriemenge triebe befindet, ist mit diesem Wert direkt die Rollendrehzahl verknüpft. Zu Versuchsbeginn wird das Schlupfmesssystem eingemessen, indem die Rolle unter Einwirkung der vollen Normalkraft die ungebremste Schwungscheibe antreibt. Auf diese Weise werden der Leerlaufschlupf und eventuelle Fertigungsungenauigkeiten im Durchmesser der Rollen bei der Ermittlung des tatsächlichen Übersetzungsverhältnisses zwischen Rolle und Schwungscheibe eliminiert. Mit diesem tatsächlichen Übersetzungsverhältnis und bei bekannter Rollendrehzahl wird mittels eines PC's eine Soll-Drehzahl der Schwungscheibe ermittelt, die während der gesamten Versuchsdauer mit der Ist-Drehzahl verglichen wird. Abweichungen ergeben sich aus dem Schlupf, der aus der Übertragung der Tangentialkraft resultiert, also ausschließlich

dem Lastschlupf; sie werden von dem angeschlossenen PC über die gesamte Versuchsdauer einmal pro Sekunde (d.h. mit einer Frequenz von 1 Hertz) aufgezeichnet.

Bremsmoment

Aus dem Bremsmoment lässt sich bei bekanntem Schwungscheibendurchmesser die Tangentialkraft in der Kontaktfläche ermitteln. Daher ist das Bremsmoment ein entscheidender Einflussfaktor auf die Höhe der mechanischen Beanspruchung der Bandage. Aus diesem Grunde wird das Bremsmoment, ebenso wie der Schlupf, mit einer Frequenz von 1 Hertz gemessen und über die gesamte Versuchsdauer aufgezeichnet. Zum Einsatz für die Momentmessung kommt eine 500 Nm Drehmomentmessnabe der Firma Dr. Staiger, Mohilo & Co., die über einen Messverstärker ihr Signal an einen weiteren PC weitergibt, der mit dem Messaufnahmesystem „Messview“ der Firma MessTeam Fröndenberg ausgestattet ist.

Belagtemperatur

Die Belagtemperatur ist ein wichtiger Indikator für den Belastungszustand der Bandage. Obwohl die maximale Temperatur innerhalb der Bandage entsteht, lassen sich durch Beobachtung der Oberflächentemperatur Rückschlüsse auf die thermische Beanspruchung des Bandagenwerkstoffes ziehen. Aus diesem Grund wird auch die Oberflächentemperatur der Bandage während der gesamten Versuchsdauer analog zu Schlupf und Bremsmoment mit einer Frequenz von 1 Hertz gemessen und aufgezeichnet. Zum Einsatz kommt hierzu ein Infrarotmesskopf der Firma Raytek, der mit einem Öffnungswinkel von $2,9^\circ$ auf die Mitte der Bandage zielt. Weiterhin wird ein Digitalthermometer mit Einstechfühler verwendet, um während der Gewichts- und Durchmesser messungen die Oberflächentemperatur zusätzlich zu ermitteln. Dieses Kontakthermometer wurde auch zur Bestimmung des sogen. Emissionsgrades von Polyurethan herangezogen, um den Infrarotmesskopf zu kalibrieren. Dieser Emissionsgrad beschreibt die Fähigkeit eines Objektes bzw. Werkstoffes, infrarote Strahlung zu absorbieren und abzustrahlen. Der Wert kann zwischen 0 (Spiegel) und 1,0 (schwarzer Strahler) liegen. Der Emissionsgrad von Polyurethan wurde mit 0,95 ermittelt.

Zur Aufzeichnung der Temperaturdaten dient dasselbe Messaufnahmesystem wie für die Bremsmomentmessung.

Zwischenstoffdurchsatz

Die Menge des insgesamt pro Versuch durchgesetzten Zwischenstoffes liefert Informationen über die im Mittel tatsächlich in der Kontaktfläche vorhandene Menge von Störstoffen und ist deshalb ein wichtiges Maß zur Festlegung und Anpassung der Randbedingungen an reale Einsatzfälle und zum Vergleich der Versuche untereinander. Ermittelt wird die Menge durch Wiegen des in den Vorratstrichter bei festen bzw. den Vorratstank bei flüssigen Zwischenstoffen eingebrachten Volumens. Auf diese Weise wird nicht absolut exakt die in der Kontaktfläche vorhandene Menge an Zwischenstoff ermittelt, jedoch ist es so möglich, vergleichsweise einfach die als abrasiv wirkender Stoff zur Verfügung stehende Menge an Zwischenstoff zu

bestimmen und auf diese Weise ihren Einfluss auf das Verschleißverhalten zu berücksichtigen. Zur gleichmäßigen Verteilung von festen Zwischenstoffen über die gesamte Versuchsdauer dient die Fördereinrichtung, die bereits in Kapitel 5.1.5 erläutert worden ist.

Oberflächenbild der Bandage

Um eine Beurteilung des Verschleißverhaltens zu ermöglichen ist es wichtig, die Bandagenoberfläche zu beobachten. Aus diesem Grund wird bei den Messungen, die während des Versuches durchgeführt werden, und nach Abschluss der Versuche die Oberfläche der Bandage optisch untersucht. Die dabei festgestellten Besonderheiten werden schriftlich festgehalten. Zusätzlich wird die Bandagenoberfläche nach Versuchsende mikroskopiert, um auf diese Weise Rückschlüsse auf mögliche Verschleißmechanismen zu ermöglichen.

Reibungsbeiwert

Nach Abschluss der Versuche wird der tatsächliche Reibungsbeiwert μ , der zur Übertragung der Tangentialkraft erforderlich war, rechnerisch aus Bremsmoment M_B , Schwungradradius r und Normalkraft F_N ermittelt. Hierzu dient die folgende Formel:

$$\mu = \frac{M_B}{r \cdot F_N} \quad (6.1)$$

Zu berücksichtigen ist dabei, dass der Reibungsbeiwert stark von der Art des eingebrachten Zwischenstoffes abhängt.

6.3 Versuchsprogramm

Eine der Hauptbelastungsgrößen der polymeren Bandage eines Schwerlastrades ist die innere Erwärmung aufgrund der Werkstoffdämpfung. Diese Erwärmung nimmt mit fortlaufender Belastungsdauer stetig zu, bis sie ein Maximum erreicht, dessen Höhe von der Höhe der mechanischen Belastung und der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes abhängig ist (siehe **Abb. 6.2**). Liegt die mechanische Belastung innerhalb der für das einzelne Rad vorgesehenen Grenzen, so liegt die thermische Belastung unterhalb des für den polymeren Werkstoff zulässigen Höchstwertes. Es ist daher notwendig, die Versuchsdauer so festzulegen, dass das Rad eine ausreichende Zeit im Bereich maximaler thermischer Belastung läuft. Eine Versuchsdauer von 24 Stunden erscheint hierfür ausreichend. Auch hat sich gezeigt, dass nach 24 Stunden der Verschleiß des Rades ein verwertbares Volumen erreicht hat.

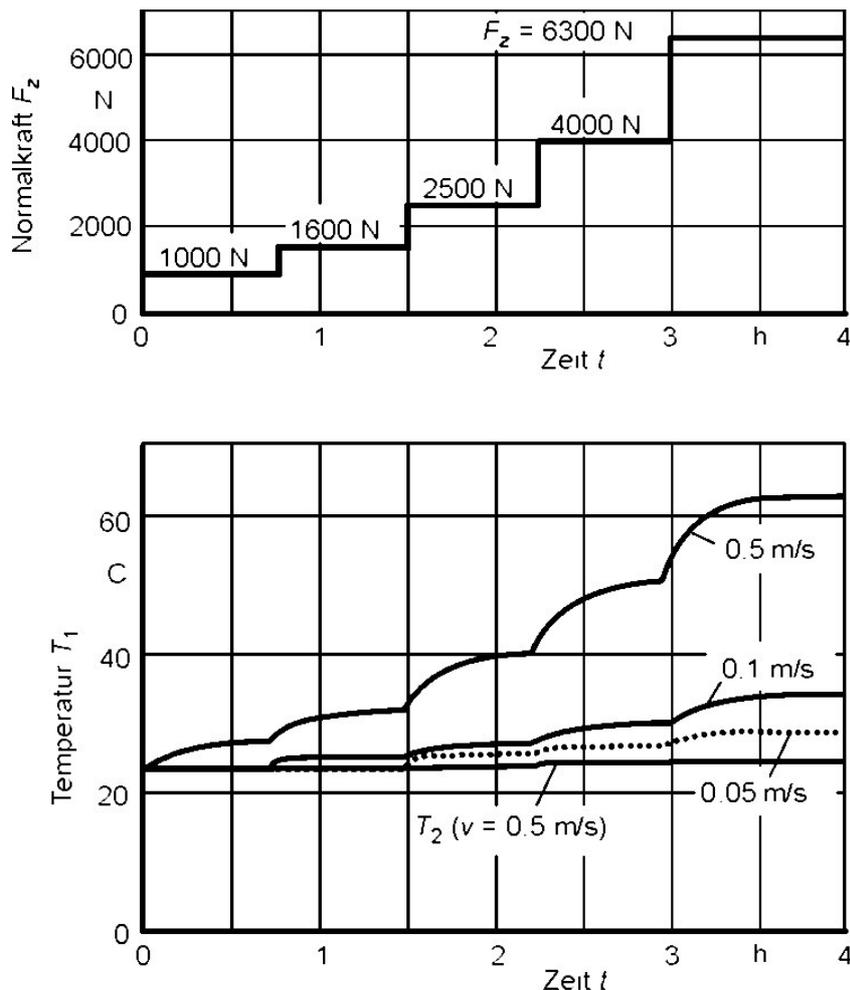


Abb. 6.2: Temperaturverlauf im Innern einer Polyurethanbandage aufgetragen über die Zeit in Abhängigkeit von der Normalkraft und der Rollgeschwindigkeit nach Hammele [ham97].

Aus **Abb. 6.2** lässt sich ablesen, dass sich die maximale Temperatur bei Rädern mit Polyurethanbandage nach ca. 45 Minuten einpendelt. Obwohl der genaue Zeitpunkt abhängig von den Radabmessungen Breite und Durchmesser und der Bandagenstärke ist, lässt sich dieser Zeitraum als Größenordnung bei der Durchführung von Versuchen beachten.

Berücksichtigt man, dass bereits nach 0,5 Stunden ca. 80% der endgültigen Bandagentemperatur erreicht sind, so kann man bei einer Unterteilung der Versuche in maximal vier Teilversuche davon ausgehen, dass im Vergleich zu einem durchgehenden Versuch nur 1,5 Stunden nicht die korrekte thermische Belastung auf die Bandage eingewirkt hat. Bei einer Versuchsdauer von 24 Stunden entspricht dies einem Anteil von 6,25 %. Zusätzlich sollten die Teilversuche eine Dauer von 3,5 Stunden nicht unterschreiten.

Der Schlupf wird nach Einmessen des Übersetzungsverhältnisses ohne Tangentialkraftübertragung zu Beginn des Versuches über die Variation des Bremsmomentes auf einen Wert von ca. 5 bis 10 % eingestellt. Vorversuche haben ergeben, dass sich bei Überschreiten von 10 % Schlupf die Differenzdrehzahl unkontrolliert erhöht und schließlich einen Wert von 100 %

erreicht. Da aufgrund der Wärmeentwicklung in der Bremse das Bremsmoment bei konstanter magnetischer Erregung variieren kann, wird dieser Wert zu Beginn der Versuche besonders überwacht und gegebenenfalls nachgeregelt.

Die Werkstoffeigenschaften von Polymeren sind unter dynamischer Belastung nicht konstant. So beeinflusst z. B. der E-Modul über die Spannungsverteilung die Temperaturentwicklung innerhalb der Bandage, wird auf der anderen Seite aber selber von der Temperatur beeinflusst. Diese Eigenschaft ist der Hauptgrund für die Schwierigkeiten bei der analytischen Ermittlung der maximalen mechanischen Belastung. Abhilfe schaffen hier numerische Rechenwege, die zu Genüge existieren und in Kap. 2 genannt sind. Eine Folge dieser Eigenschaft ist jedoch, dass immer Unsicherheiten bestehen, ob ein Rad den Belastungen aus der vorhandenen Normalspannung auf Dauer standhält. Aus diesem Grund wird in den ersten fünf Stunden jedes Versuches die Bandage mehrmals überprüft; dabei werden die folgenden Werte ermittelt:

Nach jeweils $\frac{1}{2}$, 1, 2, 3 und 5 h Versuchsdauer:

- Oberflächentemperatur mit Kontaktthermometer
- Raddurchmesser
- Radgewicht
- Optische Prüfung der Bandagenoberfläche
- Optische Prüfung der Teilfuge zwischen Bandage und Metallkern auf Ablösungen

Diese Messungen werden ebenfalls nach 24 Stunden Versuchsdauer und Abschluss des Versuches wiederholt.

Auf diese Weise wird es erreicht, dass der Verschleiß der Bandagen der 100 mm Räder unter maximaler mechanischer Belastung ermittelt wird. Für die Räder mit 200 mm Durchmesser reicht die Vorrichtung zum Aufbringen der Normalkraft insbesondere bei harten Bandagenwerkstoffen nicht aus, um die Räder an die Grenzen ihrer Belastbarkeit zu beanspruchen. Aus diesem Grund wird mit diesen Rädern der Verschleiß unter Teilbeanspruchung untersucht. Darüber hinaus werden Versuche die bereits bei Rädern mit 100 mm Durchmesser nur geringfügigen Verschleiß gebracht haben mit diesen Räder nicht durchgeführt. Dies betrifft insbesondere die Zwischenstoffe Schneid-Kühl-Emulsion und Schneid-Kühl-Emulsion zusammen mit Spänen.

6.4 Ermittlung des Verschleißes

Da die Ermittlung des Verschleißes den Kernaspekt der Untersuchungen darstellt, wird auf die Ermittlung und die Bedeutung an dieser Stelle nochmal genauer eingegangen. Grundsätzlich stehen zur Ermittlung des Verschleißes die folgenden Messgrößen zur Verfügung:

- Durchmesserabnahme des Rades
- Gewichtsabnahme des Rades

– Volumenabnahme des Rades

Bei der Ermittlung des Verschleißes mit Hilfe einer dieser Methoden lassen sich die folgenden Schwierigkeiten bzw. Fehlerquellen erwarten:

Bei der Messung der **Durchmesserabnahme** besteht das Problem, dass aufgrund der hohen Elastizität von Polyurethan in Zusammenhang mit ungleichmäßiger Anpresskraft des Messinstrumentes Messfehler auftreten. Darüber hinaus ist der Durchmesser von Schwerlasträdern nicht auf dem gesamten Umfang exakt gleich, so dass der gemessene und zur Verschleißermittlung kontrollierte Durchmesser markiert werden muss. Ein weiteres Problem ist die Eigenschaft von Schwerlasträdern, nicht auf der gesamten Bandagenbreite gleichmäßig zu verschleifen. Aufgrund der Normalspannungsverteilung ist sowohl der Schlupf als auch die Tangentialspannungsverteilung nicht konstant auf der Bandagenbreite, so dass sich auch eine ungleichmäßige Verteilung des Abriebes über die Breite ergibt. Dieses Problem lässt sich nur umgehen, wenn der Durchmesser auf mehreren Stellen über die Bandagenbreite ermittelt wird, was in der Praxis sehr umständlich und zeitaufwändig ist.

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass der Raddurchmesser in Abhängigkeit von der Radtemperatur variiert. Bei den zu erwartenden zum Teil sehr geringen Verschleißraten ist dieser Effekt nicht zu vernachlässigen. Eine Abkühlung des untersuchten Rades während jedes Messvorganges ist jedoch nicht praktikabel und würde darüber hinaus die thermische Beanspruchung während des Versuches verfälschen. Somit ist die Ermittlung der Durchmesserabnahme lediglich zur allgemeinen Überwachung des Verschleißes geeignet.

Die **Gewichtsabnahme** des Rades steht in direktem Zusammenhang mit der Menge an von der Bandagenoberfläche abgeriebenen Werkstoff. Aus diesem Grund ist die Gewichtsermittlung sehr gut zur Verschleißmengenbestimmung geeignet. Probleme können sich jedoch aus an der Bandage anhaftenden Partikeln ergeben. Aus diesem Grund ist es notwendig, das Rad vor jeder Messung gründlich zu reinigen bzw. zu trocknen. Da der Verschleiß unter Einwirkung von zum Teil abrasiven Zwischenstoffen ermittelt werden soll, ist es möglich, dass sich eine nicht unerhebliche Menge von Zwischenstoffpartikeln in die Bandagenoberfläche einarbeiten. Auch dieser Aspekt darf bei der Auswertung der Versuchsergebnisse nicht unberücksichtigt gelassen werden. Obwohl der Einfluss der Temperatur keinen direkten Einfluss auf das Gewicht eines Proberades hat, ist es durchaus möglich, dass es unter gleichzeitiger Einwirkung von Wasser als Zwischenstoff und erhöhter Temperatur zu einem messbaren Aufquellen des Werkstoffes Polyurethan kommt. Auch diesem Aspekt ist bei der Versuchsauswertung Rechnung zu tragen.

Bei der Messung **Volumenabnahme** bestehen prinzipiell die gleichen Probleme wie bei der Durchmesserermittlung (Wärmeausdehnung) und bei der Gewichtsermittlung (eingelagerte Fremdkörper). Darüber hinaus ist die Volumenmessung eines vergleichsweise kompliziert geformten Körpers wie eines Schwerlastrades nur durch Auslitern mit ausreichender Genau-

igkeit zu realisieren. Dieses Verfahren ist jedoch auf der einen Seite recht umständlich und birgt auf der anderen Seite den Nachteil, dass bei ungeeignet temperierter Flüssigkeit das Proberad abgekühlt wird und dadurch, wie bereits angesprochen, die thermische Beanspruchung des Rades verfälscht wird. Aus diesen Gründen wird auf eine Ermittlung der Volumenänderung verzichtet.

6.5 Bandagenwerkstoffe

Schwerlasträder finden neben dem Einsatz in reibschlüssigen Antriebssystemen auch eine weite Verbreitung in Fördergeräten. Insbesondere in Fahrzeugen wie Gabelstaplern, Kommissionierfahrzeugen und auch Elektrohängebahnen mit einem Einsatzbereich, der überwiegend überdacht ist, werden häufig derartige Räder eingesetzt. Dabei werden die Räder oft erheblichen Beanspruchungen ausgesetzt. Raue Böden, Lenkbewegungen im Stand, Überfahren von Bodenfugen und Kanten fördern die Bildung von feinen Rissen, die sich im Material fortbilden können und im Extremfall zum Ausbrechen ganzer Belagteile führen. Zusätzlich werden die Räder während der Fahrt durch Antriebskräfte, Normalkräfte und zum Teil erhebliche Querkräfte dynamisch belastet, was zu einer Erwärmung durch innere Reibung führt. Darüber hinaus wird in vielen Anwendungsbereichen eine Beständigkeit gegen chemische Stoffe, mineralische Öle, Schmierstoffe, Sonnenlicht, Temperaturschwankungen u. s. w. gefordert.

Da sich Polyurethane systematisch auf diese Eigenschaften bzw. deren Vermeidung einstellen lassen, haben sie sich gegen Gummi als Bandagenwerkstoff für Schwerlasträder in den vergangenen Jahrzehnten durchgesetzt. Der Vorteil von Polyurethan liegt dabei im chemischen Aufbau, da hier kurze fadenförmige Moleküle, die sogenannten Polyole, mit Hilfe von Diisocyanaten und einem weiteren Vernetzer ein extrem haltbares Netzwerk bilden, das gezielt durch die Dosierung der einzelnen Bestandteile konstruiert werden kann (vergleiche auch Kap. 4.1).

Im Einsatz für angetriebene Räder haben sich die folgenden Werkstoffe durchgesetzt:

- NDI-Polyurethan (Handelsname: Vulkollan[®])
- MDI-Polyurethan

Aus diesem Grund werden die Untersuchungen auf diese Kunststoffe beschränkt. Die zu untersuchenden Werkstoffhärten sind bereits in Kapitel 4.6 festgelegt worden.

Sogenannte TDI-Polyurethane mit dem krebserregenden Vernetzer MBOCA werden auch aufgrund ihrer geringeren Verbreitung nicht untersucht.

6.6 Schlupfverhalten

Der Schlupf stellt die wesentliche Einflussgröße auf das Verschleißverhalten von kraftschlüssig arbeitenden Antrieben dar. Jeder derartige Antrieb läuft bei Leistungsübertragung mit Schlupf. Gemäß Definition ist der Schlupf s im untersuchten Fall die Differenz in den Oberflächengeschwindigkeiten zweier aufeinander abwälzender zylindrischer Körper.

$$s = \frac{v_1 - v_2}{v_1} = \frac{r_1\omega_1 - r_2\omega_2}{r_1\omega_1} \quad (6.2)$$

Der Index „1“ bezeichnet das treibende, der Index „2“ das getriebene Rad. Der Berechnung zugrunde gelegt wird dabei die Oberflächengeschwindigkeit eines undeformierten Körpers, dies ist insbesondere unter Berücksichtigung der relativ großen Dehnungen in der polymeren Bandage von Bedeutung.

Wie bereits in Kapitel 2.2, **Abb. 2.1** dargestellt, wird die Kontaktzone zwischen einem Rad mit polymerer Bandage und einem Rad aus einem Werkstoff mit einer Festigkeit, die um Größenordnungen höher liegt, unterteilt in ein Gebiet, in dem Haftung und eines, in dem Gleiten herrscht. Das Gleitgebiet wird nur in dem Fall zu Null, wenn keine Deformation vorliegt, aus diesem Grunde spricht man auch vom sogenannten Deformationsschlupf. Das bedeutet, dass auch mit dem bloßen Auftreten von Normalkraft und noch ohne Leistungsübertragung sich Gleitgebiete in der Kontaktzone ausbilden. In diesem Fall spricht man vom sogenannten Leerlaufschlupf, der ausschließlich von der Steifigkeit der Bandage und der wirkenden Normalkraft abhängt.

