

Ergebnisbericht

Untersuchung der Wirksamkeit von Reibungskräften bei der Sicherung verladener Güter im Fahrbetrieb

für

Berufsgenossenschaft für Fahrzeughaltungen (BGF)

Axel-Springer-Straße 52

10969 Berlin

Dortmund, 06.06.2007



Fachgebiet Logistik
Universität Dortmund
Leonhard-Euler-Str. 5
44227 Dortmund

Tel.: 0231 / 755 - 5701

Fax: 0231 / 755 - 5702

e-mail: sekretar@flog.maschinenbau.uni-dortmund.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
1. Einleitung.....	1
2. Beziehung zwischen Haft- und Gleitreibung.....	3
2.1. Reibungstheorie der Festkörpermechanik.....	3
2.2. Klassifizierung unterschiedlicher Reibungsmechanismen.....	6
2.2.1. Haft-, Gleit- und Rollreibung.....	7
2.2.2. Äußere und innere Reibung.....	8
2.2.3. Festkörper-, Fluid- und Mischreibung.....	8
2.2.4. Spezialgebiete der Reibungslehre.....	11
2.3. Reibungstheorie für elastisch nachgiebige Reibungssysteme.....	12
2.3.1. Reibungsverläufe mit ausgeprägtem Haftreibungsgrenzfall.....	12
2.3.2. Reibungsverläufe ohne ausgeprägten Haftreibungsgrenzfall.....	14
2.3.3. Flächenpressungsabhängigkeit der Reibbeiwerte.....	15
2.3.4. Zwischenergebnis.....	17
3. Reibbeiwerte in dynamischen Systemen.....	18
3.1. Versuchsbeschreibung für die Ermittlung von Reibbeiwerten mit Prüfmodellen.....	18
3.1.1. Quasistatische Reibbeiwertermittlung.....	18
3.1.2. Simulation dynamischer Stoß- und Schwingungsbelastungen.....	21
3.2. Ergebnisse: Einsatz einer weichen, schaumstoffbeschichteten ARM.....	22
3.3. Ergebnisse: Einsatz einer harten Vollgummi-ARM.....	24

4. Reibungskräfte bei niedergezurrtten Ladegütern.....	28
4.1. Versuchsaufbau für die stationäre Ermittlung von Reibbeiwerten mit niedergezurrtten Ladegütern.....	28
4.2. Versuchsdurchführung für die Ermittlung von Reibbeiwerten mit niedergezurrtten Ladegütern.....	29
4.3. Ergebnisse: Reibungskräfte in einem ruhenden System bei un- und bei gesicherter Ladeinheit	31
4.4. Reibungskräfte in einem schwingenden System (0,25 g _{rpm}) bei un- und bei gesicherter Ladeinheit	33
4.5. Reibungskräfte in einem schwingenden System (0,25 g _{rpm}) bei un- und bei gesicherter Ladeinheit	34
5. Zulässigkeit von vereinfachten Berechnungsansätzen.....	37
6. Literatur.....	38
6.1. Fachbücher	38
6.2. Fachzeitschriften	39
6.3. Normen und Richtlinien.....	40
6.4. Literatur im Internet	44

1. Einleitung

Vor dem Hintergrund zunehmender Transport- und Unfallschäden, die auf mangelhafte Sicherungsmaßnahmen beim Transport verladener Güter – insbesondere auf mangelhafte Ladungssicherungsmaßnahmen – zurückzuführen sind /GDV07/ und die zwischenzeitlich den Gesetzgeber zur Verschärfung der diesbezüglichen Paragraphen der Straßenverkehrsordnung /STVO06/ bewogen haben, erhalten unzureichende Auslegungs- und Berechnungsvorgaben (z. B. Berechnungsvorgaben auf der Basis konstanter Kräfte, Berechnungsvorgaben ohne Berücksichtigung dynamischer Einflussfaktoren) zur Sicherung verladener Güter oder ungeeignete Kennwerte zur Beschreibung von realen Verladesituationen (z. B. Reibbeiwerte) eine besondere Brisanz.

