
Inhaltsverzeichnis

1	Erzielte Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten.....	2
2	Darstellung der Ergebnisse.....	3
2.1	Vorgehensweise	3
2.2	Randbedingungen.....	3
2.2.1	Grundlagen der Herstellung von Radbandagen aus Polyurethanen.....	3
2.2.2	Systemtechnische Randbedingungen	3
2.2.3	Geometrische Randbedingungen.....	5
2.2.4	Dynamische Randbedingungen.....	6
2.2.5	Kinematische Randbedingungen.....	6
2.3	Versuchsaufbau:	7
2.4	Versuchsdurchführung	9
2.4.1	Grundlegende Betrachtungen zur Belastung eines Reibrades.....	9
2.4.2	Durchgeführte Messungen	10
2.4.3	Versuchsprogramm	12
2.5	Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse.....	13
2.5.1	Allgemeines.....	13
2.5.2	Verschleiß in Abhängigkeit des Zwischenstoffes	14
2.5.3	Verschleiß in Abhängigkeit des Vernetzers	23
2.5.4	Verschleiß in Abhängigkeit der Radabmessungen und der Belastungshöhe ..	23
2.5.5	Verschleiß in Abhängigkeit der Bandagenhärte.....	25
2.5.6	Verschleißmechanismen.....	25
3	Zusammenfassung und Ausblick	27
4	Literatur.....	28
5	Veröffentlichungen.....	29
6	Anhang	29

1 Erzielte Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten

Ziel des Forschungsvorhabens war es, auf experimenteller Ebene eine Grundlage zu schaffen, um angetriebene Räder mit Polymerbandagen 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 hinsichtlich des Einflusses von Randbedingungen zurückgreifen zu können. Aus diesem Grund wurde bei den Untersuchungen ein besonderes Augenmerk auf vorhandene Zwischenstoffe in der Kontaktfläche und ihren Einfluss auf das Verschleißverhalten gelegt.

Dieses Projekt wurde mit Mitteln aus dem Haushalt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto-von-Guericke“ e.V. (AiF) im Auftrag der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. gefördert. Mit diesem Projekt wird insbesondere den KMU die Möglichkeit gegeben, Aussagen über das Verschleißverhalten ihrer Produkte unter bestimmten Einsatzbedingungen treffen zu können und auf diese Weise die Lebenserwartung zu steigern, die Ausfallwahrscheinlichkeit zu senken und somit die Zuverlässigkeit zu erhöhen.

Der Vorteil, der sich für Hersteller und Anwender ergibt, ist natürlich die direkte Nutzung der Untersuchungsergebnisse. Auf diese Weise ergibt sich bei der Auswahl von Radwerkstoffen die Möglichkeit der Abstimmung auf das voraussichtliche Einsatzgebiet und deren Randbedingungen.

Für die Hersteller von Rollen besteht des Weiteren die Möglichkeit der Nutzung des Untersuchungsverfahrens (Versuchsaufbau, Versuchsparameter, Versuchsprogramme), um so mit geringem Aufwand selber Untersuchungen durchführen zu können. Auf diese Weise können die Entwicklungskosten für neue, im Verschleißverhalten verbesserte Produkte gering gehalten werden, so dass die Marktposition verbessert wird. Unternehmen der Logistikbranche profitieren darüber hinaus von den geringeren Kosten für Räder und Rollen und von höheren Standzeiten, die sich aus dem verbesserten Verschleißverhalten ergeben.

Ausgehend von den Anforderungen, die sich aus der Forderung des Einsatzes in Handlingsystemen ergeben, ist ein Versuchstand entwickelt worden, mit dessen Hilfe die Belastungen eines angetriebenen, kunststoffbeschichteten Rades möglichst realitätsnah und einfach nachgebildet wurde. Der Aufbau des Versuchstandes war kostengünstig und kann ohne großen Aufwand auch von kleinen Unternehmen nachgebaut werden. Das Verschleißprüfverfahren ist für eine Vielzahl von Rädern unterschiedlicher Werkstoffe anwendbar, und die Ergebnisse sind leicht reproduzierbar.

Berücksichtigt wurden der kombinierte Einfluss von Werkstoffart der Radbandage, Schlupfverhältnissen, Zwischenstoffen, übertragener Leistung und Normalkraft. Hierdurch können Angaben des Verschleißverhalten unterschiedlicher Zwischenstoffe gemacht werden. Die vorliegenden Ergebnisse lassen den Schluss zu:

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Darstellung der Ergebnisse

2.1 Vorgehensweise

Als Erstes wurden die Randbedingungen ermittelt, die die Belastungen von kunststoffbeschichteten Rädern in der Praxis beschreiben. Zur Eingrenzung der durchzuführenden Untersuchungen wurden einheitliche Voraussetzungen festgelegt.

Im Hinblick auf diese Anforderungen ist ein Versuchstand entwickelt worden, der die Randbedingungen möglichst realitätsnah und einfach nachbildet. Um eine lückenlose Überwachung und Dokumentation der vierundzwanzigstündigen Versuche zu gewährleisten, ist ein Mess- und Regelungsprogramm entwickelt worden, das den gesamten Ablauf steuert und protokolliert. Im nächsten Schritt wurden die Versuche durchgeführt und ausgewertet.

2.2 Randbedingungen

2.2.1 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 bildet.

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

TDI (Toluoldiisocyanat) mit Vernetzer MbOCA

MDI (Methylendiphenyldiisocyanat) 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.

2.2.2 Systemtechnische Randbedingungen

Während bei kleinen bis mittelgroßen Stückgütern oft noch Stetigförderer Anwendung finden und die Verpackung selber die Gegenfläche für reibschlüssige Antriebe in Handlingsystemen darstellt, werden große Stückgüter bzw. Ladeeinheiten zumeist unstetig gefördert. Aufgrund dessen ist es sinnvoll, insbesondere bei größeren Ladehilfsmitteln eine speziell konstruierte Oberfläche für den Kontakt zwischen Reibradantrieb und Stückgut vorzusehen. 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. Durch die Form und Größe des Stückgutes bzw. die Art des Ladehilfsmittel ist die Orientierung der Kontaktfläche im Raum weiterhin beeinflusst. 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.

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, durch den sich die Kontaktfläche verkleinert, berechnet sich gemäß [sev99b] und nach Umstellung der Formeln wie folgt:

$$x = \sqrt{1 + \frac{r_{\text{rad}}}{r_{\text{Gegenfl}}}} \quad \text{(Formel 2.1)}$$

Wobei gilt:

$$A_{\text{eben}} = x \cdot A_{\text{zyl}} \quad \text{(Formel 2.2)}$$

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:

$$p_0 = \frac{2 \cdot F_N}{\pi \cdot A} \quad \text{(Formel 2.3)}$$

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

Ist das Verhältnis vom 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 von Störstoffen. Diese sind prinzipiell zu unterteilen in feste und in flüssige Stoffe.

Als zu untersuchende Störstoffe lassen sich die folgenden aufzählen:

Tabelle 2.1: Eingebrachte Zwischenstoffe

Feststoffe	Flüssigkeiten	Gemische
Korrund	Öl	Sand mit Wasser
Quarzsand in unterschiedlicher Körnung	Öl/Wasser-Emulsionen (Schneid-Kühl-Flüssigkeiten)	Metallspäne mit Öl/Wasser-Emulsionen (Schneid-Kühl-Flüssigkeiten)
Streusplitt	Wasser	Streusplitt mit Salzwasser
Sand	Salzwasser	Öl mit Korrund
Metallspäne		

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

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 wurden diese Einflussgrößen nur überwachend gemessen.

2.2.3 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.

Da es Ziel der Arbeit war, den Einfluss von Störstoffen auf das Verschleißverhalten zu untersuchen, war es ausreichend, Probenräder in wenigen Abmessungen zu untersuchen.

Gewählt wurden für die Durchführung der Versuche die folgenden Abmessungen:

Tabelle 2.2 Aufstellung der Prüfradabmessungen

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

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

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

Tabelle 2.3 Aufstellung der Abmessungen des Gegenrades

Durchmesser	Breite
600 mm	60 mm

Damit ergibt sich der Faktor x für die Berechnung der Kontaktflächengröße nach Formel 2.1 für die unterschiedlichen Raddurchmesser zu:

- $x_{200} = 1,15$ für 200 mm Raddurchmesser
- $x_{100} = 1,08$ 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

Versuchsstandes. Um eine Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu erreichen, wurde die Rauigkeit der Gegenradoberfläche überwacht und, für den Fall, dass sie durch Einwirkung abrasiver Zwischenstoffe einen Grenzwert überschritt, wurde sie nachbearbeitet.