Bei Übertragung einer Tangentialkraft F_T wird das Verhältnis von Tangentialkraft und der in der Kontaktzone aufgrund der Anpressung wirkenden Normalkraft F_N als Kraftschlussbeiwert f bezeichnet (vergl. **Abb. 6.3**). Beträgt die zu übertragende Umfangskraft 25 % der Anpresskraft ($f = 0,25$), so besteht nach *Strothmann* [str75] fast noch im gesamten Gebiet Haften, erst im Auslauf der Kontaktfläche macht sich eine Gleitbewegung bemerkbar. Eine Steigerung des Kraftschlussbeiwertes auf $f = 0,85$ ergibt ein Gleitgebiet, das sich etwa über die Hälfte der Kontaktfläche erstreckt. Bei noch weiter vergrößerten Kraftschlussbeiwerten bildet sich eine weitere Gleitzone im Einlauf der Kontaktfläche aus und die Gleitbewegungen werden sehr groß, wodurch eine entsprechende Auswirkung auf das Verschleißverhalten zu erwarten ist.

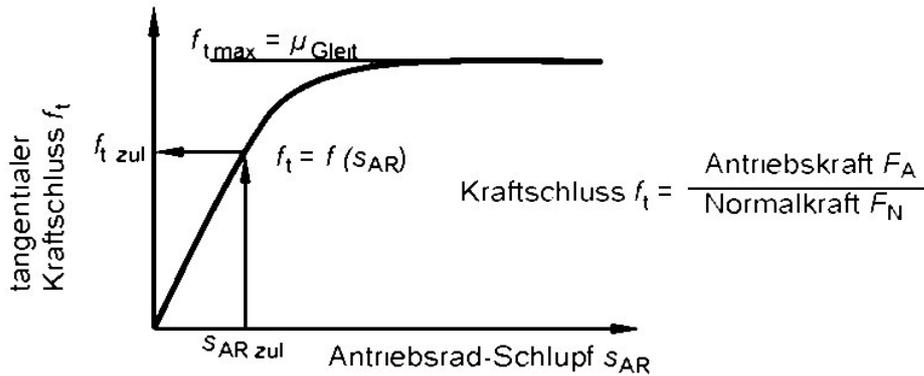


Abb. 6.3: Allgemeine Kraftschluss-Schlupf-Kurve bei Wälzreibung nach *Hager* und *Will* [hag98]

Ist kein Haftgebiet vorhanden, so ergibt sich der Schlupf aus der Formänderung und der Gleitbewegung. Für die Geschwindigkeiten der Bandagenoberfläche in einem Punkt der Berührfläche gilt allgemein:

$$v_i = r_i \cdot \omega_i \cdot (1 + \varepsilon_i) \quad , \text{ mit } i = 1, 2 \quad (6.3)$$

Für die Dehnung ε gilt die Beziehung:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6.4)$$

Dabei ist Δl die Längenänderung der Probe, die auf die Ausgangslänge l_0 bezogen wird.

Eingesetzt in Formel 6.2 errechnet sich der Schlupf damit zu:

$$s = \frac{\frac{v_1}{(1 + \varepsilon_1)} - \frac{v_2}{(1 + \varepsilon_2)}}{r_1 \omega_1} \quad (6.5)$$

Sackmann [sac80] entwickelt in einer Reihenentwicklung nach ε_1 und ε_2 daraus die gebräuchliche Schlupfbeziehung:

$$s = \frac{v_1 - v_2}{r_1 \omega_1} - \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (6.6)$$

Diese Beziehung zeigt, dass Schlupf beim Rollen auch ohne Gleiten durch tangentielle Dehnung hervorgerufen wird. Dies bedeutet, dass neben dem Leerlaufschlupf aus der Deformation durch die Normalkraft ein Schlupf aus der Deformation durch die leistungsübertragende Tangentialkraft überlagert wird.

Da der Leerlaufschlupf systembedingt ist und sich bei Werkstoffpaarungen mit stark unterschiedlichen E-Moduln nicht vermeiden lässt, ist sein Einfluss auf das Verschleißverhalten der polymeren Bandage von untergeordneter Bedeutung. Vielmehr ist die Ermittlung des

Schlupfes infolge von Tangentialkraft und sein Einfluss auf den Verschleiß von Interesse. Deshalb ist es notwendig, diese Schlupfart zu ermitteln und zu messen.

Zu diesem Zweck wird wie in Kap. 5.1.1 zunächst die Drehzahl der Antriebswelle und die der Gegenscheibe gemessen. Zum Einsatz kommen hierzu optische Lichtschrankenähler. Durch einen Einmessvorgang wird der tatsächlich vorhandene Übersetzungsfaktor ermittelt. Bringt man nun bereits beim Einmessen die gewünschte Normalkraft auf, wird bereits bei der Ermittlung des Übersetzungsfaktors der Leerlaufschlupf berücksichtigt. Für den weiteren Verlauf des Versuches ist es nurmehr erforderlich, die tatsächlich vorhandene Gegenscheibendrehzahl mit der mit Hilfe der Übersetzungsfaktors ermittelten Soll-Drehzahl zu vergleichen. Die Differenzdrehzahl multipliziert mit dem Umfang der Gegenscheibe ergibt somit die Gleitstrecke, die durch den Schlupf entstanden ist. Diese Differenzdrehzahl wird über die gesamte Versuchsdauer mit einer Taktzeit von einer Sekunde ermittelt und aufgezeichnet.

6.7 Zuverlässigkeit der durchgeführten Messungen

Da die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen stets mit Fehlern behaftet sind, ist es erforderlich, die Messergebnisse im Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit kritisch zu betrachten. Grundsätzlich lassen sich Messfehler unterscheiden in systematische und zufällige Fehler.

Als systematische Fehler lassen sich Fehler bezeichnen, deren Entstehung direkt durch die Art der Versuchsdurchführung initiiert wird. Zu nennen sind hier:

- Fehler in der Schlupfmessung durch reversible Verformungen der Polymerbandage.
- Fehler in der Normalkraftmessung durch dynamische Vorgänge.
- Fehler in der Tangentialkraftmessung durch Verlustreibung in Lagern o. Ä.
- Fehler in der Messung des Verschleißes durch Feuchtigkeitsaufnahme der Bandage, Einlagerungen von festen Zwischenstoffen in Rissen oder eine Kombination beider Mechanismen.
- Fehler in der Temperaturmessung durch falsche Einstellung des Emissionsgrades auf die Änderung der Abstrahleigenschaften der Polymerbandage durch Ablagerungen von Zwischenstoff.

Zufällige Fehler sind in der Regel nicht vermeidbar, da ihr Auftreten nicht vorherbestimmt werden kann. Die wichtigsten zufälligen Fehler sind:

- Fehler in der Schlupfmessung durch Ausfall der Messaufnehmer
- Leichte Unterschiede in der Bandagenhärte unterschiedlicher Chargen
- Unterbrechung der Zwischenstoffzufuhr durch Stauungen in der Zuführeinrichtung

Zu den systematischen Fehlern:

Sowohl die Fehler in der Schlupfermittlung als auch in der Tangentialkraftermittlung sind in ihren absoluten Werten um Größenordnungen kleiner als die aufgezeichneten Werte und somit vernachlässigbar.

Die Einflüsse dynamischer Vorgänge auf die Normalkraftbelastung treten wahrscheinlich in Fördereinrichtung in dem selben Maße auf wie im Versuch und sind somit durchaus erwünscht, da realitätsnah.

Fehler in der Gewichtsermittlung zu Bestimmung des Verschleißes wirken sich besonders negativ, weil direkt auf das Versuchsergebnis aus. Polyurethan besitzt die Fähigkeit, durch Quellvorgänge insbesondere Wasser im Molekülverbund einzulagern. Die Menge des eingelagerten Wassers kann durchaus bis zu 1% erreichen. Die exakte Höhe ist nur sehr schwer zu bestimmen und darüber hinaus abhängig von dem Grad der Vernetzung und dem eingesetzten Vernetzer. Bei einem Bandagengewicht von ca. 140 g bei den kleineren Rädern ergeben sich somit Werte von maximal 1,4 Gramm. Dies gilt jedoch für den Fall, dass das gesamte Bandagenvolumen genügend Zeit hatte, vollständig zu quellen. Aussagen über den Anteil der Quellung sind ebenfalls nur sehr eingeschränkt möglich. Aus diesem Grund wird bei dem Vorhandensein von Wasser im Zwischenstoff vor der abschließenden Gewichtsermittlung das Rad 24 Stunden an der Umgebungsluft getrocknet. Schwieriger ist die Berücksichtigung von Einlagerungen fester Zwischenstoffpartikel in der Bandagenoberfläche. Hier kann nur eine sehr eingeschränkte Aussage über die Masse der das Messergebnis verfälschenden Partikel getroffen werden. Diese Aussage kann sich nur auf eine Beobachtung des äußeren Erscheinungsbildes der Bandage stützen.

Die Temperaturmessung dient lediglich der Überwachung der thermischen Bandagenbelastung und ist somit in ihrer absoluten Höhe nur von untergeordneter Relevanz. Aus diesem Grund ist es zulässig, diesen Fehler in Kauf zu nehmen.

Zu den zufälligen Fehlern:

Bei einem Ausfall der Schlupfmessung während eines Versuches ist es wesentlich, ob durch den Anteil der korrekten Schlupfmessung eine Aussage über das gesamte Schlupfverhalten getroffen werden kann. Dies ist der Fall, wenn die Messung erst gegen Ende eines Versuches ausgefallen ist und die Rolle nicht vollständig versagt hat. Ist die Messung dagegen bereits zu Beginn eines Versuches fehlerhaft, so ist es erforderlich, den Versuch zu wiederholen.

Leichte Unterschiede in der Bandagenhärte aufgrund unterschiedlicher Chargen der Versuchsräder sind nicht nur bei der Herstellung der Versuchsräder unvermeidlich, sondern betreffen die Herstellung von Schwerlasträdern allgemein. Aus diesem Grund werden Unterschiede bis zu 2 Grad Shore-A innerhalb einer Versuchsreihe toleriert.

Sollte während eines Versuches die Zwischenstoffzufuhr in dem Maße unterbrochen werden, dass die Kontaktfläche zwischen Versuchsrad und Gegenscheibe vollständig befreit wird von Zwischenstoff, so muss der Versuch wiederholt werden. Dies tritt in Abhängigkeit der Beschaffenheit des Zwischenstoffes bereits nach einigen Sekunden bis wenigen Minuten ein.

Um den Einfluss von Messfehlern auf das Messergebnis zu minimieren ist es erforderlich, eine Messreihe so oft wie möglich durchzuführen. Hier besteht jedoch ein prinzipielles Problem mit der für die Messreihen zur Verfügung stehenden Zeit. Da ein Versuch 24 Stunden dauert, ist es bei der Anzahl der durchzuführenden Versuche nicht praktikabel, alle Versuche mehrfach durchzuführen. Abhilfe kann hier geschaffen werden, indem nur ausgewählte Versuche wiederholt werden. Darüber hinaus bieten die Versuchsreihen mit anderen Radabmessungen unter sonst konstanten Randbedingungen bis zu einem gewissen Grade die Möglichkeit der Überprüfung von bereits gewonnen Messergebnissen.

7 Auswertung der Versuchsergebnisse

7.1 Allgemeines

Grundsätzlich tritt beim Gebrauch von Schwerlastträgern unabhängig vom Einsatzfall und auch unabhängig von den Randbedingungen **immer** Verschleiß auf. Dabei ist die Existenz des Verschleißes prinzipiell unabhängig von den Randbedingungen. Dies bedeutet, dass ein Schwerlastträger nicht dauerhaft gestaltet werden kann, sondern immer eine Zeitfestigkeit vorliegt. Es ist das Bestreben eines jeden Konstrukteurs, diese Zeitfestigkeit und damit die Lebensdauer eines Produktes hinsichtlich der Randbedingungen und unter Berücksichtigung der Kosten zu optimieren. Hier spielt besonders die Art der Randbedingungen eine Rolle, da diese erheblichen Einfluss auf die absolute Größe des Verschleißes pro Zeiteinheit haben können.

Aus diesem Grund ist es wünschenswert, dem Konstrukteur von reibschlüssigen Antrieben ein Mittel an die Hand zu geben, den Verschleiß unter den vorausgesetzten Randbedingungen abzuschätzen. Eine Möglichkeit wäre das Verschleißgewicht über die Zeit unter gegebenen Bedingungen aufzutragen (siehe **Abb. 7.1**). Nachteilig bei dieser Darstellungsmethode ist jedoch die aus der Vielzahl der möglichen Randbedingungen resultierende Unübersichtlichkeit der so entstehenden großen Anzahl von Diagrammen.

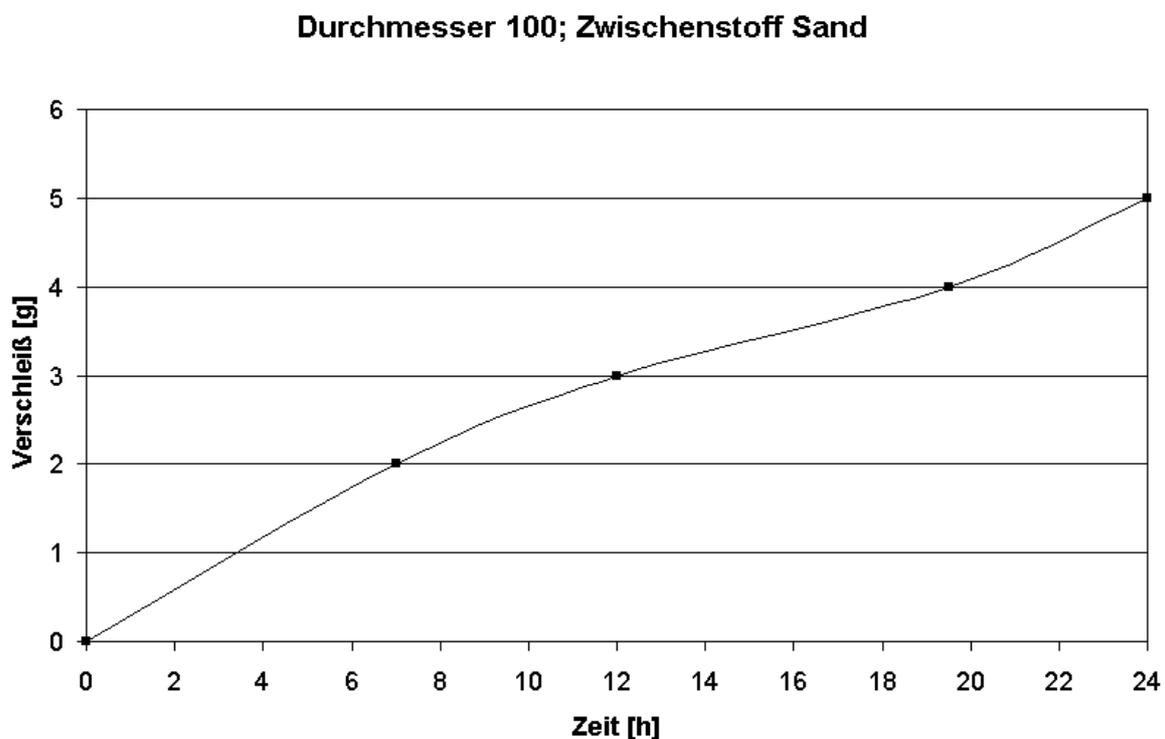


Abb. 7.1: Verschleiß eines Rades mit 100 mm Durchmesser, 30 mm Breite und einer NDI-ernetzten Polyurethanbandage mit einer Härte von 81 Shore-A unter Einwirkung von Sand als Zwischenstoff und 2.700 N Normalkraft.

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse in unterschiedlicher Art und Weise kombiniert dargestellt. Mit Hilfe der dabei verwendeten Diagramme ist es möglich, Räder so auszuwählen, dass eine möglichst hohe Gebrauchsdauer erreicht wird. Dabei wird neben der Auslegung auf die mechanische Beanspruchung insbesondere auch das Verschleißverhalten unter den Randbedingungen eines konkreten Anwendungsfalles berücksichtigt.

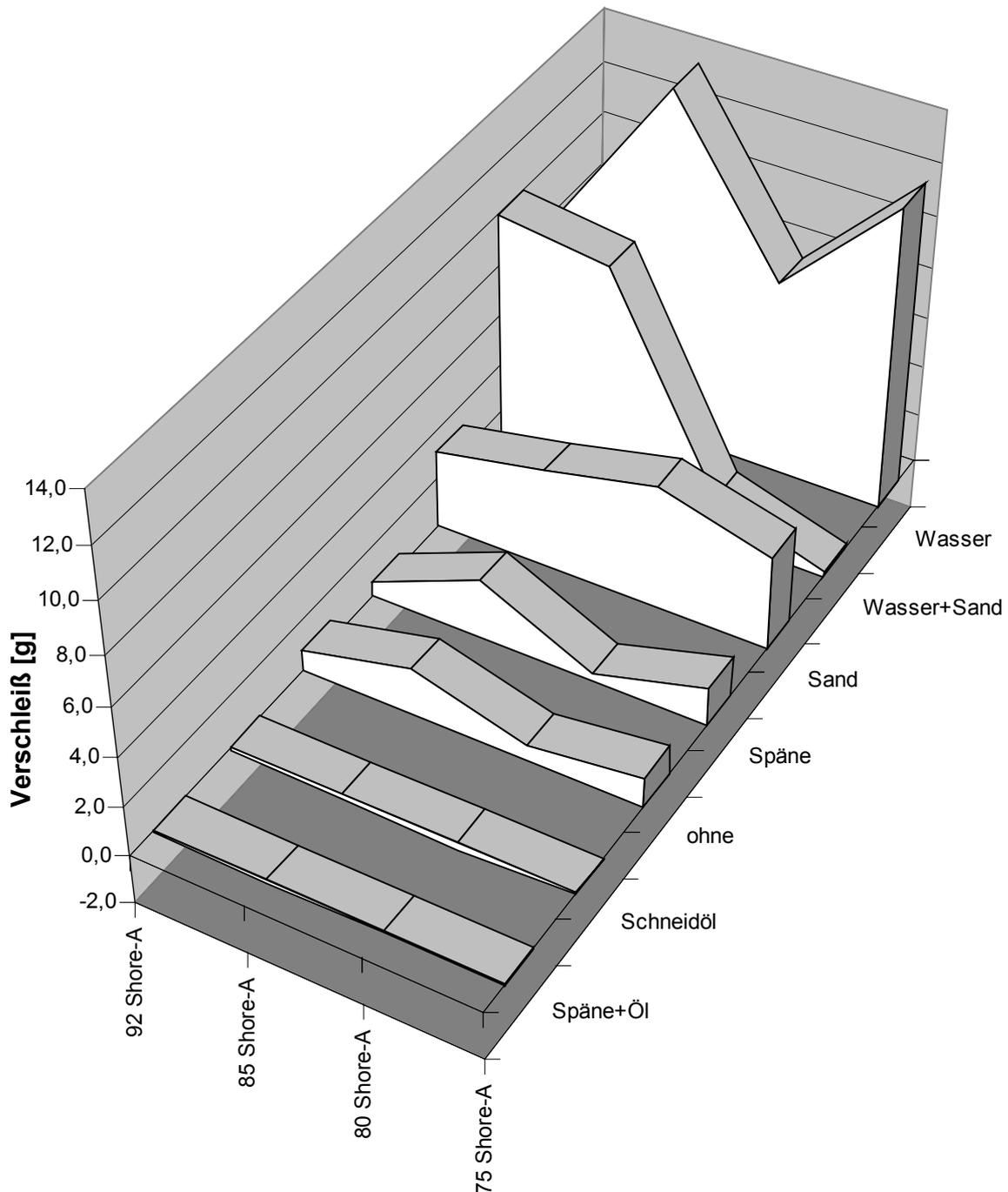
7.2 Verschleiß der Bandage

Bereits in Kapitel 4.4 wurde erläutert, dass die Gegenfläche für das Reibrad in den meisten Fällen der un stetigen Stückgutförderung aus Stahl gefertigt ist. Aus diesem Grund wurde für den Versuchsaufbau eine Stahlscheibe als Gegenrad gewählt. Obwohl nun dieses Stahlgegenrad in den durchgeführten Versuchen, ebenso wie die Prüfräder, einem Verschleiß unterworfen ist, wird davon ausgegangen, dass im realen Fördersystem der Verschleiß der Gegenfläche vernachlässigt werden kann. Diese Annahme ist zulässig, wenn man bedenkt, dass aufgrund der wesentlich größeren Ausdehnung der Gegenfläche und Verteilung auf zahllose Lastaufnahmemittel die Überwälzungen eines Oberflächenelementes in ihrer Anzahl und im Vergleich zum Prüfrad nicht ins Gewicht fallen. Somit stellt der Verschleiß der Bandage das Kernergebnis der Untersuchungen dar.

Da aus Platz- und Preisgründen immer versucht wird, Schwerlastträgern an ihrer mechanischen Belastungsgrenze einzusetzen, wird in den durchgeführten Versuchen immer das zulässige Maximum für die Normalkraft eingestellt. Dieses Maximum ist in der tabellarischen Aufstellung in **Abb. 4.12** bereits festgelegt. Ebenso wird die Abrollgeschwindigkeit auf die maximal zulässigen Werte eingestellt (vergl. Kap. 4.7).

Dennoch ist es von Interesse, den Einfluss der mechanischen Belastung auf das Verschleißverhalten zu betrachten. Aus diesem Grunde werden Versuche mit den 200 mm-Rädern durchgeführt, bei denen die Bandagenbeanspruchung auf ca. 60 % der Volllast reduziert wird. Die Drehmomentübertragung zwischen Prüfrad und Gegenseibe hat wesentlichen Einfluss auf die tangentialen Spannungen in der Bandagenoberfläche. Folglich beeinflusst sie neben der Normalkraft stark die Höhe der mechanischen Beanspruchung. Daher wird für die Versuche mit reduzierter Beanspruchung das übertragene Drehmoment reduziert.