Die Sicherheit im öffentlichen Straßenverkehr ist bislang eine weitgehend nationale Aufgabe, in der überwiegend nationales Recht, in Deutschland u. a. die Straßenverkehrsordnung (StVO), gilt. Vor dem Hintergrund unakzeptabler Unfallgefährdungen und -schäden infolge mangelhafter Ladungssicherungsmaßnahmen verlangt der Gesetzgeber im Rahmen der Straßenverkehrsordnung § 22 „Ladung“, die mit Wirkung zum 01. Januar 2006 geändert wurde: „Die Ladung einschließlich Geräte zur Ladungssicherung sowie Ladeeinrichtungen sind so zu verstauen und zu sichern, dass sie selbst bei Vollbremsung oder plötzlicher Ausweichbewegung nicht verrutschen, umfallen, hin- und herrollen, herabfallen oder vermeidbaren Lärm erzeugen können. Dabei sind die anerkannten Regeln der Technik zu beachten.“ /STVO06/

Der Gesetzgeber gibt somit das Ziel vor, ohne Einfluss auf die dafür geeigneten Ladungssicherungsmaßnahmen zu nehmen. Die Ausführungsempfehlungen zu einer sachgerechten Ladungssicherung im Straßengüterverkehr im deutschen Geltungsbereich werden insbesondere in der Richtlinie VDI 2700 „Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen“ qualitativ und zum Teil quantitativ beschrieben. Die Vorgaben der Ladungssicherung gemäß der Richtlinie VDI 2700 gelten somit für alle Transporte, die über deutsche Straßen inklusive des kombinierten Verkehrs abgewickelt werden.

Für andere Transportmittel wie bspw. Eisenbahn, Schiff oder Flugzeug gelten in der Regel entsprechende Vorschriften.

Aber gerade aufgrund der verschärften Forderung des Gesetzgebers, dass sich verladene Güter im Transportprozess im Straßengüterverkehr nicht verschieben oder gar herabfallen dürfen, ist dringender Handlungsbedarf zur Verbesserung der Transportsicherheit im Distributionsprozess gegeben.

Ein wesentlicher Aspekt für die Berechnung von Ladungssicherungsmaßnahmen ist die Ermittlung der jeweils wirkenden Reibungskräfte zwischen dem verladenen Gut und seiner jeweiligen Unterlage.

In der Vergangenheit ist jedoch festgestellt worden, dass sich die wissenschaftlich etablierten Erkenntnisse der Reibungslehre nur äußerst eingeschränkt auf die realen Verlade- und Transportsituationen übertragen lassen, so dass hier erheblicher Informationsbedarf besteht /BIER005/, /BIER01/.

2. Beziehung zwischen Haft- und Gleitreibung

Reibung ist erfahrungsgemäß ein physikalisches Phänomen, welches sich einer eindeutigen begrifflichen Fassung entzieht, da auf der einen Seite tektonische Bewegungen der Erdplatten als Reibungsvorgänge betrachtet werden und auf der anderen Seite Vorgänge der atomaren Wechselwirkungen. Insbesondere für den Bereich der Ladungssicherung stellt sich das Verständnis bzgl. wirksamer Reibungsmechanismen als sehr diffus heraus.

So ist lediglich der DIN 50320 eine anerkannte und weitgehende Definition der Reibung zu entnehmen, die jedoch keinerlei Aussagen über die dabei zu beachtenden physikalischen und/oder chemischen Mechanismen macht. Nach dieser Norm ist Reibung eine Wechselwirkung zwischen sich berührenden Stoffbereichen von Körpern, die eine Relativbewegung zwischen ihnen ver- oder behindert. Der Bereich nicht fester Körper wie beispielsweise der Pasten, Flüssigkeiten und Gase wird im Anschluss an diese Definition indirekt durch die Beschreibung verschiedener Reibungsaspekte erfasst. /DIN50320/

Aus diesem Grund erfolgt hier zunächst eine Darstellung unterschiedlicher Reibungsvorstellungen.

2.1. Reibungstheorie der Festkörpermechanik

Schon im 18. Jahrhundert erkannte und formulierte der französische Wissenschaftler Charles Augustin de Coulomb (1736 – 1806) das nach ihm benannte Coulombsche Haftreibungsgesetz, welches noch heute als eine wesentliche Grundlage der Mechanik gelehrt wird.

Reibung auf einer horizontalen Fläche

Ein starrer Körper der Masse m soll nach diesem Erklärungsmodell auf einer horizontalen Fläche durch eine horizontal wirkende Zugkraft F , die die Wirkung der Massekraft simuliert, bewegt werden (vgl. Abbildung 2-1).