2.2.4 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

Ein wichtiger Aspekt 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.

2.2.5 Kinematische Randbedingungen

Als kinematische Randbedingungen sind für Reibradantriebe, wie sie in Stückguthandlingsystemen 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:

$$F_{N,\max} = 800\text{N} \cdot \frac{B}{10\text{mm}} \cdot \frac{D}{100\text{mm}} \quad (\text{Formel 2.4})$$

Überbetrachtet bei dieser Grobauslegung bleibt die Härte sowie die Stärke der Bandage, so ist insbesondere für weiche Bandagenwerkstoffe (75 Shore-A) der auf diese Weise ermittelte Wert zu hoch. Aus diesem Grund wurde die Normalkraft in Abhängigkeit von der Kontaktflächenlänge gewählt.

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. Wie zu erwarten war, musste dieser Wert für benetzende Zwischenstoffe wie z. B. Wasser stark nach unten korrigiert werden. Um sowohl den maximal erreichbaren

Haftbeiwert zu ermitteln als auch das untersuchte Rad maximal mechanisch zu belasten, wurde 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.

Tabelle 2.4 Aufstellung der zulässigen Normalkräfte und Drehzahlen der Prüfräder

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

2.3 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. Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Aufbau des Versuchszustandes mit seinen wesentlichen Bestandteilen.

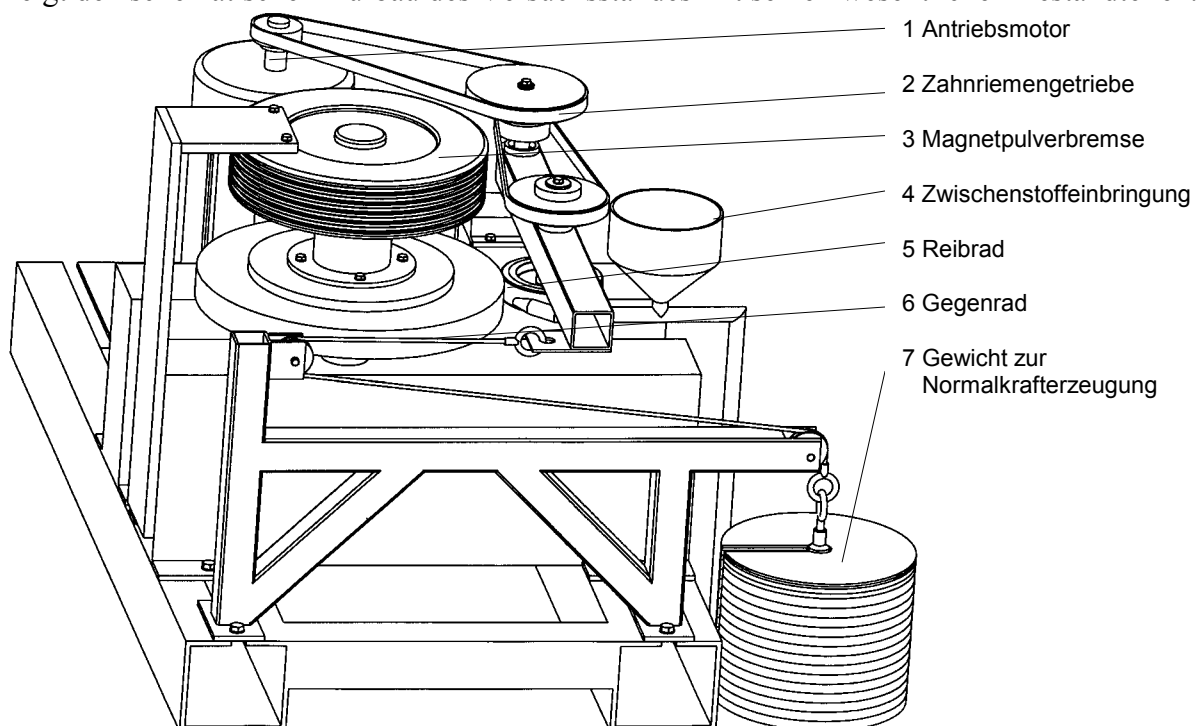


Abbildung 2.1 Dreidimensionale schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Bei dem entwickelten Versuchsaufbau handelt es sich um einen sogenannten Rollenversuchszustand 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.

Reibrad

Das Reibrad ist der zu untersuchende Prüfkörper und stellt somit das wesentliche Element des Versuchsaufbaues dar. Bereits im vorherigen Kapitel wurden die geometrischen Abmessungen der Reibräder aufgrund der dort erläuterten Randbedingungen festgelegt.

Gegenfläche

Das zweite wesentliche Bauteil der Versuchseinrichtung ist die Schwungscheibe, die mit ihrer Mantelfläche die Gegenfläche der Kontaktzone darstellt. Die geometrischen Abmessungen wurden bereits in Kapitel 2.2.3 erläutert. Bei der Breite der Schwungscheibe ist lediglich darauf zu achten, dass die Prüfräder mit 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.

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.

Zwischenstoffeinbringung

Zur Einbringung der 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 Abbildung 2.2) 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 aus einem Vorratsbehälter der Zwischenstoff in den Luftstrom der Düse gepumpt. Die Flüssigkeit wird anschließend wieder in den Vorratsbehälter zurückgeführt.

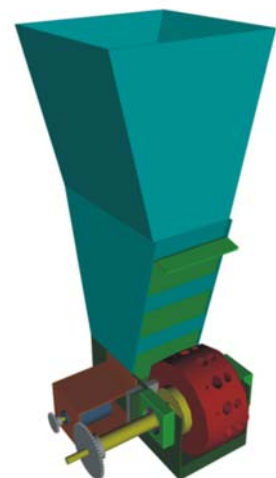


Abbildung 2.2 Vorrichtung zur Förderung fester Zwischenstoffe in den Luftstrom.

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.

Bremse

Neben dem Motor ist die Bremse 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 unabhängig von der Drehzahl zu erzeugen. Darüber hinaus ist dieser Bremsentyp besonders dazu geeignet, den hohen Belastungen im sogenannten Dauerschlupfbetrieb zu widerstehen.

2.4 Versuchsdurchführung

2.4.1 Grundlegende Betrachtungen zur Belastung eines Reibrades

Wie in Kapitel 2.2 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 [küh90] 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.

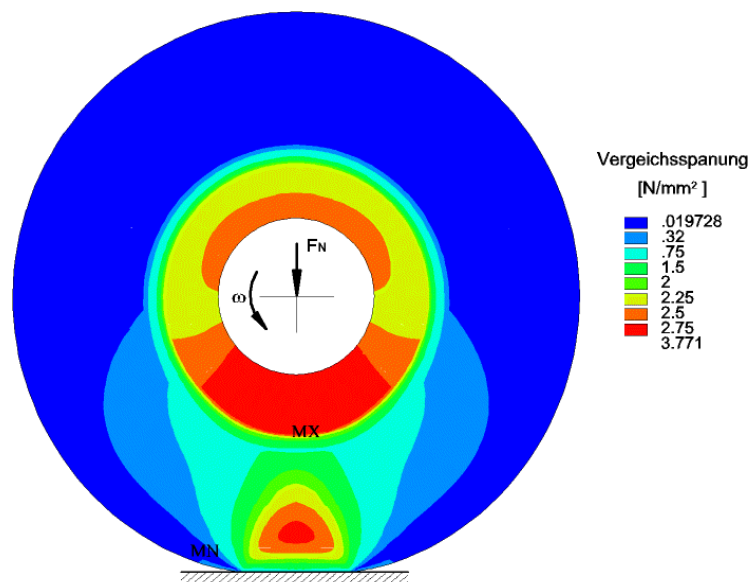


Abbildung 2.3 Verteilung der Vergleichsspannung im rollenden Radkörper mit Stahlnabe und Polymerbandage nach Liu [liu00]

Während in der Teilfuge die Wärme gut über die Metallnabe abgeführt werden kann, führt die hohe Dämpfung in Verbindung mit der schlechten Wärmeleitfähigkeit von polymeren Werkstoffen 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 Abbildung 2.3). 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. Kapitel 2.2.4), 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.

2.4.2 Durchgeführte Messungen

Bandagenhärte / -abmessungen

Bereits bei Anlieferung der Räder wurden in einer geeigneten Tabelle die folgenden Parameter festgehalten:

- Bandagenhärte nach DIN 53505 Shore-A
- exakter Raddurchmesser

- Bandagenbreite
- Bandagenstärke
- Ausgangsgewicht

Normalkraft

Um die Räder realitätsnah und unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften der Bandage vergleichbar zu belasten, wurden die in Tabelle 2.4 festgelegten Werte für die Belastung am Prüfstand vor jedem Versuch über geeignete Gewichte eingestellt.