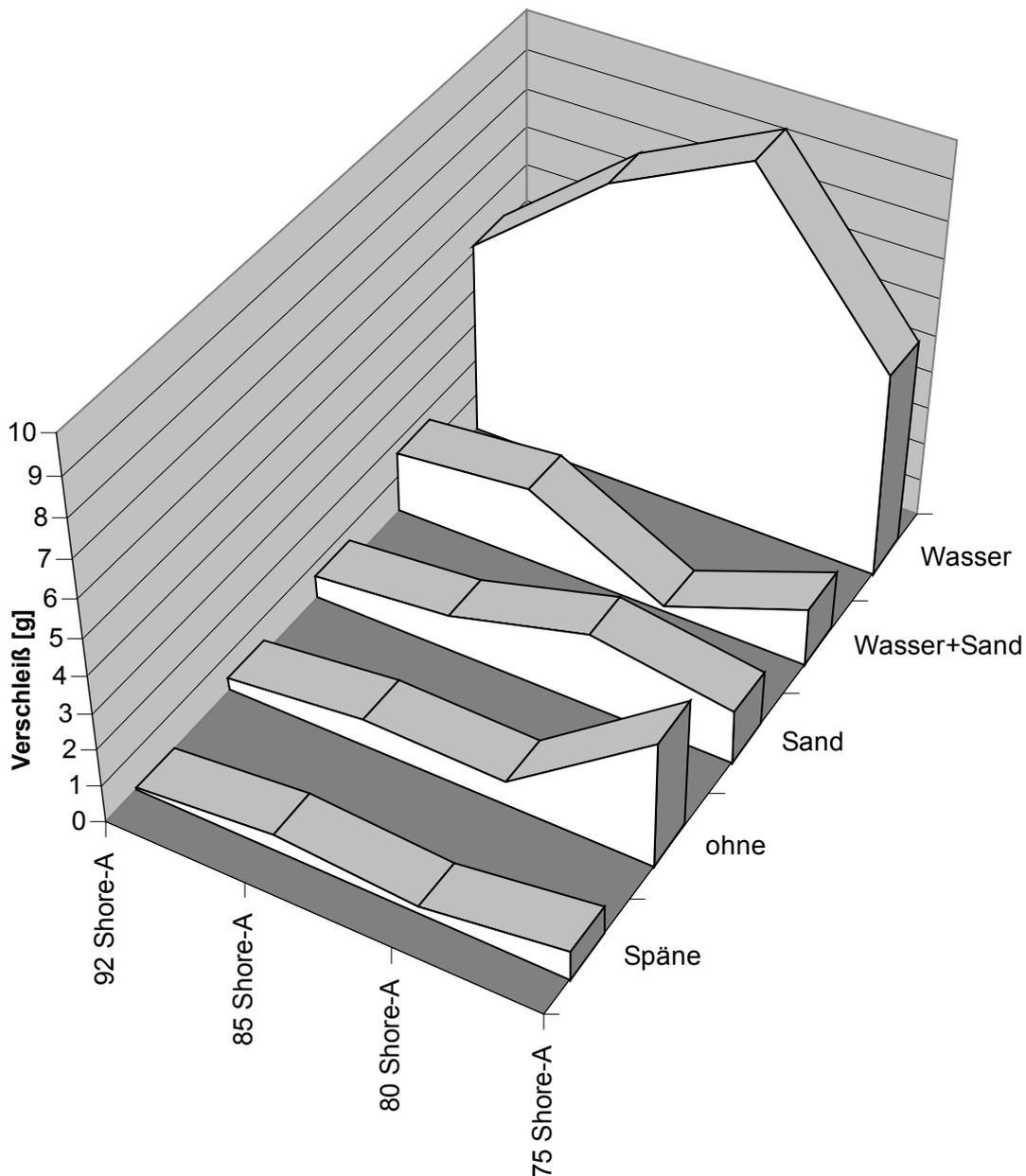
In **Abb. 7.2** wird der Verschleiß in seiner absoluten Größe (Gewicht) und in Abhängigkeit von Zwischenstoff und Bandagenhärte dargestellt. Im Vergleich dazu wird in **Abb. 7.3** der Verschleiß der geringer belasteten 200 mm-Räder aufgetragen. Zu beachten ist dabei, dass der Verschleiß der größeren Räder trotz der größeren Breite der Bandage deutlich geringer ausfällt.



Zahlenwerte zum Diagramm:

Zwischenstoff	75 Shore-A	80 Shore-A	85 Shore-A	92 Shore-A
Wasser	11,99 g	7,71 g	13,80 g	7,73 g
Wasser + Sand	0,18 g	1,60 g	9,40 g	9,99 g
Sand	3,80 g	5,00 g	4,00 g	3,14 g
Ohne	1,23 g	0,56 g	1,90 g	0,77 g
Metallspäne	1,56 g	0,26 g	2,36 g	0,55 g
Späne + Schneid-Kühl-Emulsion	-0,14 g	-0,10 g	-0,19 g	-0,13 g
Schneid-Kühl-Emulsion	-0,03 g	-0,28 g	-0,15 g	-0,06 g

Abb. 7.2: Übersicht über den absoluten Verschleiß in Gramm von Rädern mit 100 mm Ø.



Zahlenwerte zum Diagramm:

Zwischenstoff	75 Shore-A	80 Shore-A	85 Shore-A	92 Shore-A
Wasser	5,48 g	9,72 g	8,00 g	5,22 g
Waser + Sand	1,58 g	0,16 g	2,02 g	1,69 g
Sand	1,41 g	2,02 g	0,98 g	0,63 g
ohne	3,41 g	0,70 g	0,78 g	0,33 g
Metallspäne	0,79 g	0,17 g	0,43 g	0,05 g

Abb. 7.3: Übersicht über den absoluten Verschleiß in Gramm von Rädern mit 200 mm Ø.

In Abb. 7.2 kann man ablesen, dass der Verschleiß der kleinen Räder unter Einwirkung von Schneid-Kühl-Emulsion alleine und in Kombination mit Metallspänen negative Werte erreicht, d. h. sie haben leicht an Gewicht gewonnen. Diese Beobachtung widerspricht der Aus-

sage, dass Schwerlasträder in ihrem Gebrauch immer Verschleiß unterliegen und daher an Gewicht verlieren müssten. Deshalb bedarf dieses Ergebnis einer genaueren Betrachtung.

Wie bereits anfangs des Kapitels gesagt wird, unterliegt ein Rad während seines Gebrauchs immer einem gewissen Verschleiß. Dies gilt unabhängig davon, welche Mechanismen den Verschleiß hervorrufen. Aus diesem Grund kann ein Mehrgewicht nach Versuchsende dem Rad nur von außen zugeführt werden. Hierfür kommen nur die Zwischenstoffe in Frage. So ist bei einem Wasseranteil von 94 % in der Emulsion davon auszugehen, dass sich Wasser durch Quellvorgänge in der Bandage einlagert. Diese Wassereinlagerung lässt sich in Folge einer die Räder nach Versuchsende umgebenden dünnen Ölschicht nicht einfach durch Trocknung wieder rückgängig machen. Zusätzlich werden bei der Zuführung von Spänen in den Zwischenstoff diese zum Teil in der Bandage eingelagert, was zu einer weiteren Gewichtszunahme führt. Diese beiden Mechanismen bewirken jedoch nur eine geringfügige Zunahme des Gewichtes. So können Wassermoleküle von Polyurethan zwar bis zu einem Anteil von 2 Gew. % eingelagert werden. Dies entspricht bei einem Bandagengewicht für die kleinen Räder von ca. 142 g also maximal 2,8 g. Zur vollständigen Sättigung der Bandage bedarf es jedoch der Diffusion der Wassermoleküle durch die gesamte Bandagenstärke, was bis zu einigen Wochen in Anspruch nehmen kann. Daher ist während einer Versuchsdauer von 24 Stunden nur mit wenigen Zehntelgramm Gewichtszunahme durch Quellen zu rechnen. Beobachtungen der Bandagenoberfläche zeigen, dass die Späne unter gleichzeitiger Einwirkung von Schneid-Kühl-Emulsion nur zu einem besonders geringen Anteil in der Bandage eingelagert werden. Diese Eigenschaft ergibt sich, da sie durch die Emulsion sowohl abgespült werden, als auch das Eindringen in die Bandage unter der geringeren mechanischen Beanspruchung der Bandage (durch die Schmierung) erschwert ist. Also ist auch durch die Einlagerung von Spänen in der Bandage nur mit einer geringfügigen Gewichtszunahme zu rechnen.

Auf der einen Seite ist also durch die Einlagerung von Zwischenstoff nur eine geringfügige Gewichtszunahme zu erwarten. Auf der anderen Seite liegt jedoch die gemessene Gewichtszunahme der Räder in den durchgeführten Versuchen nur in einem Bereich von bis zu maximal 0,28 g. Daraus folgt, dass ebenso der Verschleiß auf sehr niedrigem Niveau liegen muss. Dieser geringe Verschleiß erklärt sich durch die Kühlwirkung des hohen Wasseranteils sowie eine zusätzliche Schmierung durch den Ölanteil in der Emulsion. Durch diese Einflüsse ist sowohl die thermische Beanspruchung (durch die Kühlung), als auch die mechanische Beanspruchung (durch die Schmierung) der Bandage sehr gering. Dies deckt sich mit den Beobachtungen der Bandagenoberfläche im folgenden Kapitel. Diese zeigt sich in allen Versuchen, in denen die Emulsion im Zwischenstoff vorliegt, glatt und nur unter Einwirkung von zusätzlichen Spänen in geringem Maße verschlissen. So bleibt zwar der Verschleiß nicht exakt bestimmbar, dennoch ist die Aussage möglich, dass er bei sehr niedrigen Werten liegen muss.

7.2.1 Verschleiß in Abhängigkeit des Zwischenstoffes

Der in die Kontaktflächen zwischen Prüfrad und Gegenscheibe eingebrachte Zwischenstoff beeinflusst wesentlich das Schlupf- und damit Verschleißverhalten eines angetriebenen Reibrades. Neben chemischen und physikalischen Wechselwirkungen zwischen Zwischenstoff und Oberflächen von Prüf- und Gegenrad besteht ein wesentlicher Einflussfaktor des Zwischenstoffes darin, dass er durch sein Vorhandensein die Oberflächen der beiden aufeinander abwälzenden Räder räumlich voneinander trennt. Auf diese Weise wird die Kraftübertragung zwischen den Oberflächen verändert. Insbesondere die Aufteilung der übertragenen Kraft auf die in Kap. 4.2 genannten Reibkraftkomponenten (Adhäsions-, Kohäsions-, Hysterese- und Viskoseanteil) gestaltet sich vollkommen anders.

Allgemein ist davon auszugehen, dass der Adhäsionsanteil, der die zu Trennung der molekularen Bindungen in der mikroskopischen Berührfläche erforderliche Kraft darstellt, durch die partikuläre Trennung der Oberflächen stark abfällt. Der Kohäsionsanteil ist stark davon abhängig, wie die Oberflächen durch die Einwirkung des Zwischenstoffes beeinflusst werden. Er tritt nur in Verbindung mit Schlupf auf und stellt den Anteil der Reibkraft dar, der zur Bildung von Abrieb und zur Erzeugung von Rissen in der Bandage benötigt wird. Nach *Bekel* [bek97] ist er jedoch als vernachlässigbar anzusehen. Der Hystereseanteil beschreibt die innere Reibung in der Bandage aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften des Polyurethans und wird durch die geringere Kraftübertragung minimal verringert, da die Verformung der Bandage aufgrund der Tangentialkraft kleiner wird. Ansonsten bleibt dieser Anteil weitestgehend unverändert. Da der Viskoseanteil die Scherkraft in einer zwischen den aufeinander abwälzenden Rädern befindlichen Flüssigkeit beschreibt, ergibt er sich überhaupt erst aus der Anwesenheit von Zwischenstoff. Deshalb steigt dieser Anteil an. Jedoch ist seine absolute Größe abhängig von der Viskosität des Zwischenstoffes. Bei den eingesetzten Flüssigkeiten (Wasser, Schneid-Kühl-Emulsion) ist dieser Anteil aufgrund deren Dünflüssigkeit jedoch vernachlässigbar. Bei den festen Zwischenstoffen tritt er hingegen gar nicht auf, da sich bei den in der Versuchsdurchführung eingebrachten Zwischenstoffmengen zu keiner Zeit eine vollständig geschlossene Partikelschicht zwischen den Kontaktflächen der Räder aufbaut. Insgesamt wird also der Adhäsionsanteil ausschlaggebend sein, so dass es zu einer deutlichen Verringerung der Kraftübertragung kommen wird. Eine Ausnahme kann der Zwischenstoff „Metallspäne“ darstellen, da sich aufgrund der materiellen Gleichheit von Zwischenstoff und Gegenscheibe ein größerer Einfluss auf den Kohäsionsanteil ergeben kann.

Um eine Abhängigkeit des Verschleißes von der Wahl des Zwischenstoffes darzustellen, wird für **Abb. 7.4** der Verschleiß über die unterschiedlichen Bandagenhärten gemittelt.

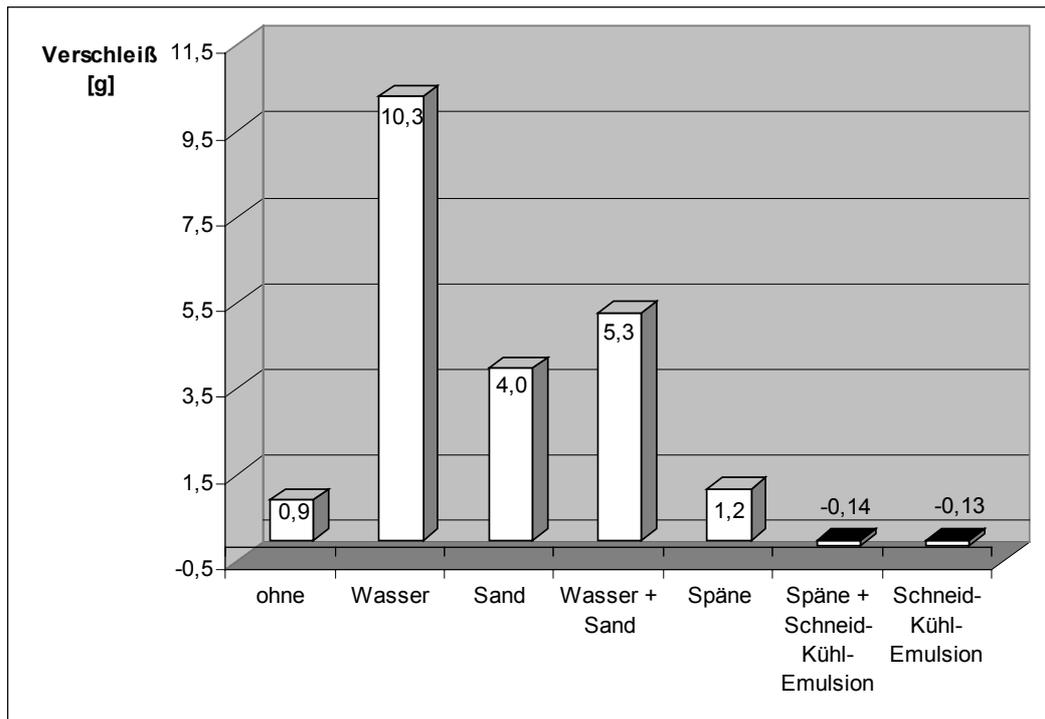


Abb. 7.4: Absoluter Verschleiß, über die Bandagenhärte gemittelt, Radgröße 100 mm.

Die gewonnenen Ergebnisse lassen sich wie folgt interpretieren:

Untersuchungen ohne Zwischenstoff (Verschleiß 0,9 g):

Der Verschleiß ist verhältnismäßig gering, was unter den gegebenen Bedingungen und bei den guten mechanischen Eigenschaften von Polyurethan zu erwarten war. Der aufgetretene Verschleiß resultiert direkt aus dem vorhandenen Schlupf zwischen Prüfrad und Gegenscheibe, der sich für alle Versuche ohne Einwirkung von Zwischenstoff in dem vergleichsweise eng begrenzten Bereich zwischen 3 und 6 % bewegt hat. Abrieb kommt unter diesen Bedingungen hauptsächlich durch Ablösen mikroskopischer Polymerpartikel aus der Oberfläche zustande. Diese Ablösung findet dann statt, wenn örtlich die Adhäsionskomponente von dem Kohäsionskraftanteil übertroffen wird. In der Regel ist dies der Fall, wenn die molekulare Bindung im Polymerverbund durch mechanische Beanspruchungen geschwächt sind.

Untersuchungen mit Wasser (Verschleiß 10,3 g):

Der Verschleiß unter Einwirkung von Wasser liegt deutlich über dem aller anderen Versuche. Dies ist insbesondere deshalb interessant, weil bei Wasser keinerlei abrasive Wirkung durch den Zwischenstoff zu erwarten ist. Aufgrund der genannten Änderung der Reibkraftanteile durch das Vorhandensein von Wasser in der Kontaktfläche sind die gemessenen Schlupfwerte höher als bei den Versuchen ohne Zwischenstoff. Zusätzlich weisen sie eine breitere Streuung auf und liegen in einem Bereich zwischen 4,5 und 20 %. Durch die partikuläre Trennung der Oberflächen beim Einsatz jedes Zwischenstoffes reicht auch nicht mehr die Erklärung des

Verschleißes durch kohäsive Vorgänge, insbesondere können somit keine höheren Verschleißraten als ohne Zwischenstoff erreicht werden. Vielmehr muss es eine Erklärung durch chemische Vorgänge geben. Dies ist insbesondere deshalb naheliegend, weil der Verschleiß in Abhängigkeit vom Vernetzer, der bei der Herstellung der Bandage zum Einsatz kam, stark schwankt. Auf diese Eigenschaft wird in Kap. 7.5 noch explizit eingegangen.

In Frage kommen zwei Möglichkeiten, die eine Erklärung für den hohen Verschleiß auf chemikalischer Ebene bieten:

1. Oxidation:

Alle Formen von Polyurethan sind anfällig für chemische Zersetzung durch Oxidation. Diese führt zunächst zur Vergilbung und anschließend zur deutlichen Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften. Auffällig dabei ist ein stechender Geruch, der den Zerfall begleitet. Aufgrund ihrer wesentlich höheren Oberfläche sind PU-Schäume deutlich anfälliger für die Oxidation. Bei Festkörpern aus Polyurethan ist dieser Vorgang wesentlich verlangsamt, weshalb dieser Mechanismus als Erklärung für die großen Verschleißwerte allein nicht ausreicht.

2. Hydrolyse:

Nach [wül01] findet die Hydrolyse bei Polyurethanen auf Polyesterbasis vor allem durch Einwirkung von Alkalien statt. Dabei kommt es zu einer Verseifung der Estergruppen. Wenn die Esterbrücken in der Kette aufgebrochen werden, entstehen neue Alkohol- und Carboxylgruppen. Durch die Bildung dieser Gruppen wird die Hydrolyse selbst noch beschleunigt, ihre Wirkung ist also selbsterhaltend bzw. selbstverstärkend.

Bei Durchführung der Versuche beträgt die Oberflächentemperatur des Prüfrades ca. 25 bis 30°C, zusätzlich ist die Oberfläche permanent vollständig mit Wasser benetzt. Da es sich bei dem verwendeten Wasser nicht um vollentsalztes Wasser handelt, besteht jederzeit die Möglichkeit, dass der PH-Wert geringfügig in den alkalischen Bereich gelangt. In Zusammenwirkung mit der dynamischen Belastung kann dies zu den genannten Hydrolysevorgängen in der Bandagenoberfläche führen, die im mikroskopischen Bereichen eine Versprödung des Werkstoffes zur Folge haben. Dieser so versprödete Werkstoff wird bei der weiteren Überwälzung und unter der Einwirkung von Schlupf vergleichsweise schnell abgerieben, da seine Bindung zum restlichen Werkstoff nicht die mechanische Festigkeit aufweist wie der intakte Werkstoff. Anschließend liegt die Bandagenoberfläche für die weitere Reaktion wieder frei. Für diese Theorie sprechen die Beobachtungen, die an den Prüfrädern gemacht werden. So bilden die Räder 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 re-

gelrecht angebacken werden (80 Shore-A und 85 Shore-A). In Abb. 7.5 bis 7.9 ist dieses Verhalten dargestellt.



Abb. 7.5: Vulkollanrad mit einer 92 Shore-A-Bandage und 100 mm \varnothing nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Wasser als Zwischenstoff.



Abb. 7.6: Abgespülte Abriebpartikel des Rades aus **Abb. 7.5**.



Abb. 7.7: Vulkollanrad mit einer 80 Shore-A-Bandage und 100 mm \varnothing nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Wasser als Zwischenstoff.

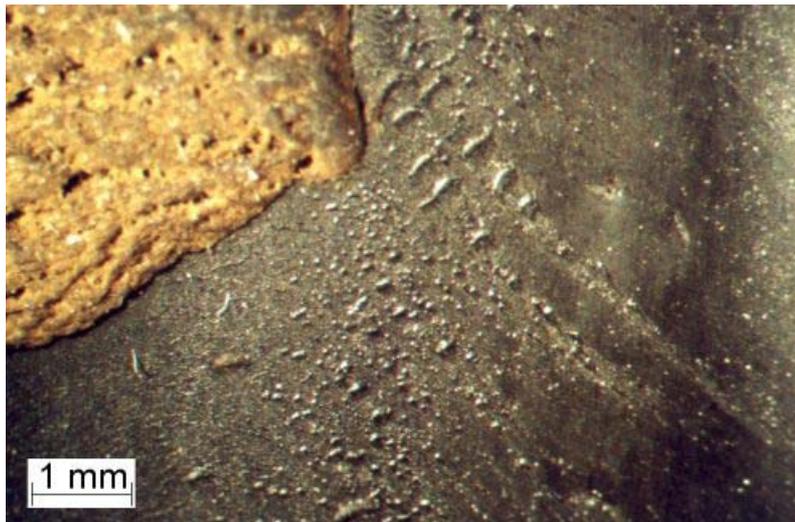


Abb. 7.8: Vergrößerung der Oberfläche des Rades aus **Abb. 7.7**.