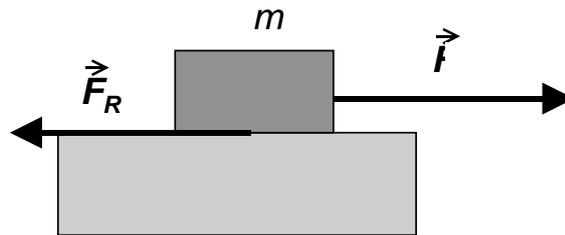


Abbildung 2-1: Kräftesystem in der horizontalen Ebene

Dabei zeigt sich, dass bei einer kleinen Zugkraft F noch keine Bewegung des Körpers ausgelöst wird, der Körper bleibt in Ruhe liegen. Es wirkt also eine Reibkraft F_R , welche der aufgebrachten Zugkraft F grundsätzlich entgegen gerichtet ist. Wird die Zugkraft F jedoch kontinuierlich erhöht, setzt mit Überschreiten einer Grenzkraft F_0 eine Verschiebung ein. Dieser Grenzfall tritt bei einem Verhältnis der Gewichtskraft F_G und der Zugkraft F ein, welches typisch für die Materialeigenschaften der beteiligten Körper bzw. Flächen ist. Das Grenzverhältnis dieser Kräfte wird Haftreibbeiwert bzw. Haftreibungskoeffizient $\mu_0 = m_H$ genannt und es gilt:

$$\mu_0 = F_0 / F_G$$

Weiterhin gilt in dieser Situation:

$$F_R = F_0$$

Solange also die Zugkraft F kleiner als die Grenzkraft F_0 ist, bleibt der Körper liegen und es gilt:

$$F \leq F_0 = \mu_0 \times F_G \text{ (Coulombsches Haftreibungsgesetz).}$$

Reibung auf einer geneigten Fläche

Die für die horizontale Ebene beschriebene experimentelle Darstellung führt zu gleichwertigen Ergebnissen wie die folgende Versuchsanordnung, bei der der gleiche starre Körper auf eine horizontale Fläche abgelegt und die Neigung dieser Fläche α kontinuierlich erhöht wird.

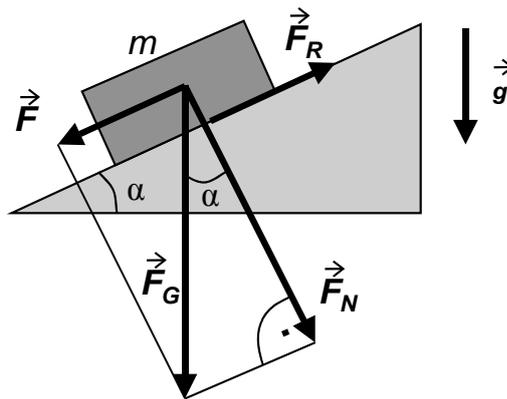


Abbildung 2-2: Kräftesystem in der geneigten Ebene

$$\mathbf{F}_N = \mathbf{F}_G \times \cos \alpha$$

Hierbei ist festzustellen, dass mit Einstellung eines Grenzwinkels α_0 der Körper ins Gleiten gerät. Auch dieser Grenzwinkel ist eine typische Konstante für die beteiligten Oberflächen und es gilt:

$$\tan \alpha_0 = F_0 / F_N,$$

und

$$\tan \alpha_0 = \mu_0.$$

Eine gleichmäßige Reduzierung des Neigungswinkels führt schließlich dazu, dass der zuvor gleitende Körper wieder abgebremst wird und danach in Ruhe liegen bleibt. Dieser zweite Grenzwinkel bzw. dessen Tangens beschreibt somit den oberen Grenzwert der Gleitreibung.

Folglich sind die Zustände der Haft- und der Gleitreibung zu unterscheiden, wobei die Haftreibung nach dieser Theorie immer größer als die Gleitreibung bei sonst gleichen Voraussetzungen ist.

Das Coulombsche Haftreibungsgesetz gilt jedoch ausschließlich unter den Rahmenbedingungen der Mechanik starrer Körper. Die betrachtet lediglich idealisierte Zustände, für die im wesentlichen folgende Eigenschaften gelten:

- Haftreibung > Gleitreibung,
- Ausschließliche Abhängigkeit der Reibkraft von der Normal- bzw. Gewichtskraft,

- Kein Eindringen des Probekörpers in die Auflagefläche und
- Unabhängigkeit der Gleitreibung von der Gleitgeschwindigkeit.

Die anerkannten Reibbeiwerte, die mangels geeigneter Kennwerte bislang zur Berechnung von Ladungssicherungsmaßnahmen herangezogen worden sind, basieren auf der Mechanik starrer Körper und der idealisierten Bildung von Kräftegleichgewichten in statischen Systemen, deren Übertragung auf reale Situationen im Einzelfall zu überprüfen ist. Die Ursachen der Reibung und ihre Einflussfaktoren stehen bei der Festkörpermechanik nicht im Zentrum der Betrachtungen.