Umgebungsbedingungen

Da die Umgebungsbedingungen insbesondere für die Alterung des Werkstoffes Polyurethan eine wichtige Rolle spielen, wurden sowohl vor als auch nach jedem Versuch die Umgebungslufttemperatur und die relative Luftfeuchte gemessen und festgehalten.

Radgewicht / -durchmesser

Die wichtigsten Indikatoren für den Verschleiß der Bandage sind die Abnahme des Radgewichtes und des Raddurchmessers. Aus diesem Grund wurde das Rad am Ende der Versuche vermessen und gewogen. Bei der Durchmesserermittlung ist darüber hinaus die Berücksichtigung der Ausdehnung infolge der Raderwärmung von Bedeutung; daher war es wichtig, nach Versuchsende das Rad abkühlen zu lassen und den Durchmesser erneut zu messen.

Drehzahl

Die Drehzahl ist eine der wesentlichen Einflussgrößen auf die Belastung einer Schwerlastrolle. Aus diesem Grund wurde 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. 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 wurde, konnte 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 und über das Messen der Kontaktflächenlänge 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. Der Schlupf wurde über die Variation des Bremsmomentes auf einen Wert von ca. 5 bis 10 % eingestellt. Vorversuche haben gezeigt, dass bei Überschreiten von 10 % Schlupf sich die Differenzdrehzahl unkontrolliert erhöht und schließlich einen Wert von 100 % erreicht.

Bremsmoment

Aus dem Bremsmoment lässt sich bei bekanntem Schwungscheibendurchmesser die Tangentialkraft in der Kontaktfläche ermitteln. Daher ist das Bremsmoment ein entscheidender Einflussfaktor für die Höhe der mechanischen Beanspruchung der Bandage. Aus diesem Grunde wurde das Bremsmoment, ebenso wie der Schlupf, gemessen und über die gesamte Versuchsdauer aufgezeichnet.

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 wurde auch die Oberflächentemperatur der Bandage während der gesamten Versuchsdauer analog zu Schlupf und Bremsmoment gemessen und aufgezeichnet. Weiterhin wurde ein Digitalthermometer mit Einstechfühler verwendet, um während der Gewichts- und Durchmessermessungen die Oberflächentemperatur zusätzlich zu ermitteln.

Zwischenstoffdurchsatz

Die Menge des insgesamt pro Versuch eingebrachten Zwischenstoffes wurde vor jedem Versuch festgelegt und bei jeder Versuchsreihe konstant gehalten, um so die Versuche untereinander gut vergleichen zu können. Ermittelt wurde die Menge durch Wiegen des in den Vorratstrichter bei festen bzw. den Vorratstank bei flüssigen Zwischenstoffen eingebrachten Volumens. Auf diese Weise wurde die in der Kontaktfläche vorhandene Menge an Zwischenstoff zwar nicht absolut exakt ermittelt, jedoch ist es so möglich, vergleichsweise einfach die als abrasiv wirkender Stoff zur Verfügung stehende Menge an Zwischenstoff zu bestimmen.

Oberflächenbild der Bandage

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

2.4.3 Versuchsprogramm

Die bei dem Versuch gemessenen Daten, wie die Geschwindigkeiten des Rades und der Schwungscheibe, die Temperatur und das Bremsmoment, werden an eine Messeinrichtung übermittelt. Über die PC Messkarte 9112 von ADLink werden die Daten digitalisiert und über ein Mess- und Regelungsprogramm weiterverarbeitet. Zu Versuchsbeginn wird das Messsystem eingemessen, um das tatsächliche Übersetzungsverhältnisses zwischen Rolle und Schwungscheibe zu ermitteln. Mit diesem Übersetzungsverhältnis und der bekannten Rollendrehzahl wird ein vorher festgelegter Soll-Schlupf eingestellt. Diese Sollwertvorgabe wird mit dem tatsächlich aus den Geschwindigkeiten berechnetem Ist-Schlupf verglichen und gegebenenfalls nachgeregelt. Die Einstellung des Schlupfes erfolgt über Änderung der Steuerspannung der Magnetpulverbremse über einen analogen Ausgang der Messkarte. Der errechnete Schlupf, die Temperatur und das Bremsmoment werden alle 5 Sekunden in eine Datei geschrieben. Diese Daten werden nach Versuchsende mit der Auswertungssoftware Flexpro dargestellt. Abbildung 2.4 zeigt die graphische Benutzeroberfläche des Mess- und Regelungsprogramms.

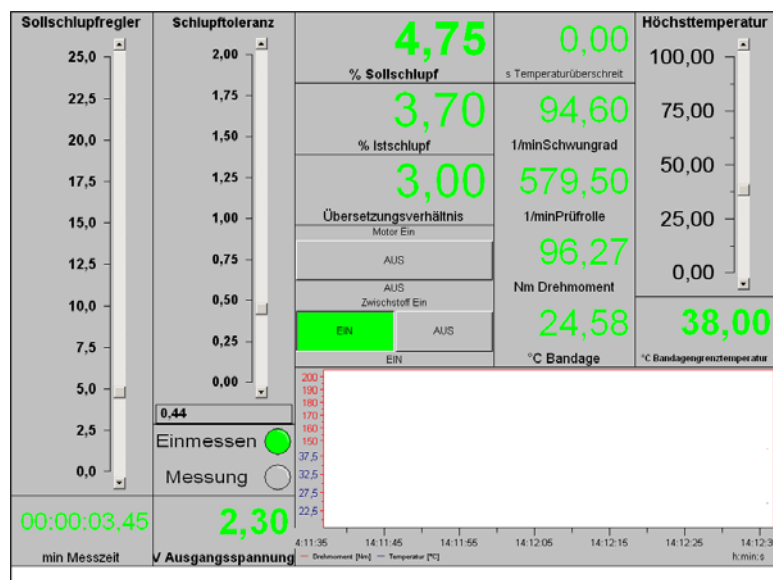


Abbildung 2.4 Graphische Benutzeroberfläche vom Mess- und Regelungsprogramm

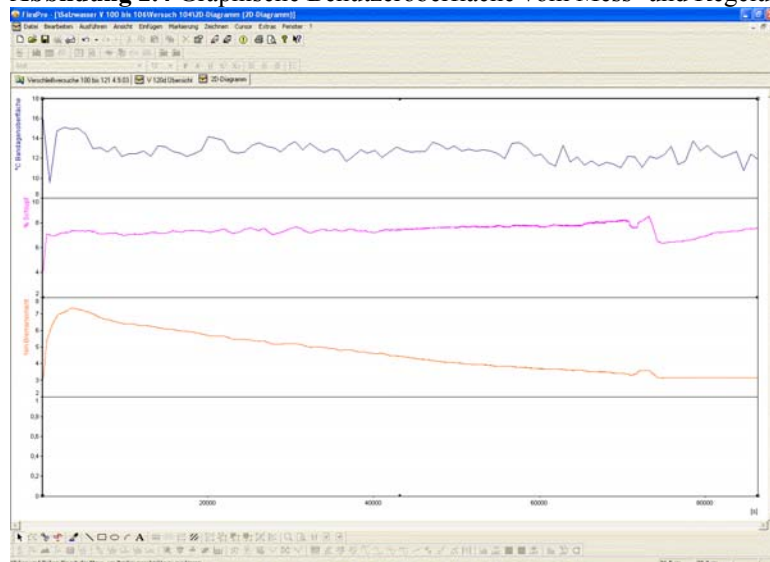


Abbildung 2.5 Darstellung der Versuchsdaten mit der Auswertungssoftware Flex Pro

2.5 Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse

2.5.1 Allgemeines

Grundsätzlich tritt beim Gebrauch von Schwerlastrollen 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 Schwerlastrad 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. Diese werden im Folgenden in unterschiedlicher Art und Weise kombiniert dargestellt. Die dabei verwendeten Diagramme ermöglichen es, die 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.