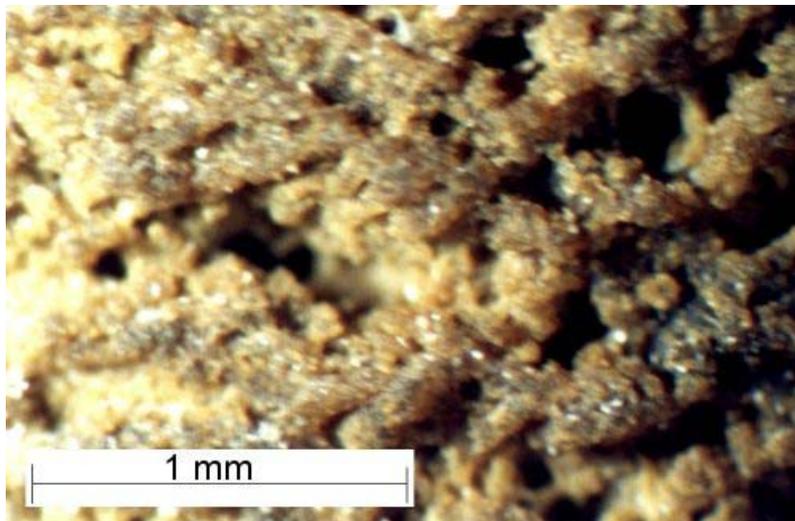


Abb. 7.9: Struktur der Anhaftung des Rades aus **Abb. 7.7** in vergrößerter Darstellung.

Zusätzlich zur hydrolytischen Vorgängen kommt noch, dass thermische Zersetzungsreaktionen durch die Einwirkung von Feuchtigkeit noch verstärkt werden, so dass auch auf diese Weise der Verschleiß beschleunigt wird.

Untersuchungen mit Sand (Verschleiß 4,0 g):

Der Verschleiß unter Einwirkung von Sand erreicht mit durchschnittlich 4 Gramm pro Rad in 24 Stunden Versuchsdauer einen mittleren Wert. Der gemessene Schlupf bewegt sich bei der Durchführung der Versuche in einem Bereich zwischen 3 und 8 %, wobei mit zunehmender Bandagenhärte der Schlupf abnimmt. Der Verschleiß setzt sich im Wesentlichen aus einer Kombination von zwei Komponenten zusammen. In den Oberflächenbereichen, in denen sich kein Sandkorn zwischen Bandage und Gegenrad befindet, liegt der sogenannte Adhäsionsver-

schleiß vor. Dies ist vergleichbar mit den Versuchen ohne Zwischenstoff. Im Gegensatz dazu kann der Sand in den Oberflächenbereichen, in denen er zwischen Bandage und Gegenfläche liegt (vergl. **Abb. 5.4**), seine abrasiver Wirkung voll entfalten. Diese bewirkt, dass sich in Verbindung mit der Einwirkung einer Tangentialkraft ein Risskeim ausbildet, der sich bei weiterer mechanischer Beanspruchung in der Bandage ausbreiten kann und auf diese Weise zum Ausbrechen von einzelnen Partikeln aus der Oberfläche führt. Diese Annahme wird bestätigt durch die Beobachtung der Bandagenoberfläche, siehe hierzu **Abb. 7.10** und **7.11**.



Abb. 7.10: Vulkollanrad mit einer 80 Shore-A-Bandage und 100 mm \varnothing nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Sand als Zwischenstoff.



Abb. 7.11: Vergrößerung der Oberfläche des Rades aus **Abb. 7.10**.

Gründe für den geringen Verschleiß unter der Einwirkung von Sand als Zwischenstoff sind die folgenden:

- Verringerung der tatsächlichen Kontaktfläche und damit Verringerung des Verschleißes durch Kohäsionsbindungen zwischen Gegenrad und Bandagenoberfläche (siehe **Abb. 7.12**)
- Fehlen hydrolytischer Vorgänge

Die Verringerung der tatsächlichen Kontaktfläche ist zudem abhängig von der Bandagenhärte, die das Ansmiegeverhalten stark beeinflusst (**Abb. 7.12**). Bei auftretendem Schlupf wird die abgehobene Bandagenoberfläche weitestgehend vor Verschleiß geschützt.

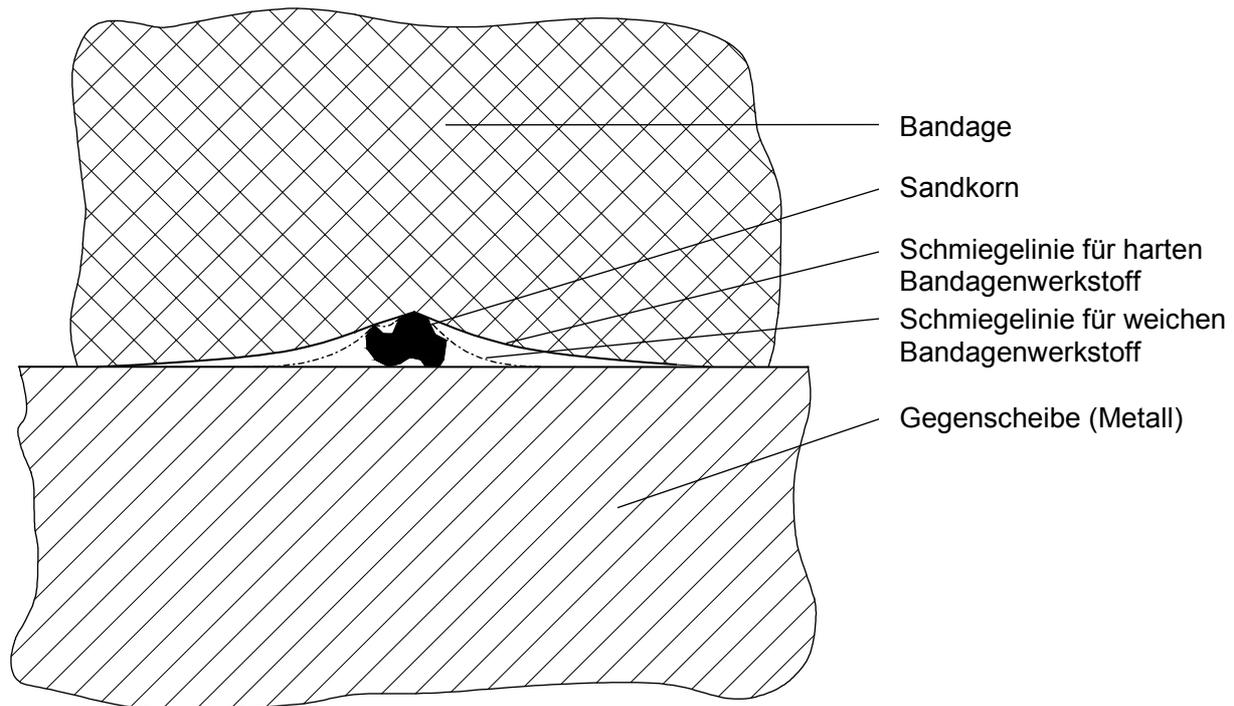


Abb. 7.12: Ansmiegeeffekt der Bandage um ein einzelnes Sandkorn bei unterschiedlicher Bandagenhärte.

Untersuchungen mit Wasser und Sand (Verschleiß 5,3 g):

Der Verschleiß unter der Einwirkung von Wasser und Sand als Zwischenstoff liegt mit 5,3 Gramm in 24 h nur geringfügig über dem von Sand als alleinigem Zwischenstoff. Dieses Ergebnis hat die folgenden Ursachen, die in ihrer Auswirkung auf den Verschleiß zum Teil gegenläufige Effekte zeigen:

- Hydrolytische Vorgänge vermindern die mechanische Belastbarkeit des polymeren Werkstoffes in den obersten mikroskopisch feinen Schichten und erhöhen den Verschleiß (vergl. Untersuchungen mit Wasser).
- Sandkörner trennen partiell die Oberflächen von Prüfrad und Gegenseibe.
- Wasser trennt die Oberflächen zusätzlich, jedoch nur zu einem geringen Anteil.

Durch die Trennung der Oberflächen wird die Kraftübertragung stark reduziert. Dies wirkt sich in geringen Reibbeiwerten, hohem Schlupf (7 bis 10 %) und damit geringen übertragenen Drehmomenten aus, so dass die mechanische Beanspruchung der Bandagen verhältnismäßig gering ist. Weiterhin wird in den oberflächlich getrennten Bereichen der durch Hydrolyse geschwächte Werkstoff nicht unmittelbar abgerieben.

Das Wasser hat neben der hydrolytischen Wirkung die Eigenschaft, den Sand relativ schnell von der Oberfläche abzuspülen, so dass ein entstandener Risskeim nicht durch mehrfaches Überwälzen vergrößert wird. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass durch die hydrolytischen Vorgänge bereits entstandene Risskeime wieder geglättet werden. Dadurch können sich diese nicht weiter ausbreiten und zum Ausbrechen von Werkstoff aus der Oberfläche führen. Diese Annahmen werden bestätigt durch die Beschaffenheit der Prüfradooberflächen, die verhältnismäßig glatt sind und nur wenige Einschlüsse von Sandkörnern aufweisen (siehe **Abb. 7.13** und **7.14**)



Abb. 7.13: Vulkollanrad mit einer 85 Shore-A-Bandage und 100 mm \varnothing nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Wasser mit Sand als Zwischenstoff.

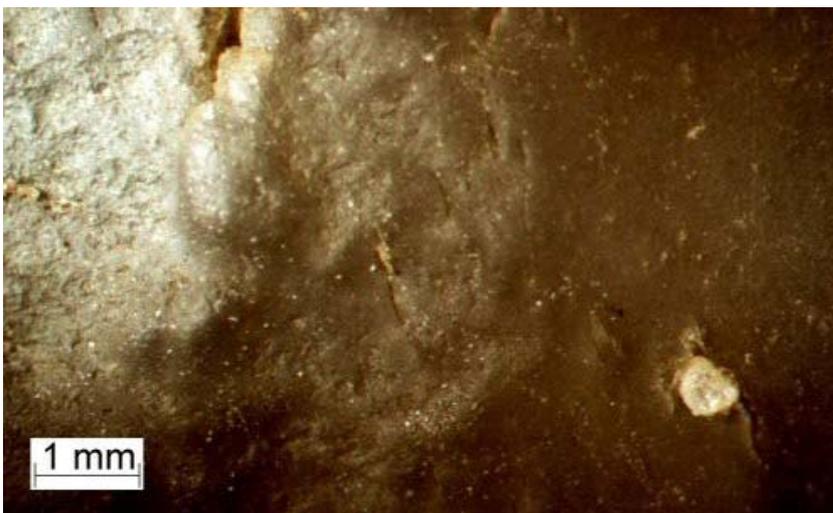


Abb. 7.14: Vergrößerung der Oberfläche des Rades aus **Abb. 7.13**.

Untersuchungen mit Metallspänen (Verschleiß 1,2 g):

Der Verschleiß bei den Versuchen, die mit Metallspänen als Zwischenstoff durchgeführt wurden, liegt mit durchschnittlich 1,2 Gramm innerhalb von 24 Stunden Versuchsdauer vergleichsweise niedrig. Dieser Wert überrascht insbesondere wenn man berücksichtigt, dass die Risseimbildung durch die scharfkantigen Späne deutlich ausgeprägter sein muss, als dies bei vergleichsweise runden Sandkörnern der Fall ist. Erklärbar wird dieses Ergebnis, wenn man bedenkt, dass die Metallspäne sehr gut in die Bandagenoberfläche eindringen können und sich dort einlagern. Auf diese Weise wird nicht nur die direkte Umgebung um den eingelagerten Metallspan vor einer weiteren Beeinträchtigung durch weitere Späne geschützt, sondern auch das Gewicht der Bandage durch die Vielzahl der eingelagerten Späne erhöht. Durch diesen Effekt wird das Messergebnis zu geringerem Verschleiß verfälscht, jedoch ist durch eine genaue Betrachtung der Oberfläche nach der Durchführung der Versuche dennoch eine Aussage über das Verschleißverhalten möglich.

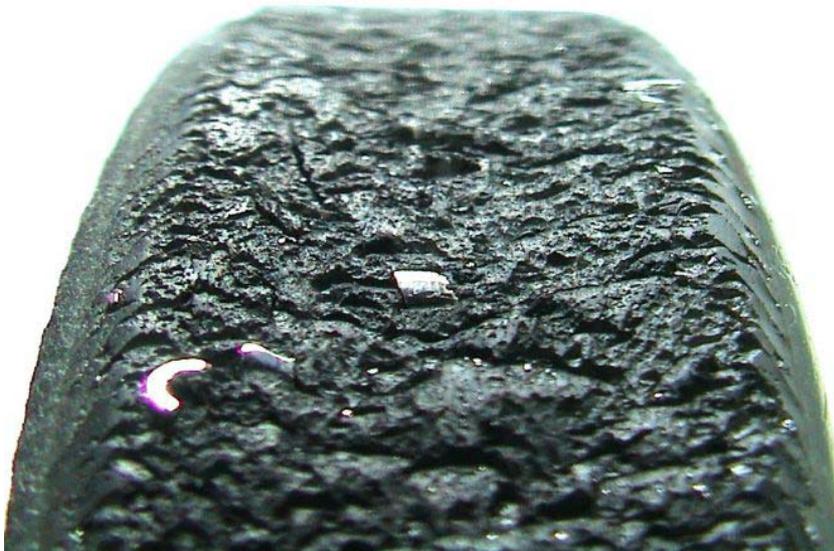


Abb. 7.15: Polyurethanrad (MDI-vernetzt) mit einer 75 Shore-A-Bandage und 100 mm \varnothing nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Metallspänen als Zwischenstoff.

In **Abb. 7.15** und **7.16** erkennt man deutlich die Vielzahl der metallischen Einlagerungen und die Vielzahl der gebildeten Risse. Eine weitergehende Untersuchung der Bandagenoberfläche zeigt, dass in nahezu jedem Riss, den die Bandage aufweist, ein Metallspan zu finden ist. Der größte Teil dieser Späne ist oberflächlich jedoch nicht sichtbar, da die sie durch das vielfache Überwälzen zu tief eingedrungen sind. Dass der Bandagenwerkstoff dennoch nicht stärker ausgebrochen ist, ist nur durch die gute Weiterreißfestigkeit von Polyurethan zu erklären. Berücksichtigt man das Gewicht der eingelagerten Späne, so liegt der Verschleiß der Bandage unter Einwirkung von Spänen ungefähr auf gleichem Niveau wie unter der Einwirkung von Sand. Zur Überprüfung dieser Aussage werden probenhalber aus der Bandage eines Rades die

eingelagerten Späne manuell weitestgehend entfernt. In **Abb. 7.17** ist dieses Rad zusammen mit den aus der Bandage entfernten Spänen abgebildet.



Abb. 7.16: Vergrößerung der Oberfläche des Rades aus Abb. 7.15.



Abb. 7.17: Vulkollanrad nach der Untersuchung unter Einwirkung von Metallspänen mit den aus der Bandage entfernten Einlagerungen.

Die in **Abb. 7.17** dargestellten Späne weisen ein Gewicht von 1,83 g auf. In Verbindung mit einem gemessenen Gewichtsverlust von 2,35 g ergibt sich ein Gesamtverschleiß von 4,18 g. In dem Versuch, der unter den gleichen Randbedingungen jedoch mit Sand als Zwischenstoff durchgeführt wurde, liegt der Verschleiß bei gewogenen 4 g. D. h. der tatsächlich aufgetretene Verschleiß liegt für die Zwischenstoffe Sand und Metallspäne auf gleichem Niveau.

Untersuchungen mit Metallspänen und Schneid-Kühl-Emulsion (Verschleiß -0,14 g):

Der Wert für den Abrieb unter Einwirkung von Metallspänen zusammen mit Schneid-Kühl-Emulsion liegt mit $-0,14$ g in 24 Stunden Versuchsdauer im Bereich der Gewichtszunahme. Als Erklärung für dieses Ergebnis kommen die Mechanismen in Frage, die bereits weiter vorne in diesem Kapitel kurz genannt wurden:

- Quellvorgänge in der Bandage durch den Wasseranteil in der Emulsion.
- Gute Kühlung der Bandage durch den Wasseranteil der Emulsion.
- Geringerer abrasiver Einfluss des Schlupfes durch gute Schmierungseigenschaften der Emulsion und damit verbundene
- geringe mechanische Beanspruchung durch die Schmierwirkung der Emulsion.
- Erleichtertes Abspülen der Späne durch die Schmierungseigenschaften der Emulsion.

Der wesentliche Einfluss auf das Verschleißverhalten der Bandage ergibt sich durch das Schneid-Kühl-Mittel. Hierdurch wird eine Kühlung der Bandage bedingt, was eine geringere thermische Beanspruchung mit sich bringt. Zusätzlich wird die Oberfläche gut geschmiert, wodurch die Kraftübertragung deutlich reduziert wird. Dies bewirkt eine zusätzliche Herabsetzung der mechanischen Beanspruchung. Darüber hinaus zeigt sich eine verringerte Neigung der Bandage, Späne in der Oberfläche einzulagern, wodurch die Rissausbreitung spürbar reduziert wird. Dieser Effekt ist ebenfalls auf die Schmierungseigenschaften des Kühl-Schmiermittels zurückzuführen, da neben der Eigenschaft die Späne direkt abzuspülen auch das Haftungsverhalten der Späne an der Bandagenoberfläche stark verringert wird. Die aufgetretene Gewichtszunahme ist in diesem Fall nur in geringem Maße durch Einlagerungen von Spänen, sondern vielmehr durch Quellvorgänge durch den Wasseranteil der Emulsion zu erklären. Diese Erklärung wird durch die Beobachtung der Bandagenoberfläche bestätigt, die kaum Einlagerungen aufweist, siehe hierzu **Abb. 7.18**. Chemische Beeinflussungen der Bandage durch den Kühl-Schmierstoff konnten nicht beobachtet werden.

Insgesamt ist festzuhalten, dass der Einsatz von Kühl-Schmierstoffen den Verschleiß deutlich minimiert. Diese Verbesserung des Verschleißes ist jedoch verbunden mit einer wesentlichen Verschlechterung der Kraftübertragung, die stark von der Schmierwirkung der Schneid-Kühl-Emulsion beeinträchtigt wird. Eine Voraussetzung für den Betrieb von Schwerlasträdern unter Schneid-Kühl-Mitteleinwirkung ist jedoch die chemische Verträglichkeit.



Abb. 7.18: Vulkollanrad mit einer 92 Shore-A-Bandage und 100 mm \varnothing nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Metallspänen und Schneid-Kühl-Emulsion als Zwischenstoff.

Untersuchungen mit Schneid-Kühl-Emulsion (Verschleiß -0,13 g):

Der Wert für den Verschleiß unter Einwirkung von Schneid-Kühl-Emulsion als Zwischenstoff liegt mit $-0,13$ g erwartungsgemäß extrem niedrig und auf dem selben Niveau wie unter Einwirkung von Spänen zusammen mit Schneid-Kühl-Emulsion. Dies ist unter Berücksichtigung der Tatsache, dass das Rad geschmiert und gekühlt wird, nicht verwunderlich, da sowohl die mechanische als auch die thermische Beanspruchung der Bandage durch den Zwischenstoff deutlich herabgesetzt wird.



Abb. 7.19: Vulkollanrad mit einer 85 Shore-A-Bandage und 100 mm \varnothing nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Schneid- Kühl- Emulsion als Zwischenstoff.

Die Beobachtung einer neuwertigen Bandagenoberfläche (siehe **Abb. 7.19**) bestätigt diesen Eindruck. Die tendenziell minimal geringere Gewichtszunahme lässt sich durch das Fehlen von vereinzelt eingelagerten Spänen erklären. Die geringen Werte für den Verschleiß unter

Einwirkung von Schneid-Kühl-Emulsion weisen darauf hin, dass die mechanische Beanspruchung einen großen Einfluss auf das Verschleißverhalten hat.

7.2.2 Verschleiß in Abhängigkeit der Bandagenhärte

Da der Verschleiß bei Variation der Bandagenhärte unter sonst gleichen Randbedingungen zum Teil deutliche Schwankungen aufweist, wird in diesem Kapitel auf den Einfluss eingegangen, den die Bandagenhärte auf das Verschleißverhalten hat.

Mittelt man die Verschleißraten über die eingesetzten Zwischenstoffe und trägt das Ergebnis über der Bandagenhärte auf, so ergibt sich das in **Abb. 7.20** dargestellte Diagramm.

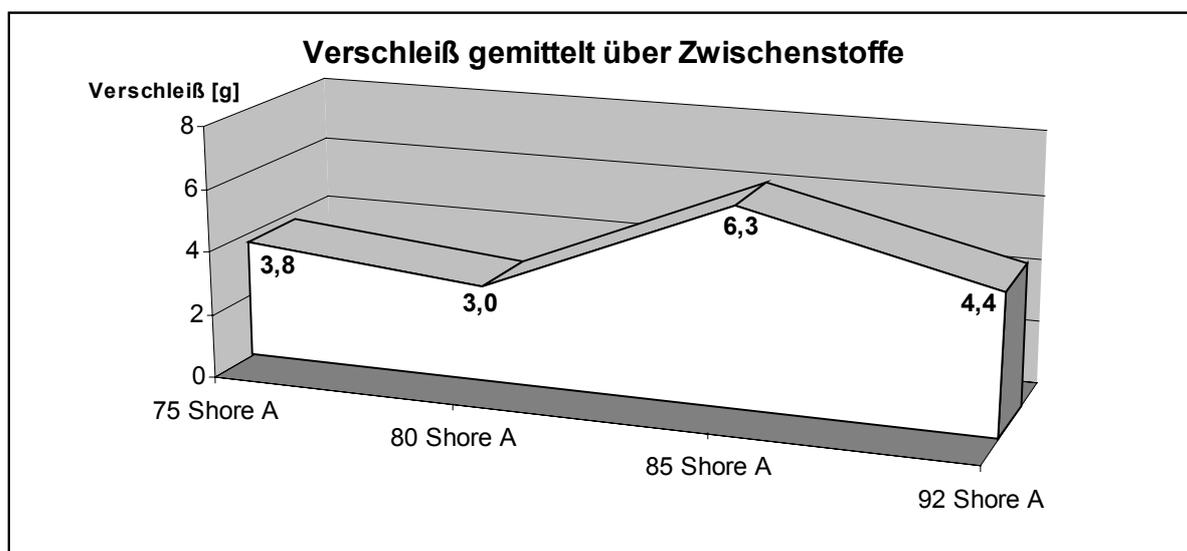


Abb. 7.20: Verschleißraten der Räder mit 100 mm Durchmesser aufgetragen über die Bandagenhärte.