Für die Ladungssicherung können jedoch die Erkenntnisse der Festkörpermechanik (vgl. Coulombsches Haftreibungsgesetz) mit ihren idealisierten Annahmen (z. B. starre, nicht verformbare Körper) nur eingeschränkt angewendet werden. Hier werden in der Regel Ladeflächen, rutschhemmende Materialien (RHM), Zurrmittel und Ladegüter als Reibungspartner eingesetzt, die den idealen Vorgaben nicht entsprechen. Insbesondere die weit verbreiteten Zurrgurte dürfen unter einer zulässigen Zugbelastung Dehnungen von bis zu 7 % aufweisen /EN12195/. Ein Zurrgurt der Länge von 6 m darf bei einem normgemäßen Einsatz eine Dehnung von bis zu 420 mm aufweisen, so dass eine absolute Fixierung des niedergezurten Ladegutes nicht möglich ist. Aber auch die weithin verwendeten Antirutschmatten (ARM) zur Erhöhung von Reibungskräften erfüllen als elastisch-plastisch verformbare Werkstoffe nicht die Rahmenbedingungen der Festkörpermechanik.

2.2. Klassifizierung unterschiedlicher Reibungsmechanismen

Die bisherige weitgehend experimentell ausgerichtete Erforschung von Reibungsmechanismen hat zu einer Aufteilung nach verschiedenen Gliederungsaspekten geführt, von denen die

- Haft-, Gleit- und Rollreibung,
- Äußere und innere Reibung sowie
- Festkörper-, Fluid- und Mischreibung

vorge stellt und ihre Bedeutung für die Ladungssicherung dargestellt werden.

2.2.1. Haft-, Gleit- und Rollreibung

Haftreibung liegt in einem ruhenden, statischen System vor, wohingegen die Bewegungsreibung grundsätzlich in dynamischen Systemen auftritt. Je nach Bewegungsart und –richtung wird die Bewegungsreibung unterschieden in Gleit-, Roll-, Wälz-, Bohr- und Stoßreibung sowie deren Mischformen. Die Bewegungsreibung kann bei gleichförmiger, ungleichförmiger oder intermittierender Bewegung auftreten. /BIER05/, /BIER01/

Haftreibung

Bleibt ein Körper unter Einwirkung einer resultierenden Kraft F , die ihn gegen eine Unterlage presst, in Ruhe liegen, liegt Haftreibung vor. Die Verteilung der Flächenpressung zwischen Körper und Unterlage ist in der Regel unbekannt und wird deshalb durch die zentral wirkende Reaktionskraft F_N ersetzt.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass Haftreibung grundsätzlich in der Ruhelage eines derartigen Kräftesystems vorliegt, unabhängig vom Vorhandensein einer Zug- oder Massekraft.

Gleitreibung

Gleitreibung entsteht, sobald ein Körper auf einer Unterlage bewegt wird. Ihre Kraft ist umso größer, je größer die Gewichtskraft des Körpers ist. Von der Größe der Auflagefläche ist sie nach den Statuten der Festkörpermechanik jedoch unabhängig.

Rollreibung

Rollreibung entsteht, sobald ein zylindrischer Körper mit dem Radius r auf einer Unterlage mit dem Radius R abrollt, wobei die Unebenheiten der beiden Körper wie die Zähne von Zahnrädern ineinander greifen. Damit stellt die Rollreibung eine Sonderform von Haft- und Gleitreibung in den Kontaktbereichen aufeinander abrollender Körper dar. Hier gilt:

$$F_R = \mu \times R/r \times F_N.$$

2.2.2. Äußere und innere Reibung

In einer makroskopischen Betrachtung wird die Reibung durch die stets vorhandenen Unebenheiten der Kontaktflächen bzw. in einer mikroskopischen Betrachtung durch molekulare Wechselwirkungen verursacht. Die dabei geleistete mechanische Reibungsarbeit wird weitgehend in Reibungswärme umgewandelt.

Äußere Reibung

Die äußere Reibung wird als Widerstand gegen eine relative Bewegung zwischen zwei verschiedenen Körpern definiert.

Dabei wird die äußere Reibung in der Grenzfläche zwischen den Körpern (Ladefläche/Unterlage – RHM – Ladegut/Prüfkörper) in der Form übertragbarer Kräfte wirksam. Diese Kräfte wirken entgegengesetzt parallel zu den die Bewegung verursachenden Kräften.