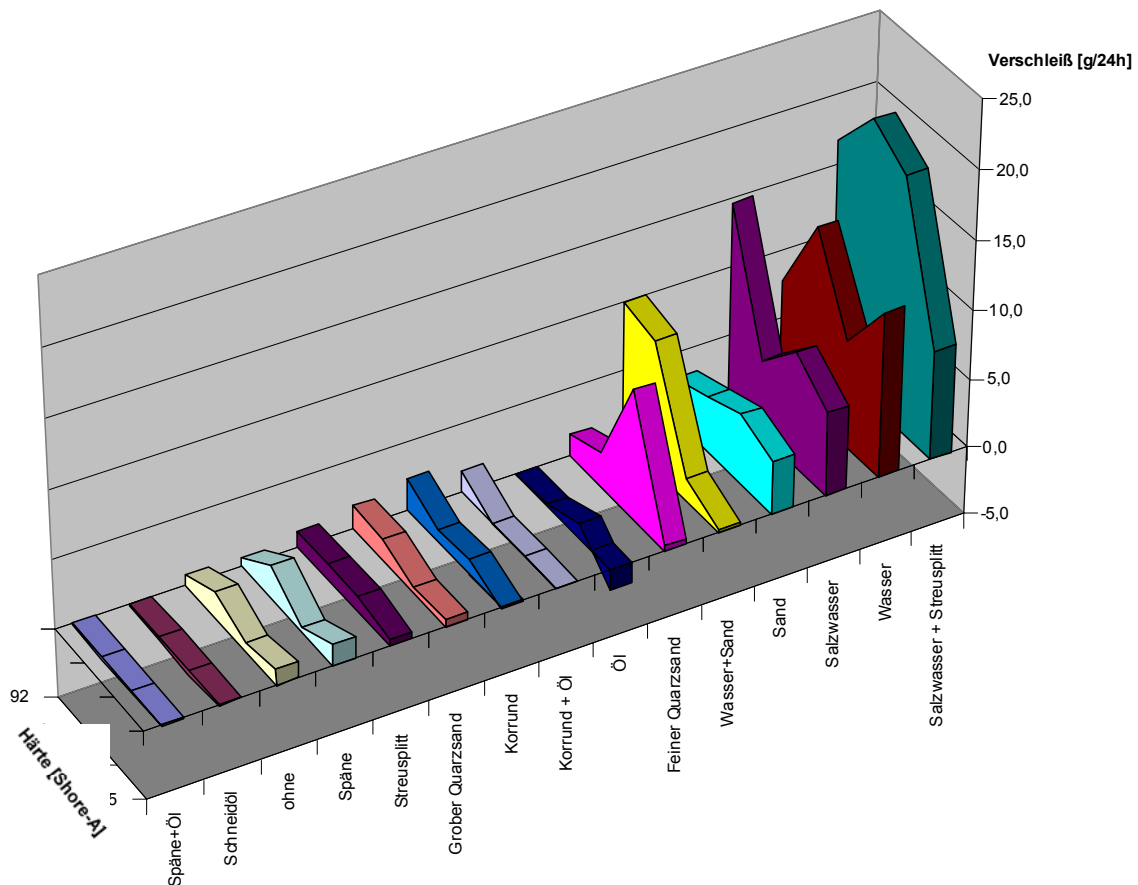


Abbildung 2.6 Übersicht über den absoluten Verschleiß in Gramm von Rädern mit \varnothing 100 mm

2.5.2 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 Reibkraftkomponenten (Adhäsions-, Kohäsions-, Hysterese- und Viskoseanteil) gestaltet sich vollkommen anders.

Allgemein ist davon auszugehen, dass der Adhäsionsanteil, der die zur 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. Dieser Anteil ist 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 ist dieser Anteil aufgrund deren Dünnsflüssigkeit 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.

Um eine Abhängigkeit des Verschleißes von der Wahl des Zwischenstoffes darzustellen, wird der Verschleiß über die unterschiedlichen Bandagenhärten gemittelt. So lassen sich einige Zwischenstoffe in Gruppen zusammenfassen, da der auftretende Verschleiß und dessen Ursache identisch sind.

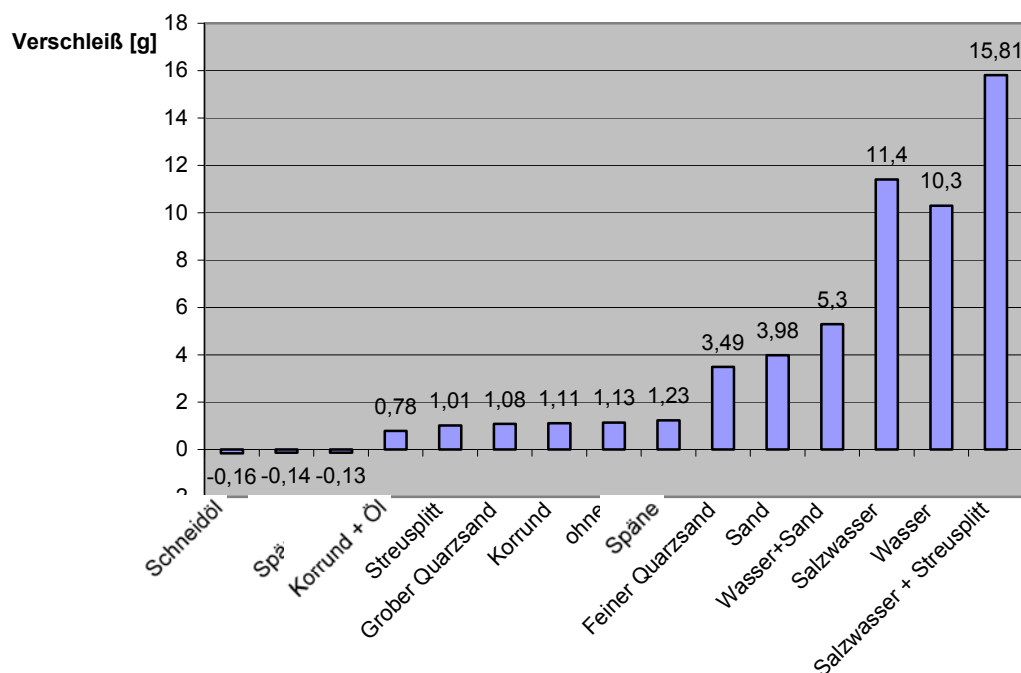


Abbildung 2.7 Absoluter Verschleiß, über die Bandagenhärte gemittelt, Radgröße 100 mm

Der negative Verschleiß lässt sich folgendermaßen erklären:

- Quellvorgänge in der Bandage
- Ablagerungen von festen Zwischenstoffen in Bandagenrissen
- Geringe mechanische Beanspruchung durch gute Schmierwirkung

2.5.2.1 Untersuchungen ohne Zwischenstoff

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.

2.5.2.2 Untersuchungen mit flüssigen Zwischenstoffen

Verschleiß unter Einwirkung von Wasser und Salzwasser

Der Verschleiß unter Einwirkung von Wasser bzw. Salzwasser liegt eng beieinander, jedoch 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 wurde der eingestellte Schlupf höher als bei den Versuchen ohne Zwischenstoff gewählt. Eine Erklärung für den hohen Verschleiß ist durch chemische Vorgänge zu erläutern. 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 Kapitel 2.5.3 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.

Diese beiden Vorgänge bestätigen sich bei den Versuchen mit Salzwasser, da hier der Verschleiß noch höher liegt als bei Verwendung von reinem Wasser. Bei Durchführung der Versuche ist die Oberfläche permanent vollständig mit Wasser benetzt. Salzwasser besitzt einen PH-Wert zwischen 7,8 und 8,2. Außerdem handelt es sich bei dem verwendeten Wasser nicht um vollentsalztes Wasser, weshalb hier jederzeit die Möglichkeit besteht, 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 wurden. So bilden die Räder bei Versuchsdurchführung ständig Abriebpartikel in der Form kleiner Wülste, die je nach Bandagenhärte durch das weiter zugeführte Wasser bzw. Salzwasser weggespült werden (92 Shore-A) oder sich auf der Bandagenoberfläche ablagern und regelrecht angebacken werden (80 Shore-A und 85 Shore-A). In Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9 ist dieses Verhalten dargestellt.