Das so dargestellte Ergebnis ist leicht verfälscht durch die Tatsache, dass Bandagen in der Härte 75 Shore-A nur aus MDI-vernetztem Polyurethan zu beziehen sind. Dieses Polyurethan weist im Allgemeinen deutlich schlechtere mechanische Eigenschaften auf als NDI-vernetztes Polyurethan, das unter dem Handelsnamen Vulkollan[®] vertrieben wird. Der Einfluss des Vernetzers wird in Kapitel 7.2.3 näher erläutert. Bei den anderen Härtegraden ist neben der Mittelwertbildung über die unterschiedlichen Zwischenstoffe ebenfalls über die in den Bandagen eingesetzten Vernetzer gemittelt worden. Deshalb ist der Wert von 3,8 Gramm für die Härte von 75 Shore-A nur unter Vorbehalt gültig. Wenn Räder mit den weichen 75 Shore-A Bandagen auch aus NDI-vernetztem Polyurethan zur Verfügung gestanden hätten, so wären diese mechanisch belastbarer und hätten dem Verschleiß einen größeren Widerstand geboten. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass der gemittelte Wert für den Verschleiß von 3,8 g eher zu niedrigeren Werten verschoben ist. Unter Berücksichtigung dieses Aspektes ergibt sich ein Verlauf für den Verschleiß, der sein Maximum bei 85 Shore-A findet.

Aus **Abb. 7.2** kann man weiterhin eine Abhängigkeit des Verschleiß von der Bandagenhärte insbesondere unter Einwirkung von Sand und Wasser mit Sand feststellen. Der Verschleiß unter Einwirkung von Sand ist im Wesentlichen auf die Bildung von Rissen und das anschließende Ausbrechen von Werkstoff zurückzuführen. Somit kann hier der geringere Verschleiß der weicheren Bandagen durch die höhere Elastizität und größere Zähigkeit des Werkstoffes erklärt werden. Dies hat eine geringere Rissausbreitung und damit einen verringerten Verschleiß zur Folge.

Allgemein ist festzuhalten, dass mit abnehmender Bandagenhärte auch die mechanische Belastbarkeit abnimmt. Da bei der Ermittlung der zulässigen Normalkraft jedoch die Bandagenhärte berücksichtigt wurde (vergl. Kap. 4.7), ist gewährleistet, dass die Räder weitestgehend gleich beansprucht werden. Das bedeutet, dass Räder mit weicherer Bandage mit geringerer Normalkraft vorgespannt werden. Die Bandagenhärte wird dabei im Wesentlichen durch den Vernetzungsgrad des Polymers bestimmt. D. h. die absolute Anzahl der Vernetzungsknoten pro Volumenelement ist direkt proportional zur Bandagenhärte. Da der Verschleiß zusammen mit der mechanischen Beanspruchung zunimmt und diese bei dem gewählten Versuchsablauf eine Funktion der Bandagenhärte und damit des Vernetzungsgrades ist, kann er als Funktion dieser beiden Größen dargestellt werden:

$$V = k \cdot \frac{L_{\text{mech}}}{H_{\text{Vernetzung}}} \quad (7.1)$$

In dieser Darstellung entspricht V dem Verschleiß, k einer konstanten und dimensionsbehafteten Größe, L_{mech} der mechanischen Belastung und $H_{\text{Vernetzung}}$ dem Härte- bzw. Vernetzungsgrad.

Da mit den gewählten vier Bandagenhärten nur ein vergleichsweise grobes Raster an Stützpunkten für die Bestätigung dieser Funktion zur Verfügung steht, ist der direkte Nachweis der Funktion ohne weitere Untersuchungen problematisch. Aufgrund des nicht linearen Zusammenhangs zwischen Belastung und Vernetzungsgrad kann jedoch ein parabelähnlicher Verlauf angenommen werden, der sein Maximum bei oder in der Nähe von 85 Shore-A findet und qualitativ in **Abb. 7.21** dargestellt ist.

Praktisch bedeutet dieses Ergebnis, dass die mechanische Belastbarkeit bei einer 85 Shore-A Bandage in Bezug zum Vernetzungsgrad vergleichsweise hoch liegt, was sich negativ auf den Verschleiß auswirkt.

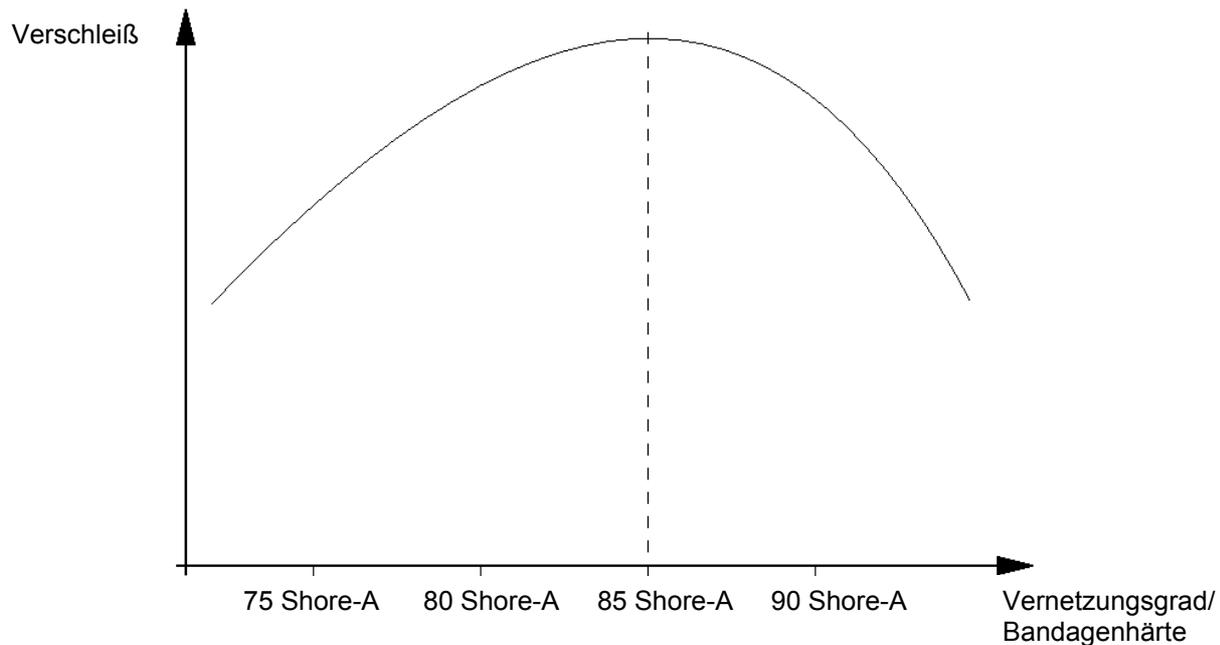


Abb. 7.21: Qualitativer Kurvenverlauf für die Beziehung zwischen Verschleiß und Vernetzungsgrad bzw. Bandagenhärte

7.2.3 Verschleiß in Abhängigkeit des Vernetzers

Die untersuchten Räder sind ausschließlich mit Polyurethanbandagen versehen, bei denen das Prepolymer entweder mit NDI (Naphthalendiisocyanat) oder MDI (Methyldiphenyldiisocyanat) vorvernetzt worden ist (siehe hierzu auch Kap. 4.1). Bereits bekannt ist, dass sich aufgrund dieser Stoffe eine unterschiedliche mechanische Belastbarkeit des Polyurethans ergibt. Weiterhin hat die Wahl des Vorvernetzers Einfluss auf das Verschleißverhalten des Endproduktes. Dieser Zusammenhang wird in diesem Kapitel erläutert.

Um Einflüsse wie die Härte der Bandage zu eliminieren wird in diesem Fall nur die ermittelte Verschleißrate über eine Bandagenhärte gemittelt. Gewählt wird die Härte 92 Shore-A, da diese die weiteste Verbreitung findet. Eine Mittelung über die unterschiedlichen Zwischenstoffe ist durchaus zulässig, da im normalen Einsatz von Schwerlaststrädern nicht davon auszugehen ist, dass lediglich ein Zwischenstoff isoliert auftritt.

Zur Darstellung dieser Abhängigkeit werden die Untersuchungsergebnisse gemittelt über dem gewählten Vernetzer aufgetragen. Das Ergebnis ist in **Abb. 7.22** dargestellt.

Dieses Ergebnis überrascht, da die NDI-vernetzten Polyurethane im Allgemeinen bessere mechanische Eigenschaften aufweisen und die Versuche unter gleicher mechanischer Beanspruchung durchgeführt werden. Jedoch zeigen die Untersuchungen, dass insbesondere der Verschleiß unter Einwirkung von Wasser bei NDI-vernetzten Polyurethanen zu z. T. extrem hohen Verschleißraten führen. Hier sind MDI-vernetzte Polyurethane deutlich überlegen. Da bei den Versuchen unter der Einwirkung der anderen Zwischenstoffe die Verschleißraten geringer

schwanken, wird das dargestellte Ergebnis stark von dem Zwischenstoff Wasser beeinflusst. Zur detaillierten Darstellung werden die Ergebnisse in der tabellarischen Aufstellung in **Abb. 7.23** gesondert dargestellt.

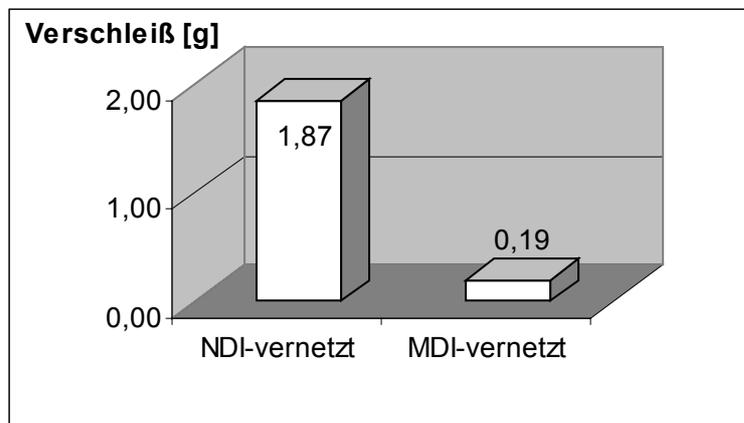


Abb. 7.22: Verschleiß von Rädern mit 200 mm Durchmesser in Abhängigkeit des Vorvernetzers, Bandagenhärte 92 Shore-A.

NDI		MDI	
Zwischenstoff	Verschleiß [g]	Zwischenstoff	Verschleiß [g]
Ohne	0,56	Ohne	0,26
Wasser	5,22	Wasser	-0,37
Sand	-0,01	Sand	0,16
Wasser + Sand	1,69	Wasser + Sand	0,72
Summe	7,46	Summe	0,77
Mittelwert	1,865	Mittelwert	0,193

Abb. 7.23: Tabellarische Aufstellung der Zahlenwerte zu **Abb. 7.22**.

In der tabellarischen Aufstellung in **Abb. 7.23** ist deutlich der Einfluss des Zwischenstoffes Wasser zu erkennen. Zusätzlich kann man erneut die Neigung des Polyurethans ablesen, Wasser durch Quellvorgänge einzulagern.

7.2.4 Verschleiß in Abhängigkeit der Radabmessungen und der Belastungshöhe

Untersucht werden zwei unterschiedliche Radabmessungen (siehe auch Kap. 5.1.1). Aufgrund ihrer unterschiedlichen Abmessungen unterscheiden sich die Prüfräder auch in ihrer mechanischen Belastbarkeit. Während die Räder mit einem Durchmesser von 100 mm mit einer Normalkraft zwischen 1.380 N für 75 Shore-A-Bandagen und 3.400 N für 92 Shore-A-Bandagen belastet werden, wird für Räder mit 200 mm Durchmesser die Normalkraft nicht über 5.400 N

erhöht, obwohl nach Herstellerangaben eine maximale Normalkraft von bis zu 8.000 N zulässig ist. Dieser Wert kann auf dem eingesetzten Rollenversuchsstand jedoch nicht eingestellt werden, da dieser lediglich für Radabmessungen von 100 mm Durchmesser ausgelegt worden ist. Zusätzlich ist es bei den 200 mm Rädern nicht möglich, die übertragene Tangentialkraft auf ein Maximum zu bringen, da die Motorleistung hierfür nicht ausreichend ist. Aus diesen Gründen ergibt sich, dass die Räder mit 200 mm Durchmesser nicht bis an ihre mechanische Belastungsgrenze beansprucht werden können.

Die Ergebnisse aus den Versuchsreihen mit 100- und 200-mm-Rädern werden also zu einem Vergleich des Verschleißverhaltens unter Volllast und Teillast herangezogen. Zu diesem Zweck wird der absolute Verschleiß in Gramm bezogen auf 1 cm Radbreite über alle Versuche gemittelt.

Eine Schwierigkeit stellt dabei die Ermittlung der tatsächlichen Höhe der Teillast dar, da sowohl Normalkraft als auch Tangentialkraft reduziert werden. Dabei wird die Normalkraft auf ca. 68 % reduziert und die Tangentialkraft auf ca. 50 %. Für die Darstellung wird daher ein Teillastbereich von ca. 60 % angenommen. Man kann also festhalten, dass der Verschleiß bereits durch eine geringe Absenkung der mechanischen Belastung effektiv verringert werden kann.

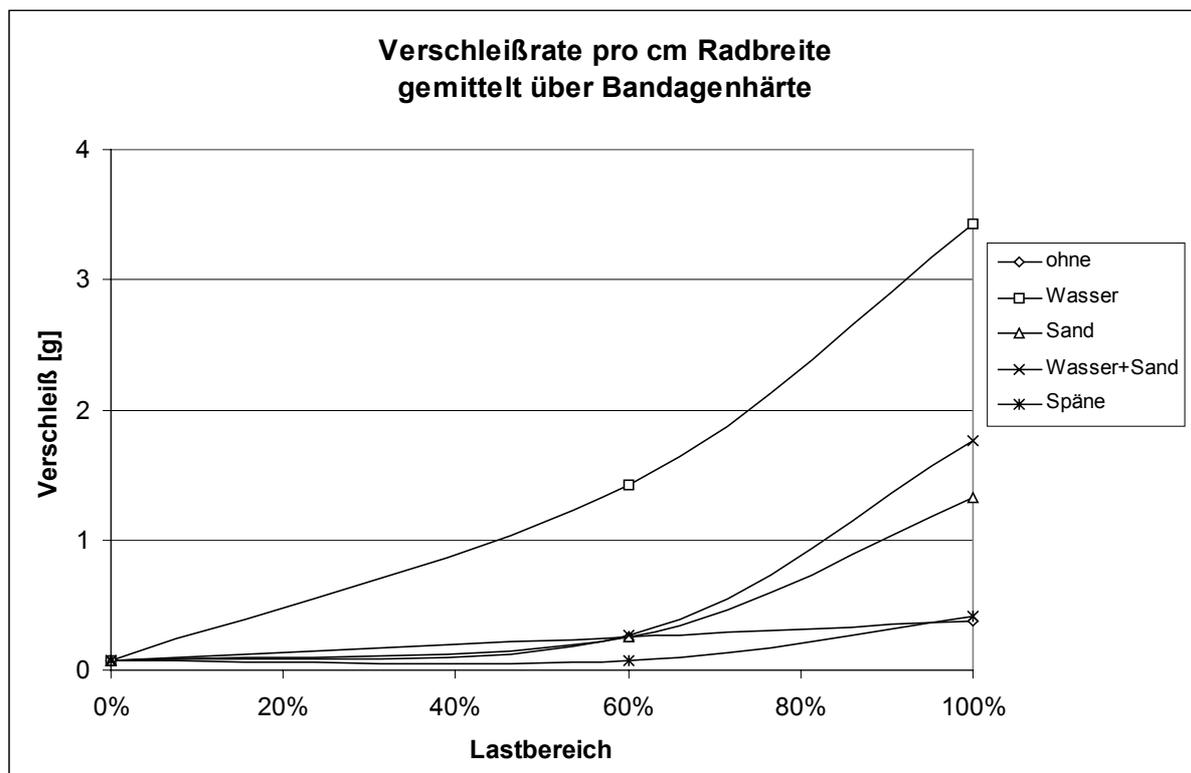


Abb. 7.24: Zunahme der Verschleißrate mit abnehmender mechanischer Beanspruchung unter Berücksichtigung des Zwischenstoffeinflusses.

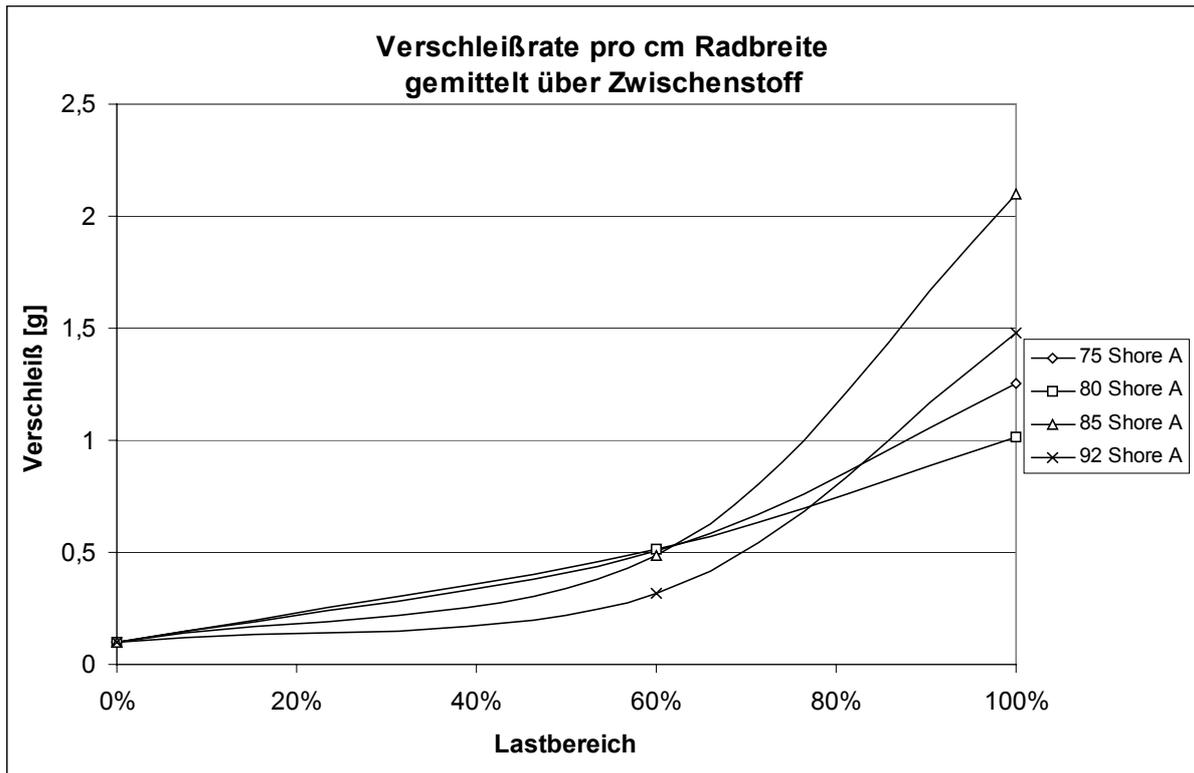


Abb. 7.25: Zunahme der Verschleißrate mit abnehmender mechanischer Beanspruchung unter Berücksichtigung des Einflusses der Bandagenhärte.

Weiterhin problematisch ist die Stufung Vollast und 60 % Teillast, da diese eine sehr grobe Streuung der Stützpunkte für die Darstellung der Lastabhängigkeit des Verschleißes darstellt. Es ist jedoch in den vorliegenden Untersuchungen nicht primär von Interesse, die Lastabhängigkeit des Verschleißes nachzuweisen. Deshalb ist es völlig ausreichend für den Nachweis der überproportionalen Verschleißverringerung, dass der Verschleiß auf weniger als 50 % abfällt, während die Last noch deutlich jenseits der 50 % liegt.

Eine Ausnahme bildet der Zwischenstoff Wasser (siehe **Abb. 7.24**). Da hier chemikalische Vorgänge den Verschleiß stärker beeinflussen als die tatsächlich vorhandene mechanische Belastung, fällt die Verschleißverringerung in diesem Fall nicht so deutlich aus.

7.2.5 Verschleiß in Abhängigkeit vom Schlupf

Der Schlupf stellt bei der Kraftübertragung durch polymerbeschichtete Räder und Rollen eine zentrale Größe dar. In der Literatur werden für eine optimale Kraftübertragung Werte für den Schlupf von bis zu 20 % angegeben. Je nach Beschaffenheit der Oberfläche, auf der das angetriebene Rad abwälzt, ist dabei von einer deutlichen Abhängigkeit des Verschleißes vom aufgetretenen Schlupf auszugehen. Eine zusätzliche Rolle spielt dabei der in der Kontaktfläche vorhandene Zwischenstoff, insbesondere wenn er abrasive Eigenschaften aufweist. Aus die-

sem Grunde wird im Folgenden der Verschleiß getrennt für jeden Zwischenstoff in Abhängigkeit vom während der Versuche gemessenen Schlupf dargestellt.