Innere Reibung

Aufgrund der äußeren Kraftwirkung erfolgt eine Weiterleitung der Kräfte ins „Innere“ der jeweiligen Materialien – insbesondere in die elastisch-plastisch verformbaren rutschhemmenden Materialien oder in verformbare Ladegüter -, indem die Moleküle relativ zueinander bewegt werden. Sie tritt im wesentlichen bei Bewegungen in Fluiden (Flüssigkeiten, Gase) und elastisch verformbaren Stoffen (z. B. Gummi, Kunststoff, Holz, Stahl) auf. Die innere Reibung tritt als Widerstand gegen eine relative Bewegung von Volumenelementen innerhalb eines Körpers auf und führt zur Verformung dehnbarer Werkstoffe.

2.2.3. Festkörper-, Fluid- und Mischreibung

Der Aggregatzustand der beteiligten Stoffbereiche führt zu der Unterteilung in Festkörper-, Flüssigkeits-, Gas- und Mischreibung. Während bei der Festkörperreibung ein unmittelbarer Kontakt ohne trennende Zwischenschicht zwischen Grund- und Gegenkörper vorliegt (vgl. Abbildung 2-3), werden diese bei Flüssigkeits- und Gasreibung durch einen Flüssigkeits- oder Gasfilm vollständig voneinander getrennt (vgl.

Abbildung 2-4). Die Mischreibung erfasst alle dazwischen liegenden Reibungszustände und ist insbesondere bei nassen Reibungspartnern zu beachten.

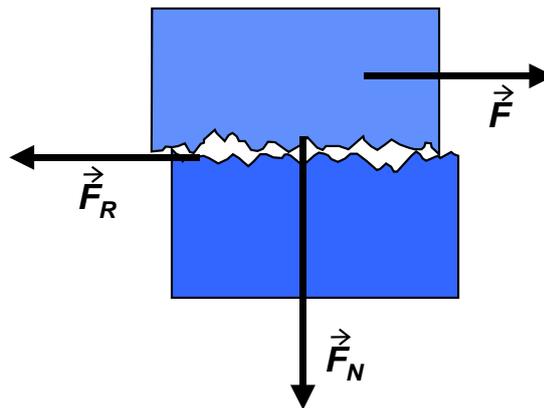


Abbildung 2-3: System der Festkörperreibung

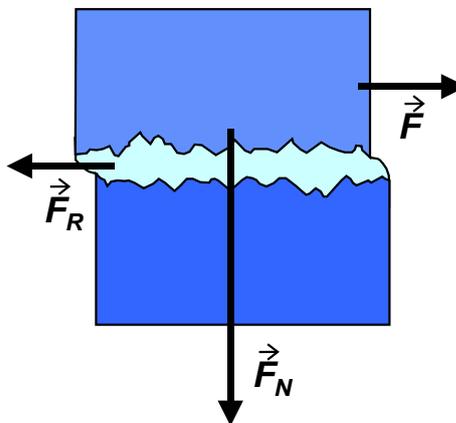


Abbildung 2-4: System der Fluidreibung

Beide Reibungsmechanismen entstehen durch die Unebenheiten der Oberflächen der beteiligten Körper bzw. zwischen den beteiligten Medien. Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal liegt in der Größenordnung der übertragbaren Bewegungskräfte, die mit einem zunehmendem Anteil reibungsmindernder Zwischenschichten abnimmt.

Ein bislang nur wenig beachteter Sonderfall der Reibung ist mit dem Einsatz von rutschhemmenden Zwischenlagen aus gummiartigen Materialien zu sehen (vgl. Abbildung 2-5).