Abbildung 2.8 Vulkollanrad mit einer 92 Shore-A-Bandage und \varnothing 100 mm nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Wasser als Zwischenstoff, **rechts:** abgespülte Abriebspartikel

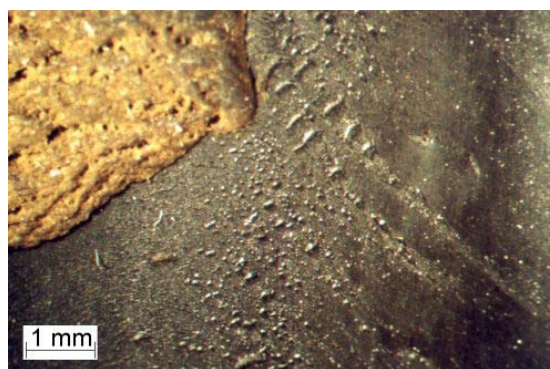


Abbildung 2.9 Vulkollanrad mit einer 80 Shore-A-Bandage und \varnothing 100 mm nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Wasser als Zwischenstoff, **rechts:** Vergrößerung der Oberfläche

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

Verschleiß unter Einwirkung von Schneid-Kühl-Emulsion :

Der Wert für den Verschleiß unter Einwirkung von Schneid-Kühl-Emulsion als Zwischenstoff liegt extrem niedrig und auf demselben 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.



Abbildung 2.10 Vulkollanrad mit einer 85 Shore-A-Bandage und \varnothing 100 mm nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Schneid- Kühl- Emulsion als Zwischenstoff

Verschleiß unter Einwirkung von Öl:

Wie schon bei den Untersuchungen mit Schneid-Kühl-Emulsion tritt bei der Verwendung von Öl kaum Verschleiß auf. Durch die höhere Viskosität von Öl wird das Rad noch stärker geschmiert. Dadurch sinkt die übertragene Leistung. Der eingestellte Schlupf ist sehr gering und liegt in einem Bereich zwischen 2 und 3%. Bei einer Erhöhung des Schlupfes um nur 1% kommt es zu einem ständigen Gleiten auf der Gegenscheibe. Die eingebrachte Zwischenstoffmenge ist sehr gering, sie beträgt lediglich 2 Liter in 24 Stunden. Diese Menge reicht jedoch aus, um einen permanenten Schmierfilm in der Kontaktfläche zwischen Rad und Gegenscheibe zu gewährleisten.

2.5.2.3 Untersuchungen mit festen Zwischenstoffen

Bei den Untersuchungen mit festen Zwischenstoffen wurde die Körnung der verwendeten Zwischenstoffe variiert. Sie wurde in fünf Stufen eingeteilt, von ganz fein (Korund) bis grob (Streusplitt).

Betrachtet man die Versuchsergebnisse, so scheint es, dass der Verschleiß von der Körnung abhängt. Berücksichtigt man jedoch, dass sich Partikel des Zwischenstoff in den Rissen der Bandage abgelagert haben, so ergibt sich ein gleichbleibender Verschleiß bei festen Zwischenstoffen. Entfernt man die abgelagerten Partikel aus der Bandage so wird dieses bestätigt. Auf diese Tatsache wird im nächsten Abschnitt anhand des Beispiels mit dem Zwischenstoff Metallspäne noch einmal genauer eingegangen.

Die Art des Verschleißes lässt sich am Beispiel mit Sand als Zwischenstoff folgendermaßen erklären:

Der Verschleiß unter Einwirkung von Sand 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 Adhäsionsverschleiß vor. Dieser ist vergleichbar mit den Versuchen ohne Zwischenstoff. Im Gegensatz dazu kann der Sand in den Oberflächenbereichen, in denen er zwischen Bandage und Gegenfläche liegt, 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 Abbildung 2.11

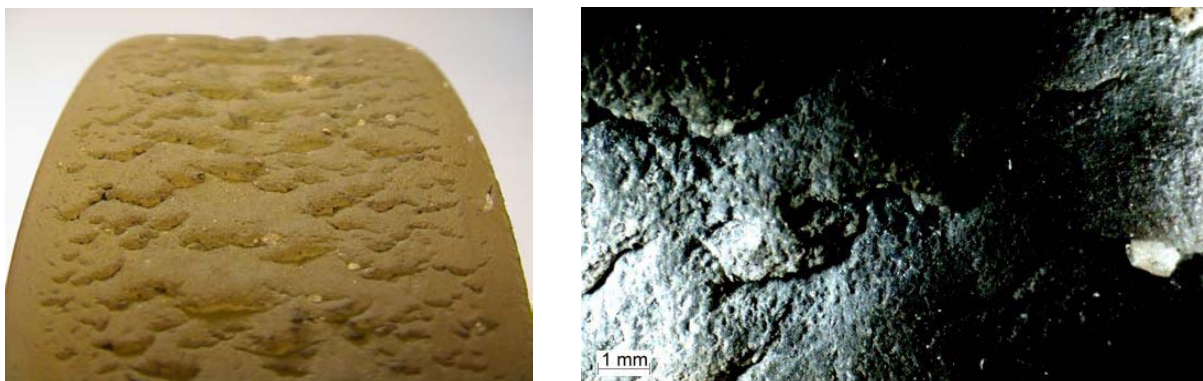


Abbildung 2.11 Vulkollanrad mit einer 80 Shore-A-Bandage und \varnothing 100 mm nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Sand als Zwischenstoff, rechts Vergrößerung der Oberfläche

Als Gründe für den geringen Verschleiß unter der Einwirkung von Sand als Zwischenstoff ergeben sich die folgenden:

- Verringerung der tatsächlichen Kontaktfläche und damit Verringerung des Verschleißes durch Kohäsionsbindungen zwischen Gegenrad und Bandagenoberfläche

- Fehlen hydrolytischer Vorgänge

Die Verringerung der tatsächlichen Kontaktfläche ist zudem abhängig von der Bandagenhärte, die das Anschmiegeverhalten stark beeinflusst (Abbildung 2.12). Bei auftretendem Schlupf wird die abgehobene Bandagenoberfläche weitestgehend vor Verschleiß geschützt.

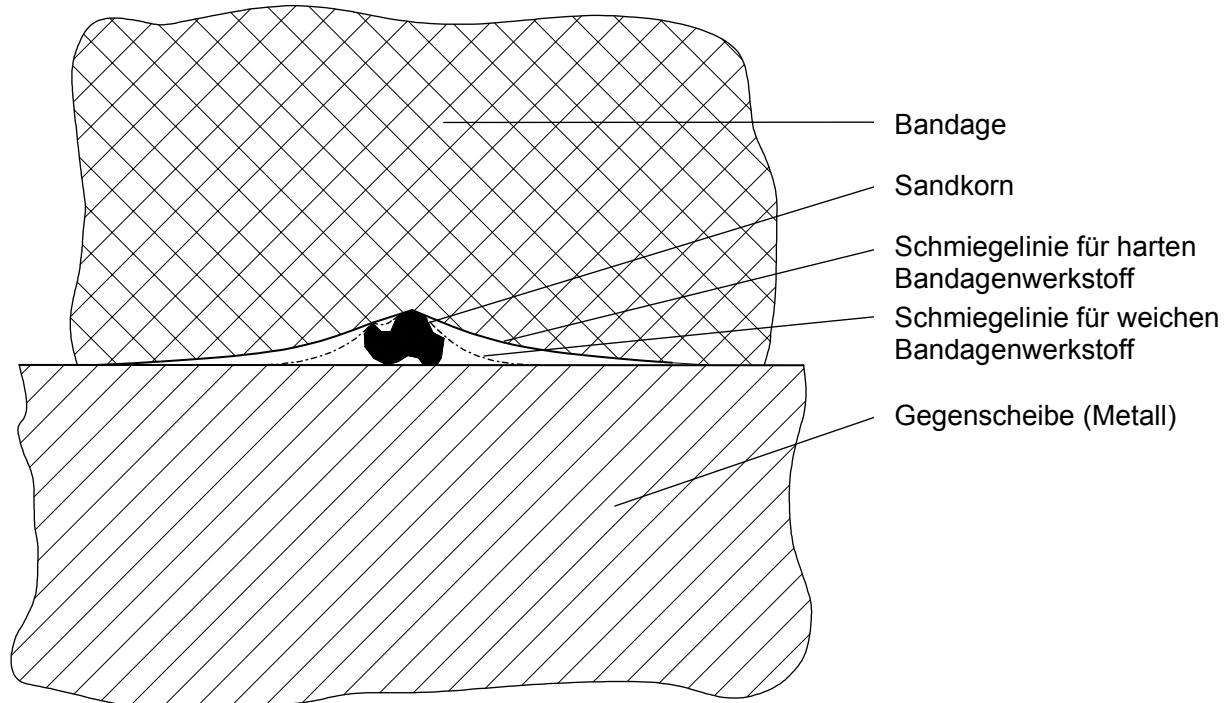


Abbildung 2.12 Anschmiegeeffekte der Bandage um ein einzelnes Sandkorn

Verschleiß unter Einwirkung von Metallspänen:

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.