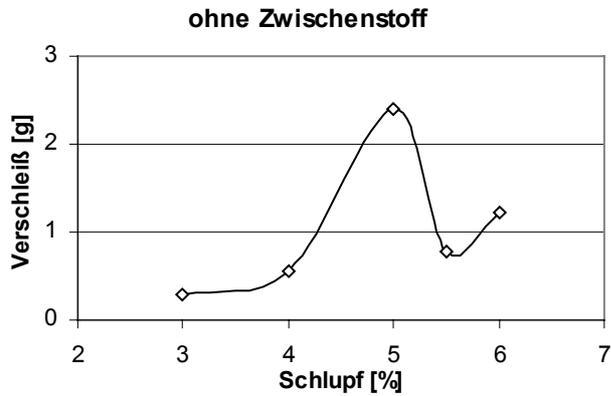


Abb. 7.26

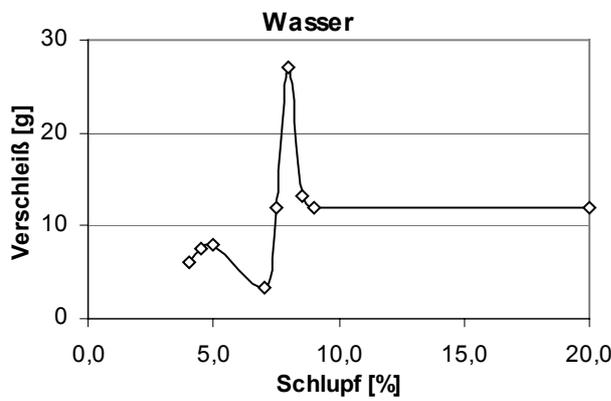


Abb. 7.27

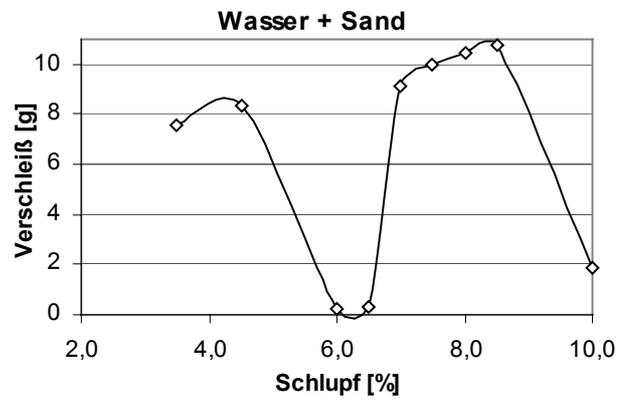


Abb. 7.28

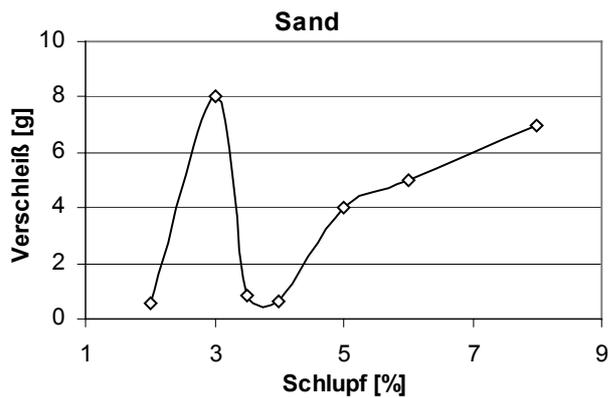


Abb. 7.29

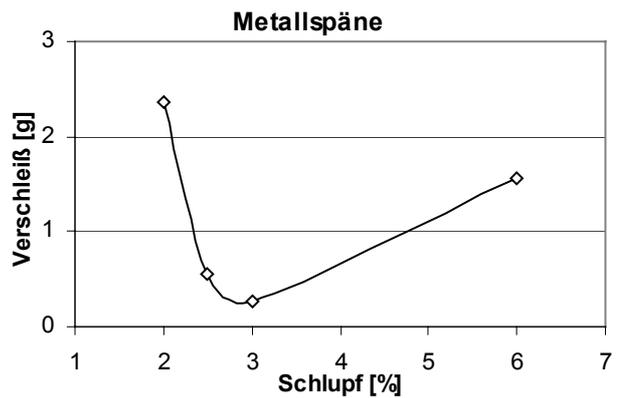


Abb. 7.30

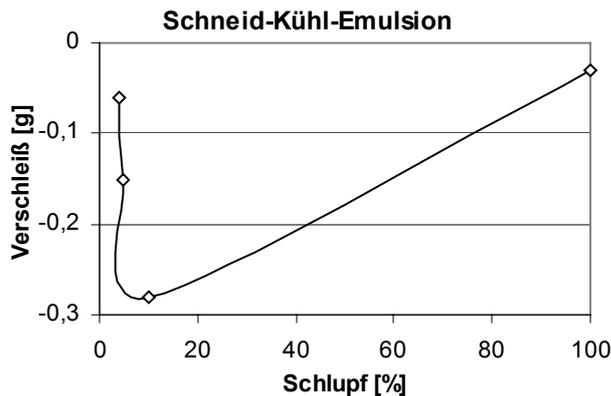


Abb. 7.31

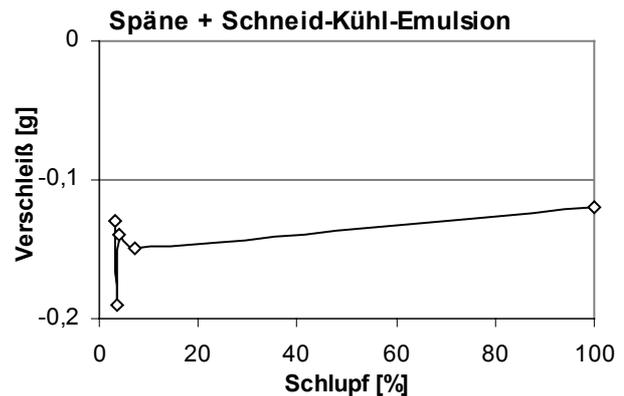


Abb. 7.32

Abb. 7.26 bis 7.32: Darstellung des Verschleißes in Abhängigkeit vom Schlupf, unterteilt nach Zwischenstoffen.

Auffällig sind die stark schwankenden Werte in den Fällen, in denen Wasser im Zwischenstoff auftritt bzw. den alleinigen Zwischenstoff darstellt. Dies ist durch die starke Abhängigkeit der Hydrolysevorgänge vom Vorvernetzer zu erklären, so dass es schwierig ist, hier eine direkte Abhängigkeit vom Schlupf zu ermitteln. In den anderen Fällen weist der Verlauf des Verschleißes deutliche Minima auf, die zwischen 2 und 5 % Schlupf liegen. Dies weist darauf hin, dass, entgegen der angegebenen Schlupfwerte für eine optimale Kraftübertragung bei bis zu 20 %, das Verschleißverhalten bei deutlich geringeren Schlupfwerten sein Optimum findet. Dieses Ergebnis wird für abrasiv wirkende Gegenflächen erwartungsgemäß noch deutlicher ausfallen.

7.3 Verschleißmechanismen

Zusammenfassend aus Kapitel 7.2 werden die Verschleißmechanismen in zwei grundlegende Typen unterteilt: Abrasiver Verschleiß und chemische Zersetzungsreaktionen. Diese Verschleißtypen können auch in Kombination auftreten, haben jedoch unter gewissen Umständen eine sich gegenseitig aufhebende Wirkung, wie dies bei Einsatz von Wasser und Sand als Zwischenstoff der Fall ist. Insbesondere beim abrasiven Verschleißtyp spielt die tangentielle Spannung in der Bandagenoberfläche eine entscheidende Rolle bei der zu erwartenden Höhe des Verschleißes, da die Rissausbreitung stark durch die Spannungsverteilung in der Oberfläche beeinflusst wird. Im Gegensatz hierzu spielt bei der chemikalischen Zersetzung der Bandagenoberfläche der Schlupf eine entscheidende Rolle. Da der Schlupf entscheidend von dem Verlauf der Normalspannung beeinflusst wird, ist davon auszugehen, dass der Verschleiß bei chemikalischer Zersetzung an den Rändern maximal wird, denn hier tritt bei gleicher elastischer Verformung eine geringere Normalkraftbelastung auf (siehe auch **Abb. 7.33**), so dass hier die Oberfläche früher zu rutschen beginnt.

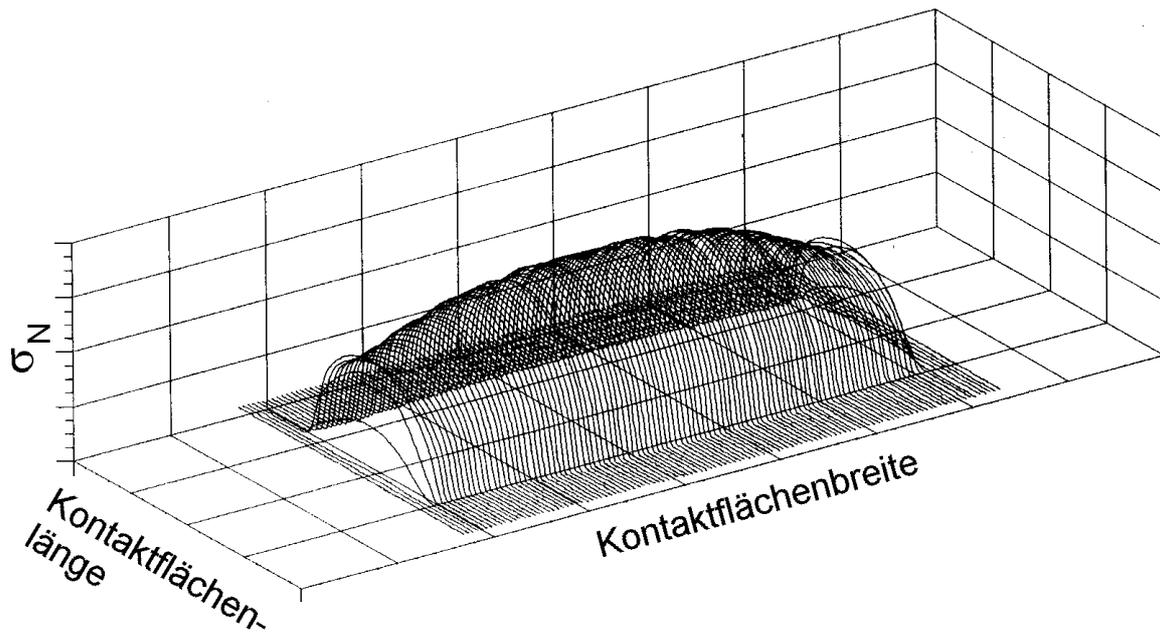


Abb. 7.33: Verlauf der Normalspannung σ_N in der Kontaktfläche nach *Severin* [sev99c].

Für die tangential übertragbaren Kräfte gilt die gleiche Verteilung, wie in **Abb. 7.33** dargestellt, da diese bei einem Reibbeiwert, der über die gesamte Kontaktfläche als konstant angenommen werden kann, direkt von der Normalkraft abhängt. Aus diesem Grund ist bei Vorliegen eines abrasiven Verschleißes mit einem Verschleißmaximum in der Mitte der Bandage zu rechnen. Der Grund hierfür liegt in der Abhängigkeit der Rissausbreitung von den tangentialen Spannungen, die durch diese verstärkt wird und somit das Ausbrechen des Werkstoffes fördert.

Diese Annahmen werden durch die Versuche bestätigt. **Abb. 7.34** zeigt links ein Rad, das unter der Einwirkung von Wasser als Zwischenstoff untersucht worden ist und rechts ein Rad, das mit Sand als Zwischenstoff eingesetzt wurde. Das über die Bandagenbreite unterschiedliche Verschleißverhalten ist deutlich zu erkennen. Weiterhin wird aus diesen Beobachtungen der entscheidende Einfluss der Spannungsverteilung auf das Verschleißverhalten deutlich.



Abb. 7.34: Darstellung der Abhängigkeit des Verschleißverhaltens von äußeren Einflüssen. Links Versuch mit Wasser, rechts mit Sand als Zwischenstoff.

7.4 Verlauf des Reibbeiwertes in Abhängigkeit vom Zwischenstoff

Der Reibbeiwert μ ist der zentrale Wert zur Bestimmung der Kraftschlussfunktion, wie sie in Kapitel 2.2 dargestellt ist. Er bestimmt somit wesentlich die Kraftübertragung und wird deshalb an dieser Stelle genauer betrachtet. Der Reibbeiwert wird im Wesentlichen von den folgenden Größen beeinflusst:

- Bandagenhärte
- Rauhtiefe R_z der Gegenfläche
- Zwischenstoff in der Kontaktfläche
- Wälzgeschwindigkeit
- Gleitgeschwindigkeit

Die Rauigkeit des Gegenrades hat sich während der Versuche nur in einem Bereich von $R_z = 11 \dots 18 \mu\text{m}$ bewegt. Da bei dieser geringen Variation der Rauhtiefe kein wesentlicher Einfluss auf das Reibungsverhalten erwartet werden kann, wird der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf den Reibbeiwert vernachlässigt. Weiterhin wird die Wälzgeschwindigkeit bei der Versuchsdurchführung konstant auf $3,1 \text{ ms}^{-1}$ gehalten, und die Gleitgeschwindigkeit, die von der Höhe des Schlupfes abhängt, bewegt sich in einem relativ eng begrenzten Bereich. Aus diesen Gründen können auch die Einflüsse der Wälz- und Gleitgeschwindigkeit auf den Reibbeiwert vernachlässigt werden.

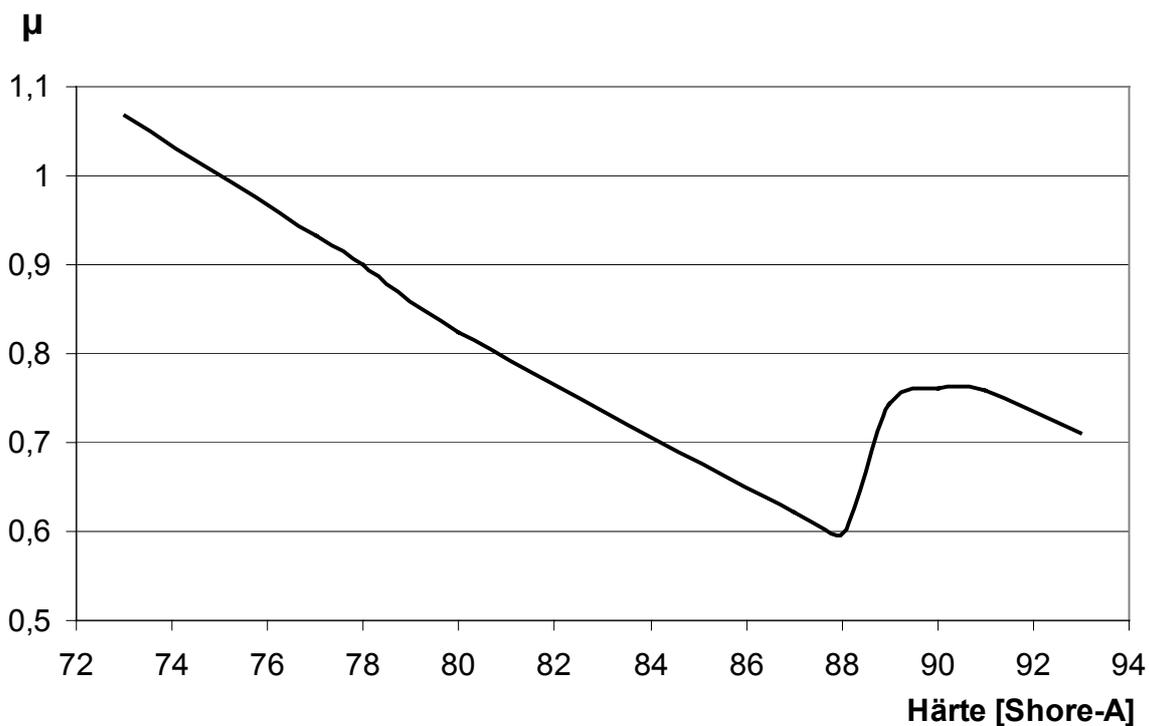


Abb. 7.35: Verlauf des Reibbeiwertes μ in Abhängigkeit von der Bandagenhärte.

Die Bandagenhärte hingegen hat bei den Untersuchungen einen deutlichen Einfluss auf den ermittelten Reibbeiwert. Zur Darstellung dieses Einflusses werden die Untersuchungen ohne Zuführung von Zwischenstoff herangezogen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in **Abb. 7.35** dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der mit zunehmender Bandagenhärte abfallende Reibbeiwert. Diese Eigenschaft ergibt sich aus dem besseren Anschmiegeverhalten der weicheren Bandagen.

Durch die Zuführung von Zwischenstoff in die Kontaktfläche zwischen Prüfrad und Gegenfläche wird der Reibbeiwert ebenfalls deutlich reduziert. Die Ursache dafür liegt in den schlechten Kraftübertragungseigenschaften der festen Zwischenstoffe und der schmierenden Wirkung von Wasser und Schneid-Kühl-Emulsion. Zur Darstellung der Abhängigkeit des Reibbeiwertes von dem eingebrachten Zwischenstoff werden die gemessenen Werte über die Bandagenhärten gemittelt, um deren Einfluss nicht mit zu berücksichtigen.

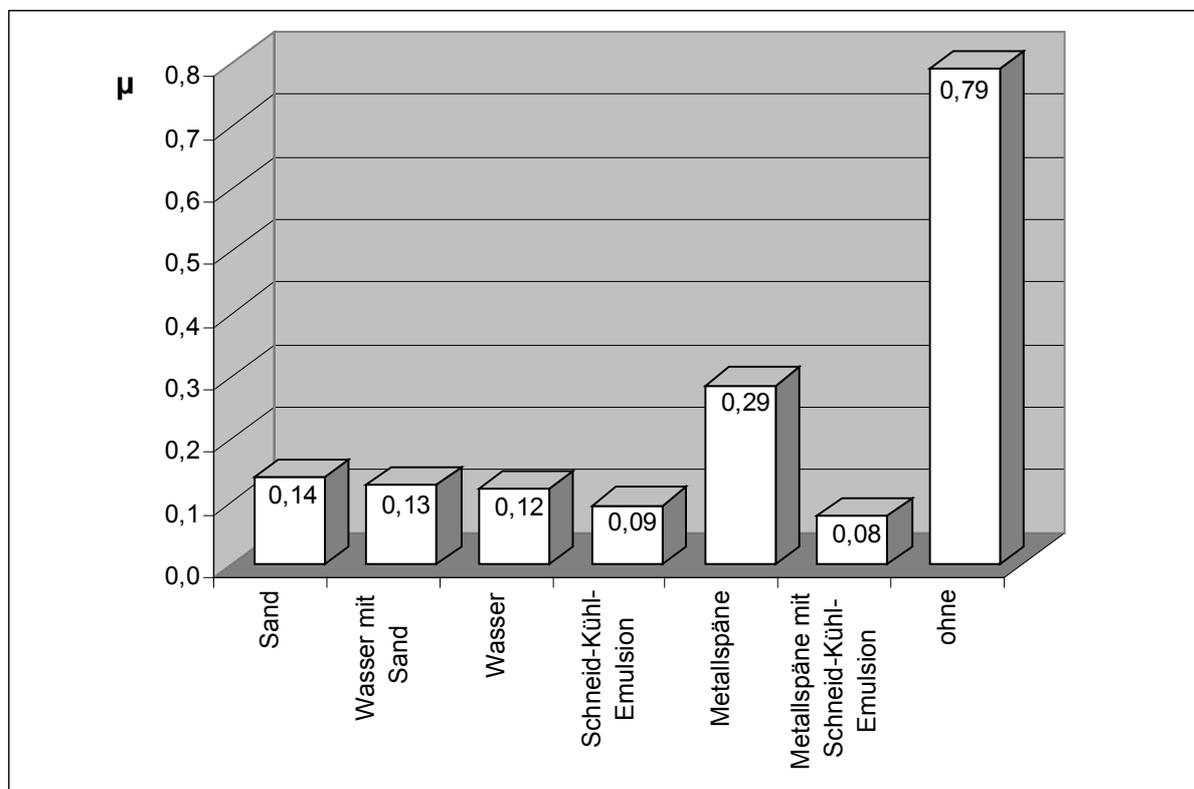


Abb. 7.36: Gemessene Höhe des Reibbeiwertes μ in Abhängigkeit vom Zwischenstoff.

Mit Ausnahme des Wertes für den Zwischenstoff Metallspäne liegt der ermittelte Reibbeiwert μ um ca. eine Größenordnung unter dem Wert, der sich aus den Untersuchungen ohne Zwischenstoff ergibt. Der Grund für den relativ hohen Reibbeiwert unter Einwirkung von Metallspänen liegt an der Beschaffenheit dieser Späne. So sind diese aufgrund ihrer äußeren Form nicht in der Lage, zwischen den Oberflächen von Reibrad und Gegenrad abzuwälzen und auf diese Weise die Kraftübertragung zu behindern. Weiterhin dringen die Späne durch ihre scharfen Kanten relativ leicht in die Oberfläche der Bandage ein und trennen diese deshalb

nicht so effektiv von der Oberfläche des Gegenrades. So können größere Bereiche des Polyurethans in Verbindung mit dem Gegenrad kommen und ihre günstigen Kraftübertragungseigenschaften zur Geltung bringen.

7.5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

An einem am Fachgebiet Maschinenelemente entwickelten Rollenversuchsstand wurden Untersuchungen des Verschleißverhaltens von Schwerlasträdern mit Polyurethanbandage durchgeführt. Als Prüflinge wurden handelsübliche Räder in zwei Abmessungen, vier unterschiedlichen Bandagenhärtegraden und zwei unterschiedlichen Polyurethantypen untersucht. Mit den Prüflingen wurde ein Gegenrad aus Stahl mit einem Durchmesser von 600 mm angetrieben, das über eine regelbare Magnetpulverbremse gebremst werden konnte. In die Kontaktfläche zwischen Prüfling und Gegenrad wurden mittels Druckluft unterschiedliche Zwischenstoffe eingebracht. Auf dieser Versuchsanordnung wurden Untersuchungen des Verschleißverhaltens durchgeführt. Dabei wurde der Verschleiß im Wesentlichen durch den Gewichtsverlust der Räder und die Beobachtung der Bandagenoberfläche beurteilt.

Die Versuche wurden nach 24 Stunden abgebrochen. Zwischenzeitliche Messungen des Verschleißes und Hochrechnen dieser Ergebnisse auf die Gesamtversuchsdauer haben gezeigt, dass innerhalb dieser Zeit ein aussagekräftiges Ergebnis erhalten werden kann.

Als Zwischenstoffe wurden Wasser, Sand, Metallspäne und Schneid-Kühl-Emulsion sowie Gemische aus Wasser mit Sand und Metallspänen mit Schneid-Kühl-Emulsion in die Kontaktfläche eingebracht. Dabei wurde der Einfluss der Zwischenstoffe auf das Verschleißverhalten der Prüflinge ermittelt. Zu Kontrollzwecken wurde eine vollständige Versuchsreihe ohne Zwischenstoffe durchgeführt.