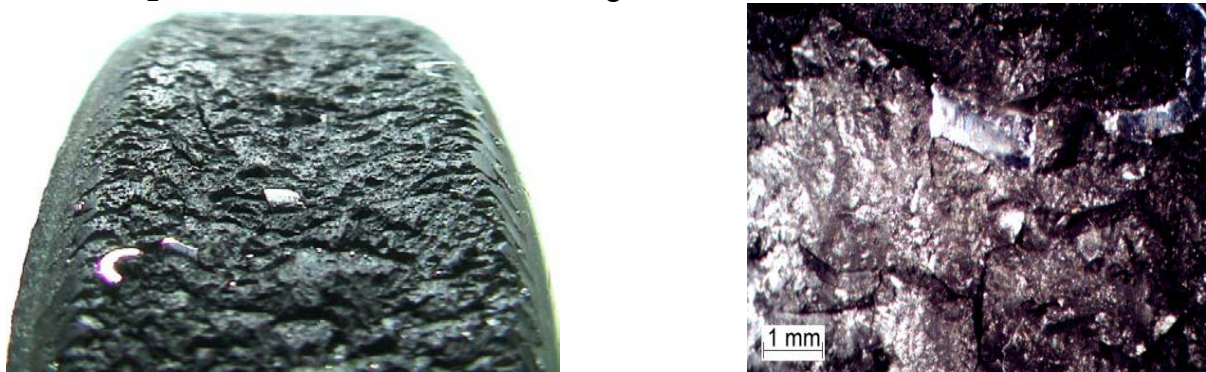


Abbildung 2.13 Polyurethanrad (MDI-ernetzt) mit einer 75 Shore-A-Bandage und \varnothing 100 mm nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Metallspänen als Zwischenstoff, **rechts:** Vergrößerung

In Abbildung 2.13 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 diese 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 Abbildung 2.14 ist dieses Rad zusammen mit den aus der Bandage entfernten Spänen abgebildet.



Abbildung 2.14 Vulkollanrad nach der Untersuchung unter Einwirkung von Metallspänen mit den aus der Bandage entfernten Einlagerungen

Die in Abbildung 2.14 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. Zu den gleichen Ergebnissen gelangt man, wenn man die Einlagerungen wie Streusplitt oder den groben Quarzsand entfernt.

2.5.2.4 Untersuchungen mit Gemischen

Verschleiß unter Einwirkung von Metallspänen und Schneid-Kühl-Emulsion:

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 Abbildung 2.15. 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 Schwerlastrollern unter Schneid-Kühl-Mitteleinwirkung ist jedoch die chemische Verträglichkeit.



Abbildung 2.15 Vulkollanrad mit einer 92 Shore-A-Bandage und \varnothing 100 mm nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Metallspänen und Schneid-Kühl-Emulsion als Zwischenstoff

Verschleiß unter Einwirkung von Korrund und Öl

Der Verschleiß unter der Einwirkung von Korrund und Öl als Zwischenstoff ist geringer als bei den Untersuchungen ohne Zwischenstoff. Die eingebrachte Ölmenge ist wie schon bei den Untersuchungen nur mit Öl sehr gering, die Korrundmenge wurde dementsprechend auch sehr gering gehalten, um ein ausgewogenes Verhältnis des eingebrachten Zwischenstoffes zu haben. Durch den ständigen Ölfilm auf der Bandagenoberfläche haftet das Korrund auf dieser, dadurch kommt es zu einem ständigen Überwalzen. Einerseits bewirkt das Korrund bei der Bandage einen Verschleiß, andererseits wird durch das vorhandene Korrund der durch das Öl hervorgerufene Schmierfilm verringert, welches eine deutliche Steigerung der übertragenen Leistung bewirkt. Das Öl bewirkt wie schon die Schneid-Kühl-Emulsion eine Verschleißverminderung.

Verschleiß unter Einwirkung von Wasser und Sand :

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 ihren Auswirkungen 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 (vgl. Untersuchungen mit Wasser).
- Sandkörner trennen partiell die Oberflächen von Prüfrad und Gegenscheibe.
- 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 abzuspielen, 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 Prüfradoberflächen, die verhältnismäßig glatt sind und nur wenige Einschlüsse von Sandkörnern aufweisen (siehe Abbildung 2.16)

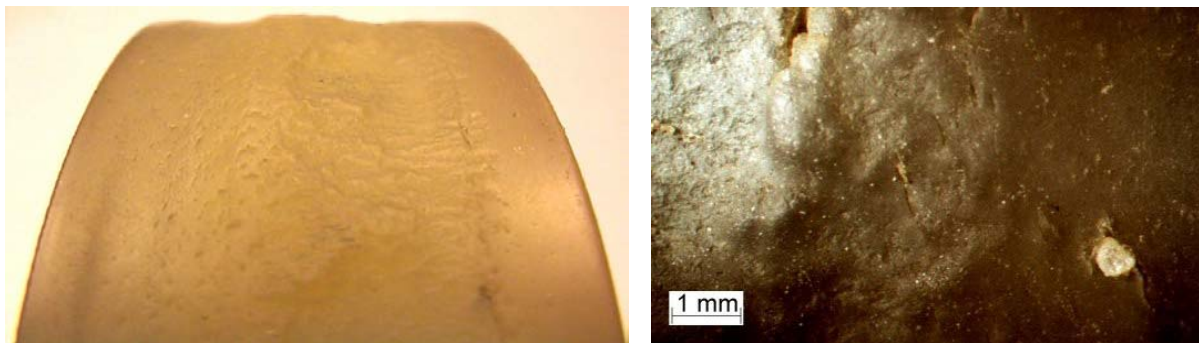


Abbildung 2.16 Vulkollanrad mit einer 85 Shore-A-Bandage und \varnothing 100 mm nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Wasser mit Sand als Zwischenstoff, **rechts** Vergrößerung

Verschleiß unter Einwirkung von Salzwasser und Streusplitt

Der Verschleiß unter Einwirkung von Streusplitt und Salzwasser erreicht deutlich höhere Werte als nur unter Einwirkung von Wasser oder Salzwasser. Diese lässt sich wie folgt erklären:

Durch die hydrolytische Wirkung des alkalischen Salzwasser wird die Belastbarkeit gemindert und der Verschleiß beschleunigt. Des Weiteren kommt es durch das Einbringen von Streusplitt in die Kontaktfläche zur Rissbildung in der Bandagenoberfläche. Diese breitet sich bei weiterer Belastung aus, und Teile der Bandage lösen sich. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einer Versuchsdauer von 24 Stunden der Bandagenrand teilweise komplett abgelöst wurde. Dieses zeigt Abbildung 2.17.



Abbildung 2.17 Vulkollanrad mit einer 85 Shore-A-Bandage und \varnothing 100 mm nach 24 h Versuchsdauer unter Einwirkung von Salzwasser mit Streusplitt als Zwischenstoff, **rechts** Vergrößerung

2.5.3 Verschleiß in Abhängigkeit des Vernetzers

Die untersuchten Räder sind ausschließlich mit Polyurethanbandagen versehen, bei denen das Prepolymer entweder mit NDI (Naphtalendiisocyanat) oder MDI (Methylendiphenyldiisocyanat) vorvernetzt worden ist (siehe hierzu auch Kapitel 2.2.1). 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 Schwerlastrollen nicht davon auszugehen ist, dass lediglich ein Zwischenstoff isoliert auftritt

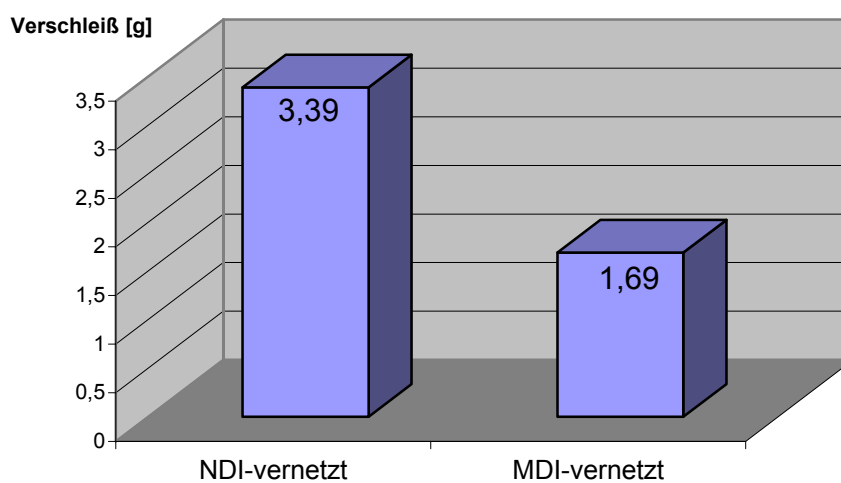


Abbildung 2.18 Verschleiß mit Rädern \varnothing 200 mm in Abhängigkeit vom Vernetzer

Zur Darstellung dieser Abhängigkeit werden die Untersuchungsergebnisse gemittelt über dem gewählten Vernetzer aufgetragen. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.19 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.