Die untersuchten Härtegrade der Prüflinge wurden unterteilt in die im Handel gebräuchliche Stufung 75 Shore-A, 80 Shore-A, 85 Shore-A und 92 Shore-A. Zur Überprüfung dieser Eigenschaft wurden die Prüflinge vor den Versuchen mittels eines Härtemessgerätes gemessen. Dabei zeigte sich eine zum Teil weite Streuung der tatsächlichen Härte. Die Zuordnung in die gewählte Unterteilung wurde nach den gemessenen Werten vorgenommen. Prüflinge mit zu stark abweichenden Werten wurden dabei ausgesondert.

Die unterschiedlichen Polyurethantypen unterschieden sich durch den verwendeten Vernetzer zur Herstellung des sogenannten Prepolymers. In den Versuchen eingesetzt wurden Räder mit Bandagen aus MDI- und NDI-vernetzten Polyurethanen. Polyurethane mit dem ebenfalls möglichen TDI-Vernetzer wurde nicht betrachtet, da zur Herstellung eines Polyurethans der krebserregende Stoff MBOCA eingesetzt wird. Aus diesem Grund finden TDI-vernetzte Polyurethane in Europa nur eine geringe Verbreitung.

Der Einfluss der mechanischen Beanspruchung auf den Verschleiß wurde durch die unterschiedlichen Radabmessungen realisiert, dabei wurden die Prüflinge mit 200 mm Durchmesser insbesondere durch geringere tangentiale Kräfte bezogen auf die Radbreite beansprucht. Auf diese Weise ergab sich eine Belastung, die bei ca. 60 % der maximalen Belastung lag. Die Versuchsergebnisse zeigten einen deutlich nicht-linearen Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Verschleiß.

Um eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Beanspruchung zu erhalten, wurde bei der Entwicklung des Versuchsaufbaus auf die Erzeugung eines voreingestellten Zwangsschlupfes verzichtet. Somit war die Ermittlung des Schlupfes während der Durchführung der Versuche eine der zentralen Messgrößen. Die Höhe des Schlupfes wird dabei von der Kraftschluss-Schlupfbeziehung bestimmt. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich, dass die übertragbare Tangentialkraft direkt abhängig von dem Reibungswert μ ist. Da die Prüflinge jedoch nicht abrupt von der Haftreibung in vollständiges Gleiten übergehen, ist der momentane Schlupf die zur Bestimmung der Haftungsgrenzen und damit der übertragbaren Tangentialkraft bzw. Leistung wichtigste Größe zur Ermittlung der mechanischen Belastung unter variierenden Randbedingungen.

Zur Auswertung der Verschleißversuche wurden der Durchmesser und das Gewicht der Prüflinge vor, während und nach der Versuchsdurchführung gemessen. Es zeigte sich, dass aufgrund von über der Radbreite nicht konstantem Verschleiß die Durchmesserabnahme nur sehr eingeschränkt zur Beurteilung des Verschleißverhaltens geeignet war. Wesentlich nützlicher war die Überwachung des Gewichtes der Prüflinge sowie die Betrachtung der Oberflächenschädigung sowohl im makroskopischen als auch im mikroskopischen Bereich. Der wichtigste Einflussfaktor auf das Verschleißverhalten war die Wahl des Zwischenstoffes. Hier zeigten sich starke Unterschiede in der absoluten Verschleißmenge. Insbesondere der Verschleiß unter Einwirkung von Wasser als Zwischenstoff erzeugt einen unerwartet hohen Verschleiß, der im Wesentlichen auf chemikalische Vorgänge zurückzuführen ist. Speziell hydrolytische Vorgänge, die zu einer Verseifung in den obersten Werkstoffschichten führten, konnten als Hauptverursacher für den hohen Verschleiß ausgemacht werden. Der Verschleiß unter der Einwirkung von abrasiven Partikeln wie Quarzsand und Metallspänen lag unterhalb der Werte, wie sie mit Wasser erreicht wurden. Dennoch lag hier ein ausgeprägter Verschleiß vor, der im Wesentlichen auf die Bildung von Spannungsrissen in der Oberfläche und anschließendes Ausbrechen von Werkstoffpartikeln zurückgeführt werden kann. Dieses Ergebnis erklärt auch die starke Abhängigkeit des Verschleißvolumens von der mechanischen Beanspruchung der Prüflinge, die durch den Einsatz von unterschiedlichen Rollendimensionen realisiert wurde.

Dem gegenüber lag der Verschleiß bei Vorhandensein von Schneid-Kühl-Emulsion im Zwischenstoff um ein bis zwei Größenordnungen niedriger und erreichte sogar negative Werte. Der geringe Verschleiß war bei einem sowohl geschmierten als auch gekühlten Prüfling zu

erwarten, insbesondere, weil keine chemikalischen Reaktionen des Zwischenstoffes mit dem Bandagenwerkstoff bekannt sind. Dennoch war es von Interesse zu untersuchen, wie sich der Werkstoff im realen Einsatzfall, unter der dynamischen Belastung durch Überwalkung und in Verbindung mit Metallspänen als rissbildender Zwischenstoff, verhält. Die Untersuchungen haben jedoch keine kritischen Ergebnisse erbracht, was im Wesentlichen auf die geringe mechanische Beanspruchung aufgrund der geschmierten Oberfläche zurückzuführen war. Die Gewichtszunahme, die einem negativen Verschleiß gleichkommt, konnte erklärt werden durch Einlagerungen von Zwischenstoffen im Werkstoff der Bandagen in Folge von Rissbildung bzw. Quellvorgängen.

Darüber hinaus hatten auch andere Faktoren Einfluss auf das Verschleißverhalten. Zu nennen sind insbesondere die Bandagenhärte, der eingesetzte Vorvernetzer und die Höhe des Schlupfes. Bei der Bandagenhärte zeigte sich speziell der Einfluss auf den Verschleiß unter Einwirkung von Sand im Zwischenstoff. Hier war zu beobachten, dass der Verschleiß zusammen mit der Bandagenhärte abnahm. Da der Verschleiß unter Einwirkung von Sand im Wesentlichen auf Rissbildung zurückzuführen ist, ist dieses Ergebnis so zu deuten, dass ein weicherer Polyurethan weniger rissgefährdet ist. Im Gegensatz dazu hatte der eingesetzte Vorvernetzer einen großen Einfluss auf das Verschleißverhalten, wenn Wasser im Zwischenstoff vorlag. Hier zeigt sich eine wesentlich geringere Verschleißneigung, wenn der Werkstoff mit MDI vorvernetzt wurde. Hierfür scheinen hydrolytische Vorgänge in der Werkstoffoberfläche verantwortlich zu sein.

Da bei der Durchführung der Versuche kein konstanter, voreingestellter Schlupfwert vorlag, unterlag auch der Schlupf Schwankungen. Eine Betrachtung des Schlupfes hinsichtlich des Verschleißes ergab, dass brauchbare Werte deutlich unterhalb der für eine optimale Kraftübertragung in der Literatur zu findenden Grenze von 20 % Schlupf liegen. Dieses Ergebnis ist zu erwarten gewesen, da die Höhe des Schlupfes direkt von der übertragenen Leistung abhängt. Daher geht mit geringerem Schlupf auch eine geringere mechanische Beanspruchung des Prüflings einher, die aus bereits genannten Gründen einen geringeren Verschleiß mit sich bringt.

Neben der Ermittlung des Verschleißes wurde auch der Einfluss des Zwischenstoffes auf den Reibbeiwert untersucht. Interessanterweise zeigt der Verlauf des Reibbeiwertes ohne Einwirkung von Zwischenstoffen ein Minimum bei einer Bandagenhärte von ca. 88 Shore-A (siehe **Abb. 7.35**). Dieses Ergebnis deckt sich mit den Beobachtungen der Abhängigkeit des Verschleißes von der Bandagenhärte, die einen maximalen Verschleiß bei einer Bandagenhärte von ca. 85 Shore-A zeigt (siehe **Abb. 7.21**). Dieser Zusammenhang deutet auf einen wesentlichen Einfluss des Schlupfes auf den Verschleiß hin, der ja ebenfalls von der Bandagenhärte beeinflusst wird.

Die Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen wurden in Schaubildern dargestellt (**Abb. 7.2** und **7.3**). In diesen Schaubildern ist unter vergleichbaren Randbedingungen der zu erwartende Verschleiß eines Schwerlastrades in Gramm über eine Gebrauchsdauer von 24 Stunden aufgetragen. Aufgrund der Abhängigkeit des Verschleißes von der mechanischen Belastung kann nun bei der Auslegung von Getrieben oder Antrieben mit Schwerlasträdern unter Berücksichtigung der Randbedingungen das Verschleißverhalten durch eine einfache gezielte Überdimensionierung der Räder optimiert werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des durchgeführten Projektes wurde das Verschleißverhalten von Schwerlastrollen unter der Einwirkung von Zwischenstoffen in der Kontaktfläche untersucht. Obwohl bereits eine Vielzahl von Verschleißuntersuchungen auch zum Verschleißverhalten von Polymeren existieren, sind die vorliegenden Untersuchungen völlig neu, da hier zum ersten Mal Verschleißuntersuchungen unter der realitätsnahen Beanspruchung eines Radkörpers durchgeführt worden sind. Neben der Durchführung der Versuche direkt an Rädern als Prüflingen und der Berücksichtigung von Randbedingungen in Form von Zwischenstoffen ist die Tatsache besonders erwähnenswert, dass die Untersuchungen unter Übertragung einer tangentialen Kraft in der Kontaktfläche durchgeführt wurden. Somit ist es nun möglich, durch die konsequente Umsetzung der Untersuchungsergebnisse, Reibradantriebe unter Berücksichtigung besonderer Störeinflüsse in Form von Zwischenstoffen in der Kontaktfläche zwischen Rad und Fahrbahn und unter Berücksichtigung der maximalen Kraftübertragung verschleißoptimiert auszulegen. Dabei wurden als Zwischenstoffe nicht nur feste oder flüssige Stoffe untersucht, sondern ebenfalls Mischungen, wie sie im realen Einsatz in Fördermitteln auftreten können.

Bei den Untersuchungen zeigte sich insbesondere der große Einfluss, den die mechanische Belastung auf den Verschleiß von Rädern mit Polymerbandage hat. So wurde nachgewiesen, dass in vielen Fällen bereits durch eine einfache Überdimensionierung der Antriebsräder das Verschleißvolumen der Polymerbandage deutlich reduziert werden kann. In Fällen, in denen dies (z. B. aus Platzmangel) nicht möglich ist, wurden Anregungen hinsichtlich einer verbesserten Werkstoffwahl gegeben. Hier wurde besonderes Augenmerk auf den Vorvernetzer zur Herstellung des Prepolymers gelegt. Des Weiteren wurde der Einfluss des Schlupfes auf den Verschleiß betrachtet, so dass auch die Optimierung dieses Antriebsparameters nicht nur hinsichtlich der Kraftübertragung, sondern auch hinsichtlich des Verschleißes möglich ist.

Auf diese Weise ist es gelungen, ein Fundament zu schaffen, auf dem weiterführende Untersuchungen aufbauen können, die den Einfluss weiterer Zwischenstoffe betrachten. Denkbar wären z. B. Salzwasser, Streusplitt und eine Mischung dieser Stoffe. Diese Zwischenstoffe sind insbesondere in Anwendungen von Bedeutung, in denen der Reibradantrieb in Fördermitteln eingesetzt wird, die in winterlicher Umgebung arbeiten. Zusätzlich wäre eine Betrachtung von Zwischenstoffen, wie sie in industriellen Fertigungseinrichtungen auftreten, sinnvoll. Zu nennen sind hier Korundschleifstaub und Öle sowie weitere Emulsionen.

Des Weiteren wären genauere Betrachtungen dynamischer Einflüsse, wie sie durch Exzentrizitäten und andere Schwingungserregungen verursacht werden, von Interesse. Aus diesen Einflüssen ergibt sich eine relativ komplexe, nicht statische Belastung der Bandage, und unter Berücksichtigung solcher Vorgänge wäre es möglich, weitere spezielle Einsatzfälle von Schwerlastrollen besser einzubeziehen.

Da der Verschleiß von NDI-vernetzten Radbandagen unter Einwirkung von Wasser in den vorliegenden Untersuchungen die größten Werte angenommen hat, ist es denkbar, in dieser Richtung weiter nach konkreten Zusammenhängen zu suchen. Aufgrund der Abhängigkeit der Hydrolyse vom PH-Wert des Wassers wäre es sinnvoll, hier weitergehende Versuche durchzuführen, in denen der PH-Wert gezielt gesteuert wird. Weiterhin existieren Zusatzmittel, die den Polyurethanen im Herstellungsprozess zugefügt werden und die das Hydrolyseverhalten verbessern sollen. Zu nennen ist insbesondere das sogenannte Stabaxol[®] der Firma Rhein Chemie Rheingau GmbH, das die Hydrolysebeständigkeit um den Faktor 2 bis 3 verbessern soll. Auch der Einfluss dieses Zusatzmittels auf das Verschleißverhalten könnte Inhalt weiterführender Untersuchungen sein.

Mit der vorliegenden Arbeit ist es gelungen, ein Verfahren zu entwickeln und zu verifizieren, mit dessen Hilfe es möglich ist, das Verschleißverhalten dynamisch beanspruchter Polyurethanbandagen, wie sie in Reibradantrieben eingesetzt werden, zu untersuchen und zu beurteilen. Somit stellen weiterführende Untersuchungen, in denen zusätzliche Einflüsse Berücksichtigung finden, keine prinzipielles Problem mehr dar, sondern können durch die Anwendung des entwickelten Verfahrens und des gewonnenen Know-hows direkt ermittelt werden.

9 Literatur

- [bac98] T. Bachmann; Wechselwirkungen im Prozess der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn; VDI-Fortschrittberichte Reihe 12: Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik Nr. 360; VDI-Verlag 1998
- [bay98] Bayer AG; Vulkollan, Polyurethan-Elastomere auf Basis Desmodur 15 für höchste mechanische und dynamische Beanspruchung, Firmenschrift; Bayer AG Geschäftsbereich Polyurethane, Leverkusen; Ausgabe 10/98
- [bek92] S. Bekel; Horizontalkurvengängiger Gurtförderer mit dezentralen Antrieben; VDI-Fortschrittberichte Reihe 13: Fördertechnik Nr. 39; VDI-Verlag 1992
- [bli00] Heinrich Blickle GmbH u. Co. KG; Gesamt Katalog 2000; Rosenfeld
- [böh98] F. Böhm, K. Knothe (Hrsg.); Hochfrequenter Rollkontakt der Fahrzeugräder; Ergebnisse aus dem gleichnamigen Sonderforschungsbereich an der TU Berlin; Deutsche Forschungsgemeinschaft; Wiley-VCH, 1998
- [bra86] K. Brade, W. Bartl; Untersuchung von Belägen für Antriebstrommeln von Gurtförderern; Bergbautechnik 18 Nr. 8, 1986, S. 408 - 412
- [bre96] B. Breuer (Hrsg.); Darmstädter Reifenkolloquium; VDI-Fortschrittberichte Reihe 12: Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik Nr. 285; VDI-Verlag 1996
- [bre98] B. Breuer (Hrsg.); 2. Darmstädter Reifenkolloquium 16. Oktober 1998; VDI-Fortschrittberichte Reihe 12: Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik Nr. 362; VDI-Verlag 1998
- [buf61] H. Bufler; Beanspruchung und Schlupf beim Rollen elastischer Walzen; Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens 27 Nr. 4, 1961, S. 121 - 126
- [czi82] H. Czichos, P. Feinle; Tribologisches Verhalten von thermoplastischen, gefüllten und glasfaserverstärkten Kunststoffen
-Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen-; Forschungsbericht 83; Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin Juli 1982

- [DIN EN 12526] Räder und Rollen; Vokabular, empfohlene Formelzeichen und mehrsprachiges Wörterbuch; Europäische Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 05.1999
- [DIN EN 12527] Räder und Rollen; Prüfverfahren und Geräte; Europäische Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 05.1999
- [DIN EN 12533] Räder und Rollen; Schwerlastrollen für eine Geschwindigkeit über 1,1 m/s (4 km/h) und bis zu 4,4 m/s (16 km/h); Europäische Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 05.1999
- [DIN 30781] Transportkette; Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 1984
- [DIN 50282] Das tribologische Verhalten von metallischen Gleitwerkstoffen; Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 02.1979
- [DIN 50320] Verschleiß; Begriffe; Systemanalyse von Verschleißvorgängen; Gliederung des Verschleißgebietes; Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 12.1979
- [DIN 50321] Verschleiß-Messgrößen; Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 12.1979
- [DIN 50322] Kategorien der Verschleißprüfung; Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 03.1986
- [DIN 50323-2] Tribologie; Verschleiß; Teil 2: Begriffe; Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 08.1995
- [DIN 50323-3] Tribologie; Reibung; Teil 3: Begriffe, Arten, Zustände, Kenngrößen; Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 12.1993
- [DIN 50324] Prüfung von Reibung und Verschleiß; Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 07.1992
- [DIN 53505] Prüfung von Kautschuk und Elastomeren, Härteprüfung nach Shore-A und Shore-D; Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 08.2000
- [DIN 53516] Prüfung von Kautschuk und Elastomeren, Bestimmung des Abriebs; Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 06.1987
- [DIN 53531-1] Prüfung von Kautschuk und Elastomeren, Bestimmung der Haftung zu starren Materialien, Teil 1 Prüfung mit einer Platte; Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 10.1990

- [DIN 53531-2] Prüfung von Kautschuk und Elastomeren, Bestimmung der Haftung zu starren Materialien, Teil 2 Prüfung zwischen Zylindern mit kegeligen Enden; Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin, Köln 08.1990
- [dom88] H., Dominghaus; Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften; 3. Neubearbeitete Auflage; VDI-Verlag Düsseldorf 1988
- [ehr99] G. W. Ehrenstein; Polymer-Werkstoffe, Struktur – Eigenschaften – Anwendung; 2. Völlig überarbeitete Auflage; Carl Hanser Verlag 1999
- [erh74] G. Erhard, E. Strickle; Maschinenlemente aus thermoplastischen Kunststoffen; Band 1 Grundlagen und Verbindungselemente; VDI-Verlag Düsseldorf 1974
- [erh85] G. Erhard, E. Strickle; Maschinenlemente aus thermoplastischen Kunststoffen; Band 2 Lager und Antriebslemente; 2. Auflage; VDI-Verlag Düsseldorf 1985
- [erh80] G. Erhard; Zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Polymerwerkstoffen; Dissertationsschrift TH Karlsruhe 1980
- [ger95] M. Gersch; Modelluntersuchungen zum Abrasivgleitverschleißverhalten von SBR-Vulkanisaten unter Berücksichtigung ihres rezeptuellen Aufbaus sowie ausgewählter Parameter des Belastungskollektives und der Tribostruktur; Dissertationsschrift Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 1995
- [gey71] W. Geyer; Beitrag zur Gummireibung auf trockenen und insbesondere nassen Oberflächen; Dissertationsschrift TU München 1971
- [gri64] K.-J. Grimmer; Das Reibverhalten des Gurtes auf der Antriebs-trommel von Bandförderanlagen; Dissertationsschrift TH Hannover 1964
- [gri66] K.-J. Grimmer; Der Einfluss von Trommelbelägen und Feuchtigkeit auf den Reibbeiwert zwischen Fördergurt und Antriebs-trommel; Braunkohle 18 Nr. 9, 1966, S. 325 - 333
- [gro63] K. A. Grosch; The relation between the friction and visco-elastic properties of rubber; Proceedings of the royal Society of London, Bd A 274, 1963, S. 21 – 39

- [gro89] K. A. Grosch; Visko-elastische Eigenschaften von Gummimischungen und deren Einfluß auf das Verhalten von Reifen; Kautschuk und Gummi Kunststoffe, Bd 42/9, 1989, S. 745 - 751
- [hag97a] M. Hager, F. Will; Messung des Fahrwiderstandes von Kunststoffrädern; Maschinenmarkt 103, 1997, Nr. 8, S. 20 - 23
- [hag97b] M. Hager, F. Will; Prüfstand für Kunststoffräder ermöglicht Fahrwiderstandsmessung; Maschinenmarkt 103, 1997, Nr. 15, S. 78 – 80
- [hag98] M. Hager, F. Will; Antriebssysteme für Stückgut-Sortieranlagen; Teil 1; Antriebstechnik 37, 1998; S. 56 – 58
- [ham97] W. Hammele; Ermittlung der elastischen und viskoelastischen Kennwerte von Polymerwerkstoffen durch Rollkontaktversuche; VDI-Fortschrittberichte Reihe 5: Grund- und Werkstoffe, Nr. 492; VDI-Verlag 1997
- [her1882] H. Hertz; Über die Berührung fester elastischer Körper; J. Reine und Angewandte Mathematik 92, 1882, S. 156 - 171
- [hes83] W. Hesse; Verschleißverhalten des Laufrad-Schiene-Systems fördertechnischer Anlagen; Dissertationsschrift Ruhr-Universität Bochum 1983
- [heu97] A. Heuel, H. G. Kellermann, H. Weiß; Theoretische Betrachtungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Elastomeren auf glatten Oberflächen; Universität - Gesamthochschule Siegen, Institut für Werkstofftechnik, 1997
- [his92] F. Hiss, K. Knothe, G. Wang; Stationärer Rollkontakt für Walzen mit viskoelastischen Bandagen; Konstruktion 44, 1992, S. 105 – 112
- [hoh77] R. Hohmann; Reibungsverhältnisse zwischen Antriebstrommel und Fördergurt bei hohen Druckspannungen; Fördern und Heben 27 Nr. 4, 1977, S. 380-384
- [hoh75] R. Hohmann; Zur Kraftübertragung von Antriebstrommeln auf Fördergurte mit Stahlseileinlagen; Dissertationsschrift TU Hannover, 1975
- [jos83] H. Josteit; Aufbringung und Verschleiß von Belägen auf Förderbandtrommeln sowie Fertigung von Prallwänden aus Gummi; Braunkohle 35 Nr. 4, 1983, S. 117 – 119