2.5.4 Verschleiß in Abhängigkeit der Radabmessungen und der Belastungshöhe

Untersucht werden zwei unterschiedliche Radabmessungen (siehe auch Kapitel 2.2.3). 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. 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. Für den Teillastbereich ergibt sich eine Belastungshöhe von 60 %.

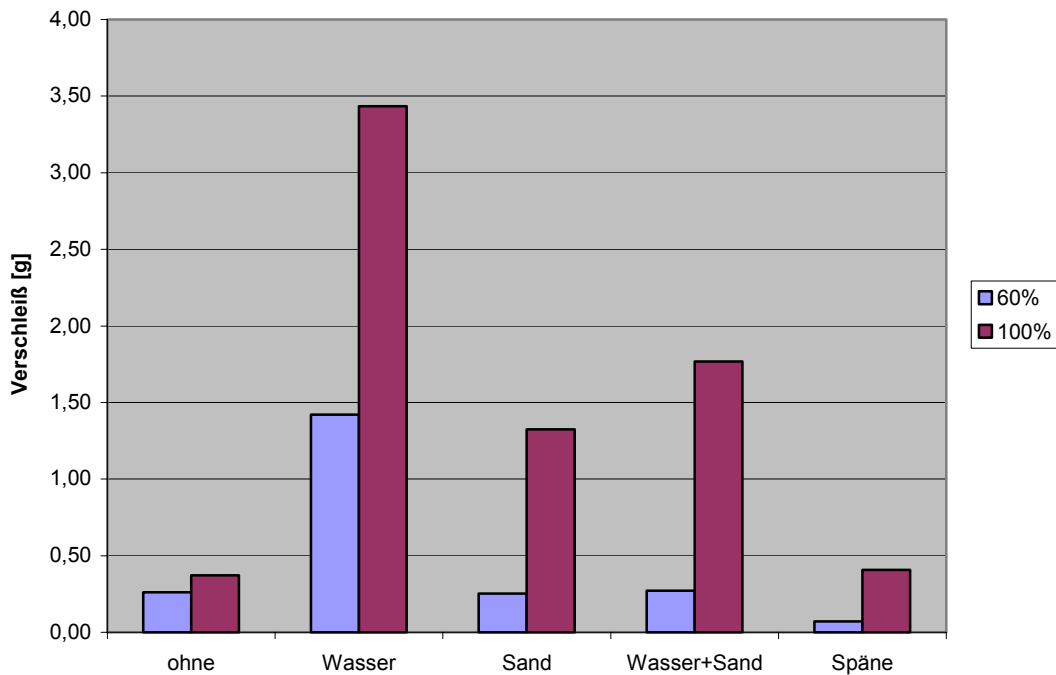


Abbildung 2.19 Verschleißrate pro cm Radbreite gemittelt über die Härte mit unterschiedlicher mechanischer Beanspruchung unter Berücksichtigung des Zwischenstoffeinflusses

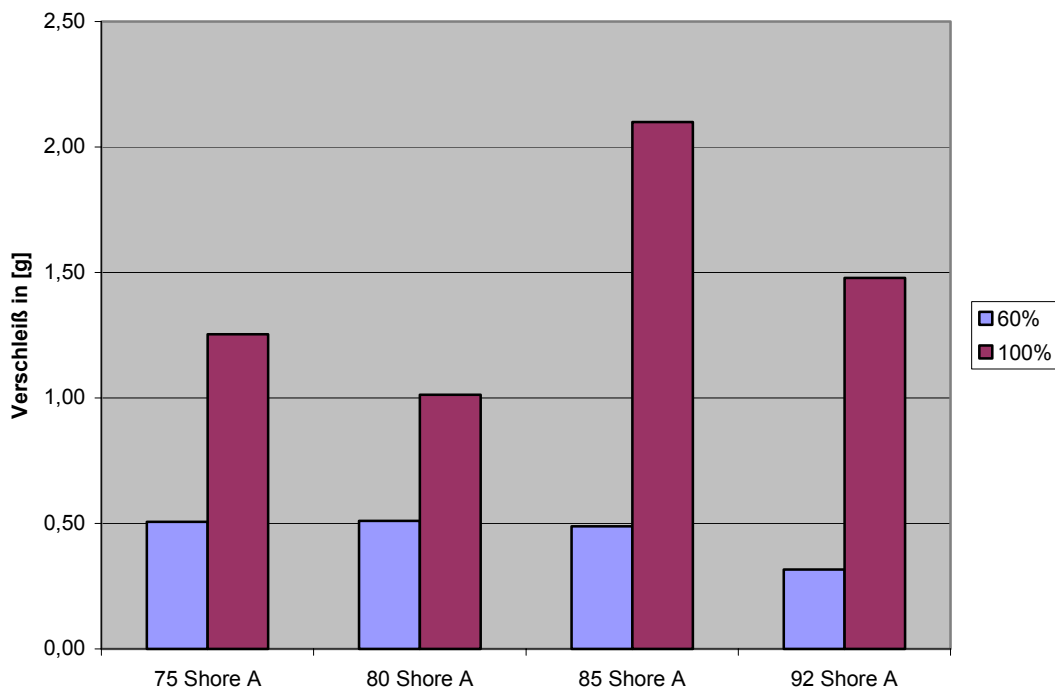


Abbildung 2.20 Verschleißrate pro cm Radbreite gemittelt über Zwischenstoff mit unterschiedlicher mechanischer Beanspruchung unter Berücksichtigung des Einflusses der Bandagenhärte

Man kann also festhalten, dass der Verschleiß bereits durch eine geringe Absenkung der mechanischen Belastung effektiv verringert werden kann. Eine Ausnahme bildet der Zwischenstoff Wasser. Da hier chemikalische Vorgänge den Verschleiß stärker beeinflussen als die tatsächlich vorhandene mechanische Belastung, fällt die Verschleißverringering in diesem Fall nicht so deutlich aus.

2.5.5 Verschleiß in Abhängigkeit der Bandagenhärte

In diesem Kapitel wird 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 Abbildung 2.21 dargestellte Diagramm.

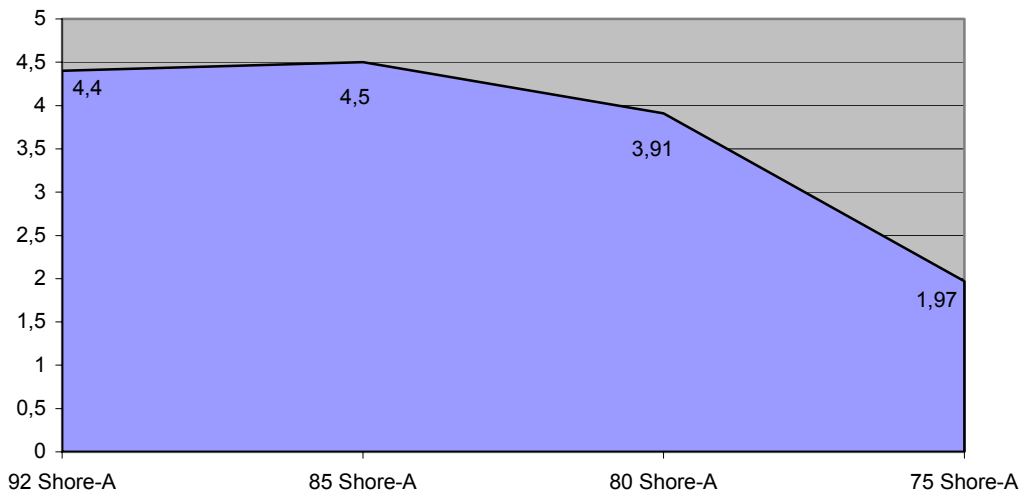


Abbildung 2.21 Verschleißraten der Räder mit \varnothing 100 mm aufgetragen über die Bandagenhärte

Allgemein ist festzuhalten, dass mit abnehmender Bandagenhärte auch die mechanische Belastbarkeit abnimmt. Da bei der Ermittlung der zulässigen Normalkraft jedoch die Bandagenhärte berücksichtigt wurde, 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

Praktisch bedeutet dieses Ergebnis, dass bei Erhöhung der Bandagenhärte der Verschleiß steigt, was sich negativ auf die mechanische Belastbarkeit auswirkt.