- [jün89] R. Jünemann; Materialfluß und Logistik, Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen; Springer-Verlag 1989
- [kno89] K. Knothe, G. Wang; Zur Theorie der Rollreibung zylindrischer Kunststofflaufräder; Konstruktion 41, 1989, S. 193 - 200
- [kra70] K. Kraft; Die Rollreibung bei veränderlichem Reibwert; Dissertationsschrift TH Wien 1968; Verlag Notring 1970
- [kra83] I. V. Kragelski, M. N. Dobycin, V. S. Kombalov; Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiß; Carl Hanser Verlag 1983
- [kra85] H. Krause, C. Schroelkamp; Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Verfahren der Oberflächenbehandlung auf das Verschleißverhalten technisch trockener Wälzreibungssysteme; Westdeutscher Verlag 1985
- [küh90] B. Kühlken; Mechanisches und thermisches Verhalten von Kunststoffrädern in Abhängigkeit der Normalkraft und Rollgeschwindigkeit; VDI-Fortschrittberichte Reihe 1: Konstruktionstechnik / Maschinenelemente Nr. 190; VDI-Verlag 1990
- [kün01] B. Künne; Einführung in die Maschinenelemente, Gestaltung, Berechnung, Konstruktion; 2. überarbeitete Auflage; Teubner Verlag, Stuttgart 2001
- [lüt84] H. Lütkebohle; Roll- und Wälzreibung zylindrischer Räder aus thermoplastischen Kunststoffen; Dissertationsschrift TU Berlin 1984
- [möh95] P. Möhler; Lokale Kraftgrößen in der Berührungsfläche zwischen Kunststoffrad und Stahlfahrbahn; Forschung im Ingenieurwesen Bd. 61, 1995, S. 29-41
- [möh93] P. Möhler; Lokale Kraft- und Bewegungsgrößen in der Berührungsfläche zwischen Kunststoffrad und Stahlfahrbahn; VDI-Fortschrittberichte Reihe 1: Konstruktionstechnik / Maschinenelemente, Nr. 228; VDI-Verlag 1993
- [mus94] F. Musiol; Erklärung der Vorgänge in der Kontaktzone von trockenlaufenden Reibpaarungen über gesetzmäßig auftretende Phänomene im Reibprozess; Dissertationsschrift TU Berlin 1994

- [pah93] Pahl / Beitz; Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung; 3. neubearbeitete und erweiterte Auflage; Springer-Verlag 1993
- [pig85] O. Pigors; Verschleißverhalten von Werkstoffen; 1. Auflage; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1985
- [pla00a] P. Plate; Polyurethan-Elastomere in der Praxis; Kunststoffe Jahrgang 90; 2000, S. 87 – 92
- [pla00b] P. Plate; Achillesferse Rad; Stapler Technik 2000; 08.2000, S. 54 – 56
- [pla02] P. Plate, T. Stingl; Das Gesamtsystem im Auge behalten Teil 1 und 2, Fördern und Heben 52, 2002; Teil 1 S. 212 – 215, Teil 2 S. 289 - 290
- [pol82] G. Polzer, F. Meißner; Grundlagen zu Reibung und Verschleiß; 2. Auflage; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1982
- [qia97] L. Qiao; Beanspruchung und Wärmeentwicklung in rollenden Rädern aus viskoelastischen Werkstoffen; VDI-Fortschrittberichte Reihe 1: Konstruktionstechnik / Maschinenelemente Nr. 289; VDI-Verlag 1997
- [räd00] Räder-Vogel GmbH & Co.; Katalog 2000; Hamburg
- [reh98] P. Rehbein, J. Wallascheck; Friction and wear behaviour of polymer/steel and alumina/alumina under high-frequency fretting conditions; Wear Band 216 Ausgabe 2, S. 97 - 105; April 1998
- [sac80] F.-W. Sackmann; Die Lebensdauer von Wälzrädern mit weichelastischem Belag bei Übertragung von Tangentialkraft; Dissertationsschrift TU Braunschweig 1980
- [sch83] K. Schäfer; Reibung und Verschleiß thermoplastischer Polymerwerkstoffe; Dissertationsschrift Ruhr-Universität Bochum 1983; VDI-Fortschrittberichte Reihe 5: Grund- und Werkstoffe Nr. 73; VDI-Verlag 1983
- [sch72] G. Schreyer; Konstruieren mit Kunststoffen, Teil 2; Carl Hanser Verlag München 1972

- [sev99a] D. Severin; Beachtenswerte Besonderheiten des Kunststoffrades beim Einsatz in Materialflußsystemen; Vortrag 7. Kranfachtagung 1999, TU Berlin
- [sev89a] D. Severin; Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an thermoplastischen Kunststoffrollen bis 125 mm Durchmesser; Institut für Fördertechnik und Getriebetechnik TU Berlin; Forschungsbericht 1989
- [sev89b] D. Severin, W. Hammele; Zur Kraftübertragung zwischen Kunststoffrad und Stahllaufbahn, Teil 1 und 2; Konstruktion 41, 1989; Teil 1 S. 123 – 129, Teil 2 S. 163 – 171
- [sev94] D. Severin, W. Hammele, L. Qiao; Die quasi-elastische Berechnung viskoelastischer Rollkörper; Forschung im Ingenieurwesen Bd. 60, 1994, S. 110 - 119
- [sev91] D. Severin, B. Kühlken; Tragfähigkeit von Kunststoffrädern unter Berücksichtigung der Eigenerwärmung, Teil 1 und 2; Konstruktion 43; 1991, Teil 1 S. 65 – 71, Teil 2 S. 153 – 160
- [sev99b] D. Severin, X. Liu; Zum Rad-Schiene-System in der Fördertechnik – Berechnung und beanspruchungsgerechter Einsatz von Kunststoffrädern; dhf 5/99; S. 40 – 46
- [sev99c] D. Severin, X. Liu, S. Tromp; Das Kunststoffrad als Antriebs-element in Fördersystemen; 7. Kranfachtagung 1999, TU Berlin
- [sev85] D. Severin, H. Lütkebohle; Rollreibung zylindrischer Laufräder aus Kunststoff; Konstruktion 37, 1985; S. 177 - 184
- [sev86] D. Severin, H. Lütkebohle; Wälzreibung zylindrischer Räder aus Kunststoff; Konstruktion 38, 1986; S. 173 - 179
- [sev96] D. Severin, L. Qiao; The thermomechanical calculation of polymer roller with finite element method; Civil-Comp Press, Edinburgh, 1996, S. 73 – 77
- [sev93] D. Severin, L. Qiao, W. Hammele; A Finite Element Solution for the Three-dimensional Contact Problem of Polymer-covered Rollers; FEM Today and the Future, edited by John Robinson-Seventh World Congress on Finite Element Methods, Monte Carlo 1993, Seite 223-229
- [sev02] D. Severin, X. Liu; Die Beanspruchung in der Teilfuge rollender Räder, bestehend aus einer Stahlnabe und einer Kunststoffban-

- dage; Bericht über das DFG-Forschungsvorhaben Se 342/26, Deutsche Forschungsgemeinschaft; 2002
- [spi83] N. Spiegel; Form- und reibschlüssige Antriebe in Druckwerken und ihr Zusammenwirken; Dissertationsschrift TH Darmstadt 1983
- [ste94] Steinhilper / Röper; Maschinen und Konstruktionselemente, Band 1 Grundlagen der Berechnung und Gestaltung; 4. Auflage; Springer-Verlag 1994
- [str75] G. Strothmann; Untersuchungen der Schlupfverhältnisse an Wälzrädern mit weichelastischem Belag bei Kraftübertragung; Dissertationsschrift TU Braunschweig 1975
- [toc79] Tochtermann / Bodenstern; Konstruktionselemente des Maschinenbaues, Teil 1; 9., verbesserte Auflage; Springer-Verlag 1979
- [tro01] S. Tromp; Allgemeine Einführung in die Welt des Kunststoffrades; Internetseite <http://ws-ifg.kf.tu-berlin.de/> Links: Forschung, Kunststoffräder, Aufsatz; 2001
- [uet84] H. Uetz, J. Wiedemeyer; Tribologie der Polymere, Grundlagen und Anwendungen in der Technik; Carl Hanser Verlag München Wien 1984
- [VDI-4466] VDI-Richtlinie 4466 Blatt 1; Automatische Parksysteme, Grundlagen; Entwurf von 09.1999; Verein Deutscher Ingenieure
- [wan91] G. Wang; Rollkontakt zweier viskoelastischer Walzen mit Coulombscher Reibung; Dissertationsschrift TU Berlin 1991
- [wan93] G. Wang, K. Knothe; Stress analysis for rolling contact between two viscoelastic cylinders; Transactions of the ASME, Vol. 60, Juni 1993
- [wan88] G. Wang, K. Knothe; Theorie und numerische Behandlung des allgemeinen rollenden Kontaktes zweier viskoelastischer Walzen; VDI-Fortschrittberichte Reihe 1: Konstruktionstechnik / Maschinenelemente, Nr. 165; VDI-Verlag 1988
- [wes97] F. Wesselmann; Untersuchungen zur Weiterentwicklung automatischer Blocklagersysteme mit gekuppelten Rollpaletten; Dissertationsschrift Universität Dortmund 1997

- [wic93] Wicke GmbH & Co. KG; Katalog Räder und Rollen 1993; Sprockhövel
- [wie85] J. Wiedemeyer; Deutung des tribologischen Verhaltens ungeschmierter Thermoplaste auf der Basis von Modellrechnungen sowie experimentellen Ergebnissen; VDI-Fortschrittberichte Reihe 5: Grund- und Werkstoffe, Nr. 96; VDI-Verlag 1985
- [wil98] F. Will; Auslegung und Gestaltung von Antriebssystemen für Stückgut- Sortieranlagen; VDI-Fortschrittberichte Reihe 13: Fördertechnik / Logistik Nr. 47; VDI-Verlag 1998
- [wol89] F. M. Wolpers; Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Fördergurten; Dissertationsschrift Universität Hannover 1989
- [wül01] S. Wülfert; Internet Teaching in Conservation; Internetseite zum Studiengang Restaurierung und Konservierung der Fachhochschule Bern, <http://surf.agri.ch/wuelfert/modmats/IdeenProjekte/oelkers/degradation.htm>, 2001
- [yin97] X. Yin; Experimentelle Untersuchung des instationären Rollkontaktes zwischen Rad und Fahrbahn; VDI-Fortschrittberichte Reihe 12: Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik Nr. 313; VDI-Verlag 1997
- [zed87] H. Zeddies; Untersuchung der Beanspruchung von Trommelbelägen mit dem Ziel der Belagoptimierung; Dissertationsschrift Universität Hannover 1987
- [zep83] F. Zepperndick; Förderbandtrommeln mit Verschleißschutz durch Elastomere; Braunkohle 35 Nr. 1/2, 1983, S. 20 - 26
- [zga90] K.-H. Zum Gahr; Reibung und Verschleiß bei metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen; Vortragstexte eines Symposiums der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde, DGM-Informationsgesellschaft m.b.H., 1990

Anhang A:**Verwendete Formelzeichen:**

A	-	Fläche
a_0	-	Gleitgeschwindigkeitsfaktor
B	-	Breite
D	-	Durchmesser
E^n	-	Quasi-Elastizitätsmodul; Viskoelastizitätsmodul
F	-	Kraft
f	-	Kraftschlussbeiwert
H	-	Härte-, Vernetzungsgrad
k	-	Konstante
L	-	Kontaktflächenlänge; Rollenbelastung
M	-	Drehmoment
n	-	Drehzahl
p	-	Flächenpressung
R	-	Rauhtiefe
r	-	Radius
s	-	Schlupf
s_g	-	Grenzschlupf
T	-	Temperatur
t	-	Zeit
V	-	Verschleiß
v	-	Geschwindigkeit
w	-	Gleitgeschwindigkeit
x	-	allg. Faktor
ε	-	Dehnung
μ	-	Reibungskoeffizient
σ	-	Spannung
ω	-	Winkelgeschwindigkeit
π	-	Kreiszahl

10 Verwendete Indizes:

B	-	Bremse
g	-	Gleiten
i	-	Numerierungsindex
x	-	Koordinatenrichtung
y	-	Koordinatenrichtung
z	-	Koordinatenrichtung
N	-	Normalen-Richtung
T	-	Tangential-Richtung

Verwendete Abkürzungen:

MDI	Methylendiphenyldiisocyanat
NDI	Naphtalindiisocyanat
PU / PUR	Polyurethan
TDI	Toluoldiisocyanat
MbOCA	Methylene bis (ortho-chloroaniline)

Anhang B:

Vordruck zur Protokollierung der Versuche (Versuchsprotokoll)

Vordruck zur Beschreibung und Analyse von Verschleißvorgängen								
Allgemeine Beschreibung des Verschleißvorganges:		Datum: Uhrzeit:	Bereiter: Versuch-Nr.:					
Feste Versuchsparameter: Rollnummer: # <input style="width: 50px;" type="text"/>		Schlupf Datei: .txt Temp. Datei: .prn Versuchsdaten: meh						
Variable Versuchsparameter: Umgebungslufttemperatur: <input style="width: 50px;" type="text"/> °C		Nach Versuchsende: <input style="width: 50px;" type="text"/> °C						
Abdruck von Kontaktfläche <input type="checkbox"/> erledigt		Luftfeuchtigkeit: bei Beginn <input style="width: 50px;" type="text"/> % rel.						
Rauhtiefe vor Versuchbeginn: <input style="width: 50px;" type="text"/> µm		Bandagenwerkstoff: <input style="width: 100px;" type="text"/>						
Nach Versuchsende: <input style="width: 50px;" type="text"/> µm		Shorehärte: <input style="width: 50px;" type="text"/> A						
Ausgangsdurchmesser: <input style="width: 50px;" type="text"/> mm		Gewicht (20er = 16,7 kg): <input style="width: 50px;" type="text"/> kg						
Ausgangsgewicht: <input style="width: 50px;" type="text"/> g		↳ Vorspannung: <input style="width: 50px;" type="text"/> N						
Ausgangsdurchmesser: <input style="width: 50px;" type="text"/> mm		Bremsmoment: <input style="width: 50px;" type="text"/> Nm						
Ausgangsgewicht: <input style="width: 50px;" type="text"/> g		Schwungradzahl: <input style="width: 50px;" type="text"/> min ⁻¹ mgl. 100 U/min						
Ausgangsgewicht: <input style="width: 50px;" type="text"/> g		↳ übertragene Leistung: <input style="width: 50px;" type="text"/> kW						
Ausgangsgewicht: <input style="width: 50px;" type="text"/> g		Zwischenstoff: <input style="width: 100px;" type="text"/>						
Die grau hinterlegten Felder müssen vor Versuchsbeginn ausgefüllt werden!								
Versuchsergebnisse:								
1. Durchmesserabnahme: (max. 10% der Bandagendicke) + Temperaturverlauf in der Bandage								
Zeitverlauf	nach 0,5 h	nach 1 h	nach 2 h	nach 3 h	nach 5 h	nach h	nach h	nach h
Durchmesser	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Gewicht	g	g	g	g	g	g	g	g
Temperatur	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
2. Ablagerungen / Einlagerungen in der Bandagenoberfläche / Verschleißbild:				Beschreibung: <div style="border: 1px solid black; height: 60px; width: 100%;"></div>				
3. Eingebraachte Zwischenstoffmengen:				Dauer Teilversuch: <input style="width: 30px;" type="text"/> h <input style="width: 30px;" type="text"/> min				
Bemerkungen:				∅ nach Teilversuch (warm!): <input style="width: 50px;" type="text"/> mm				
				∅ nach Teilversuch (kalt!): <input style="width: 50px;" type="text"/> mm				
				Temperatur nach Teilversuch: <input style="width: 50px;" type="text"/> °C				
				Gewicht nach Teilversuch: <input style="width: 50px;" type="text"/> g				
Bemerkungen:								

Anhang C:

Übersicht über die durchgeführten Versuche

Versuchsnummer	RollenØ [mm]	Vernetzer	Shorehärte	Zwischenstoff	Normalkraft	Verschleiß	Reibbeiwert
v02#05	100	Vulkollan	92A	Sand	3400 N	8 g	0,095
v03#11	100	Vulkollan	85A	Sand	3000 N	4 g	0,13
v04#09	100	Vulkollan	81A	Sand	2700 N	5 g	0,14
v05#44	100	MDI	73A	Sand	1340 N	5,25 g	0,24
v06#06	100	Vulkollan	90A	Wasser	3400 N	8 g	0,06
v07#08	100	Vulkollan	84A	Wasser	3000 N	27 g	0,094
v08#07	100	Vulkollan	81A	Wasser	2450 N	12 g	0,12
v09#46	100	MDI	72A	Wasser	1340 N	12,34 g	0,11
v10#38	100	Vulkollan	92A	Wasser+Sand	3400 N	7,58 g	0,06
v11#04	100	Vulkollan	92A	Wasser+Sand	3400 N	10 g	0,13
v12#12	100	Vulkollan	84A	Wasser+Sand	3000 N	10,46 g	0,09
v13#25	200	MDI	73A	ohne	5400 N	7,99 g	---
v14#20	200	Vulkollan	92A	ohne	5400 N	0,56 g	---
v15#23	200	MDI	90A	ohne	5400 N	0,33 g	---
v16#34	200	MDI	90A	Wasser	5400 N	0,92 g	---
v17#37	200	MDI	73A	Wasser	4400 N	5,48 g	---
v18#29	200	Vulkollan	92A	Wasser	5400 N	5,22 g	---
v19#30	200	Vulkollan	93A	Sand	5400 N	-0,01 g	---
v20#33	200	MDI	90A	Sand	5400 N	0,63 g	---
v21#36	200	MDI	74A	Sand	4400 N	1,41 g	---
v22#35	200	MDI	72A	Wasser+Sand	4400 N	-0,05 g	---
v23#31	200	Vulkollan	92A	Wasser+Sand	5400 N	1,69 g	---
v24#32	200	MDI	90A	Wasser+Sand	5400 N	1,81 g	---
v25#16a	200	Vulkollan	85A	Wasser	5400 N	8 g	---
v26#13a	200	Vulkollan	80A	Wasser	3400 N	9,72 g	---
v27#14a	200	Vulkollan	80A	Sand	3400 N	2,02 g	---
v29#18a	200	Vulkollan	85A	Wasser+Sand	3750 N	2,02 g	---
v31#13b	200	Vulkollan	80A	Wasser+Sand	3400 N	0,16 g	---
v32#14b	200	Vulkollan	80A	ohne	3400 N	0,7 g	---
v33#18b	200	Vulkollan	85A	ohne	3750 N	0,78 g	---
v34#16b	200	Vulkollan	85A	Sand	3750 N	0,98 g	---
v35#47	100	Vulkollan	81A	Wasser+Sand	2450 N	1,84 g	0,075
v36#65	100	Vulkollan	92A	ohne	3400 N	0,77 g	0,146
v37#52	100	Vulkollan	85A	ohne	3000 N	2,4 g	0,16
v38#60	100	MDI	74A	Wasser+Sand	1380 N	0,28 g	0,145
v39#58	100	MDI	75A	ohne	1380 N	1,23 g	0,35
v40#53	100	Vulkollan	85A	Wasser	3000 N	13,13 g	0,11
v41#59	100	MDI	75A	Wasser	1380 N	11,98 g	0,12
v42#54	100	Vulkollan	85A	ohne	3000 N	1,39 g	0,16
v43#51	100	Vulkollan	90A	Sand	3100 N	0,82 g	0,09
v44#62	100	MDI	80A	ohne	2450 N	0,56 g	0,125
v45#48	100	Vulkollan	92A	Wasser+Sand	3400 N	10,8 g	0,106
v46#59	100	MDI	88A	Wasser+Sand	2450 N	8,34 g	0,17
v47#57	100	MDI	88A	Wasser	3000 N	6,14 g	0,14
v48#66	100	Vulkollan	90 A	Sand	3000 N	0,59 g	0,166
v49#49	100	Vulkollan	89A	Wasser+Sand	3000 N	9,16 g	0,131
v50#50	100	Vulkollan	89A	Wasser	2610 N	7,46 g	0,164
v51#63a	100	MDI	80A	Wasser	2120 N	3,41 g	0,162
v52#61	100	MDI	73A	Sand	1130 N	0,6 g	0,496

Versuchsnummer	RollenØ [mm]	Vernetzer	Shorehärte	Zwischenstoff	Normalkraft	Verschleiß	Reibbeiwert
v53#27	200	MDI	73A	ohne	3400 N	4,64 g	---
v54#28	200	MDI	72A	Wasser+Sand	3400 N	1,58 g	---
v56#60b	100	MDI	74A	Späne	1130 N	1,56 g	0,502
v57#63b	100	MDI	80A	Späne	2120 N	0,26 g	0,252
v58#61a	100	MDI	72A	Schneidkühl- emulsion	1130 N	-0,03 g	0,154
v59#64	100	MDI	80A	Schneidkühl- emulsion	2120 N	-0,28 g	0,073
v60#66	100	Vulkollan	90A	Schneidkühl- emulsion	3000 N	-0,06 g	0,073
v61#66c	100	Vulkollan	90A	Späne+Schneid- kühlemulsion	3000 N	-0,13 g	0,053
v62#04	100	Vulkollan	92A	Späne	3000 N	0,55 g	0,175
v63#61c	100	MDI	72A	Späne+Schneid- kühlemulsion	1130 N	-0,12 g	0,146
v64#61d	100	MDI	72A	Späne+Schneid- kühlemulsion	1130 N	-0,15 g	0,172
v65#19	200	Vulkollan	92A	Späne	5400 N	0,05 g	---
v66#18c	200	Vulkollan	85A	Späne	3750 N	0,43 g	---
v67#13c	200	Vulkollan	80A	Späne	2770 N	0,17 g	---
v68#26	200	MDI	72A	Späne	3400 N	0,79 g	---
v69#61e	100	MDI	72A	Wasser+Sand	1130 N	0,2 g	0,162
v70#41	100	MDI	90A	Späne	2450 N	2,35 g	0,211
v72#73	100	Vulkollan	85A	Schneidkühl- emulsion	3000 N	-0,15 g	0,074
v73#77	100	Vulkollan	80A	Späne+Schneid- kühlemulsion	2120 N	-0,14 g	0,043
V74#74	100	Vulkollan	85A	Späne+Schneid- kühlemulsion	3000 N	-0,19 g	0,037