2.5.6 Verschleißmechanismen

Zusammenfassend aus diesem Kapitel 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 stellt 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 Abbildung 2.22), so dass hier die Oberfläche früher zu rutschen beginnt.

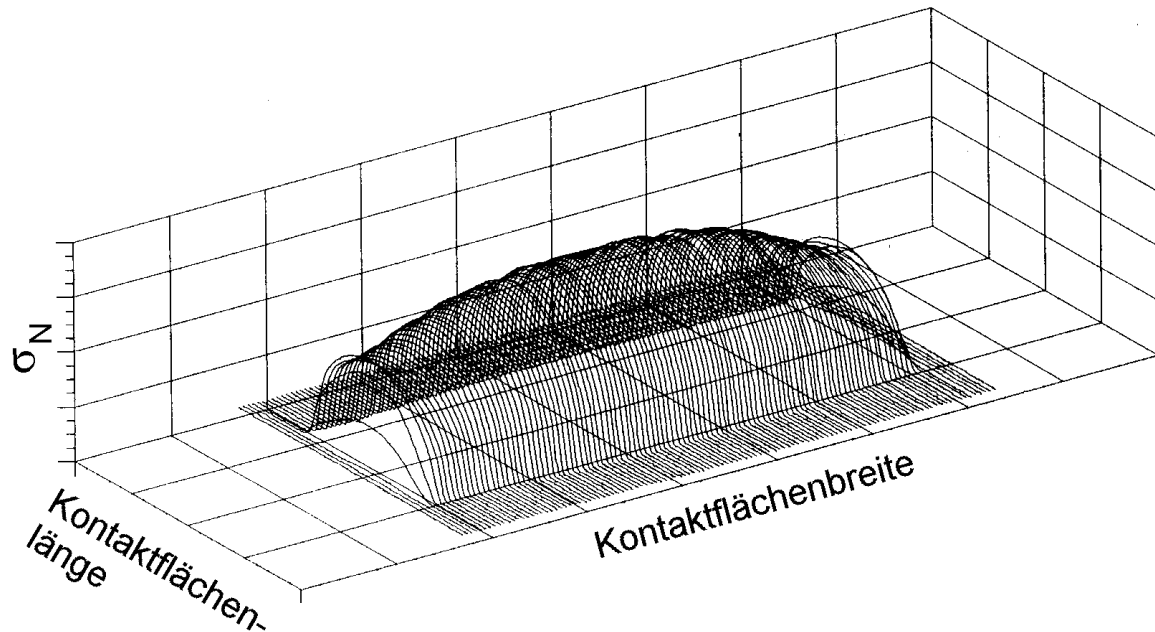


Abbildung 2.22 Verlauf der Normalspannung σ_N in der Kontaktfläche nach *Severin* [sev99c]

Für die tangential übertragbaren Kräfte gilt die gleiche Verteilung, wie in Abbildung 2.22 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. Abbildung 2.23 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.

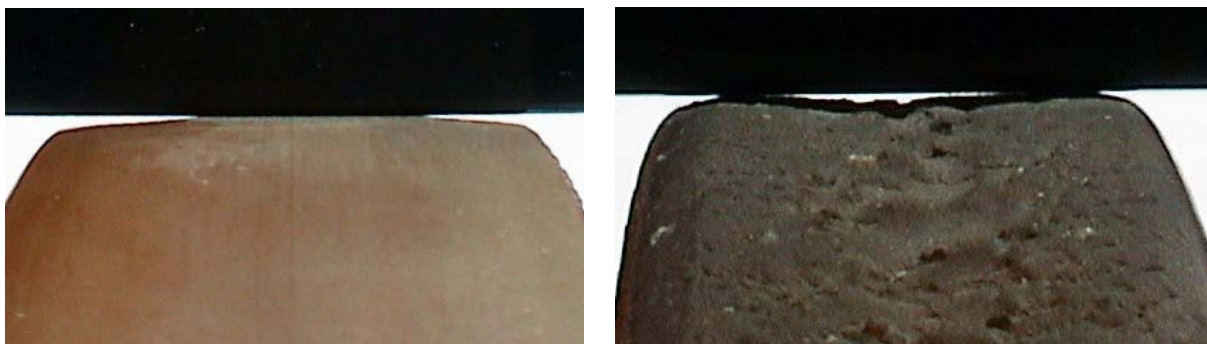


Abbildung 2.23 Darstellung der Abhängigkeit des Verschleißverhaltens von äußeren Einflüssen. **Links** Versuch mit Wasser, **rechts** mit Sand als Zwischenstoff

3 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des durchgeführten Projektes wurde das Verschleißverhalten von Schwerlastrollen unter der Einwirkung von Zwischenstoffen in der Kontaktfläche untersucht. Hier wurden zum ersten Mal Verschleißuntersuchungen unter der realitätsnahen Beanspruchung eines Radkörpers durchgeführt. Neben der Durchführung der Versuche direkt an Rollen 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 Rollen mit Polymerbandage hat. So wurde nachgewiesen, dass in vielen Fällen bereits durch eine einfache Überdimensionierung der Antriebsrollen 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.

Mit dem vorliegenden Projekt 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. Der Vorteil der sich insbesondere für KMU ergibt, liegt nicht nur in der Verwendung der erzielten Ergebnisse, sondern es wird ihnen auch ermöglicht, kostengünstig selbst Untersuchungen hinsichtlich des Verschleißverhaltens von Schwerlastrollen durchzuführen.

4 Literatur

- [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
- [böhm98] F. Böhm, K. Knothe (Hrsg.); Hochfrequenter Rollkontakt der Fahrzeugräder; Ergebnisse aus dem gleichnamigen Sonderforschungsbereich an der TU Berlin; Deutsche Forschungsgemeinschaft; Wiley-VCH, 1998
- [buf61] H. Bufler; Beanspruchung und Schlupf beim Rollen elastischer Walzen; Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens 27 Nr. 4, 1961, S. 121 - 126
- [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
- [his92] F. Hiss, K. Knothe, G. Wang; Stationärer Rollkontakt für Walzen mit viskoelastischen Bandagen; Konstruktion 44, 1992, S. 105 – 112
- [kno89] K. Knothe, G. Wang; Zur Theorie der Rollreibung zylindrischer Kunststofflaufräder; Konstruktion 41, 1989, S. 193 - 200
- [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
- [lüt84] H. Lütkebohle; Roll- und Wälzreibung zylindrischer Räder aus thermoplastischen Kunststoffen; Dissertationsschrift TU Berlin 1984
- [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
- [sac80] F.-W. Sackmann; Die Lebensdauer von Wälzrädern mit weichelastischem Belag bei Übertragung von Tangentialkraft; Dissertationsschrift TU Braunschweig 1980
- [sev89a] D. Severin; Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an thermoplastischen Kunststoffrollen bis 125 mm Durchmesser; Institut für Fördertechnik und Getriebetechnik TU Berlin; Forschungsbericht 1989
- [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 Antriebselement in Fördersystemen; 7. Kranfachtagung 1999, TU Berlin
- [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
- [sev85] D. Severin, H. Lütkebohle; Rollreibung zylindrischer Laufräder aus Kunststoff; Konstruktion 37, 1985; S. 177 - 184
- [sev02] D. Severin, X. Liu; Die Beanspruchung in der Teilfuge rollender Räder, bestehend aus einer Stahlnabe und einer Kunststoffbandage; Bericht über das DFG-Forschungsvorhaben Se 342/26, Deutsche Forschungsgemeinschaft; 2002
- [wan91] G. Wang; Rollkontakt zweier viskoelastischer Walzen mit Coulombscher Reibung; Dissertationsschrift TU Berlin 1991
- [yin97] X. Yin; Experimentelle Untersuchung des instationären Rollkontaktes zwischen Rad und Fahrbahn; VDI-Fortschrittberichte Reihe 12: Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik Nr. 313; VDI-Verlag 1997
- [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

5 Veröffentlichungen

Künne, B., Mehlan, V., Langenohl, A.: Rollen unter Schwerlast, Maschinenmarkt, Ausgabe 6, Februar 2004, Seite 20 -23

Mehlan, V., Experimentelle Verschleißuntersuchungen von angetriebenen Polyurethanrädern unter Einwirkung von Zwischenstoffen, ISBN 3-937651-01-2, Maschinenelemente-Verlag, Dortmund 2003

6 Anhang

Formblätter