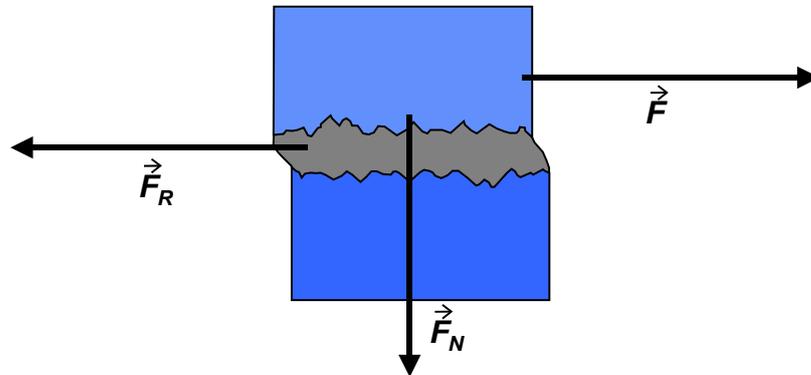


Abbildung 2-5: System der Reibung beim Einsatz von Antirutschmatten

Antirutschmaterialien gehören zu den Körpern mit einer in weiten Bereichen elastischen Verformbarkeit, die einerseits größeren Verschiebungen Widerstand entgegen setzen, andererseits jedoch kleinere Verschiebungen sowie deren Zurückstellung ermöglichen. Dieses Verhalten - insbesondere vor dem Hintergrund der Dämpfungseigenschaften von horizontalen und vertikalen Schwingungs- und Stoßbelastungen im Straßentransport - prädestiniert sie als zusätzliches Mittel der Ladungssicherung.

Trockene Reibung

Bei der trockenen Reibung, die weitgehend dem „Coulombschen“ Reibungsverständnis entspricht, werden die Kräfte in der Grenzschicht zwischen zwei nahezu festen Körpern betrachtet.

Viskose Reibung

Die viskose Reibung tritt in Systemen auf, bei denen mindestens einer der beiden Reibpartner durch viskose Eigenschaften (z. B. Flüssigkeiten, Gase, aber auch hochbelastete Gummimatten) gekennzeichnet ist. Hierbei wird die „Stokes-Reibung“ bei Relativbewegungen mit geringer Geschwindigkeit und die „Newton-Reibung“ bei schnellen Bewegungen unterschieden. /RWTH01/

2.2.4. Spezialgebiete der Reibungslehre

Mit der Einführung des Begriffes „Tribologie“ wurde erstmalig ein übergeordneter Begriff für das interdisziplinäre Zusammenwirken von Physik, Chemie, Werkstoffwissenschaft und anwendungsbezogenen Ingenieursdisziplinen vorgestellt, der die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung beinhaltet. Die Tribologie verbindet die Bearbeitung von Reibungs-, Verschleiß- und Schmierungsvorgängen miteinander und schließt entsprechende Grenzwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein /DIN50323/. Die Reibung innerhalb von Flüssigkeiten und Gasen zwischen Schichten unterschiedlicher Dichte wird an dieser Stelle nicht betrachtet.

Jedes tribologische System setzt sich dabei aus Grund- und Gegenkörper, Zwischenstoff und Umgebungsmedien zusammen und betrachtet die Stoff- und Formeigenschaften der Elemente sowie die auftretenden Wechselwirkungen. Die mit der Einwirkung äußerer Belastungen verbundenen dynamischen Änderungen an den beteiligten Elementen können dessen Systemeigenschaften zum Teil erheblich beeinflussen (vgl. /DIN 50320/, /DIN50323/).

Themenfelder der Tribologie sind vor diesem Hintergrund u. a.

- der Getriebebau, bei dem das Übertragungsverhalten von Kräften und Momenten aufgrund von Reibungskräften im Vordergrund steht,
- die Oberflächen- und Schmierstofftechnik zur Reduzierung von reibungsbedingtem Verschleiß,
- der Fahrzeugbau bei der Optimierung von Bremssystemen,
- die Reifenindustrie bei der Entwicklung leistungsfähiger Fahrzeugreifen sowie
- die Sicherheitstechnik, deren Tätigkeitsfeld die Entwicklung rutschhemmender Beläge für Verkehrsflächen beinhaltet.

Dieser Verschleiß produzierende Aspekt von Reibung tritt beim Einsatz von rutschhemmenden Materialien insbesondere dann auf, wenn beispielsweise Partikel, Fasern oder Späne aus Transportpackstücken, Holzpaletten oder Antirutschmatten aufgrund der Relativbewegungen herausbrechen und als Verschleißpartikel zwischen den Reibungspartnern bewegt werden.

2.3. Reibungstheorie für elastisch nachgiebige Reibungssysteme

2.3.1. Reibungsverläufe mit ausgeprägtem Haftreibungsgrenzfall

Die Frage nach den tatsächlich wirksamen Reibungsmechanismen beim Einsatz realer, nicht absolut fester Reibungspartner kann durch eine detaillierte Betrachtung des Kontaktbereichs beantwortet werden. Dieser Kontaktbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass das Rauigkeitsprofil des Prüfkörpers/Ladegutes auf dem Rauigkeitsprofil der Unterlage/Ladefläche liegt (vgl. Abbildung 2-6).

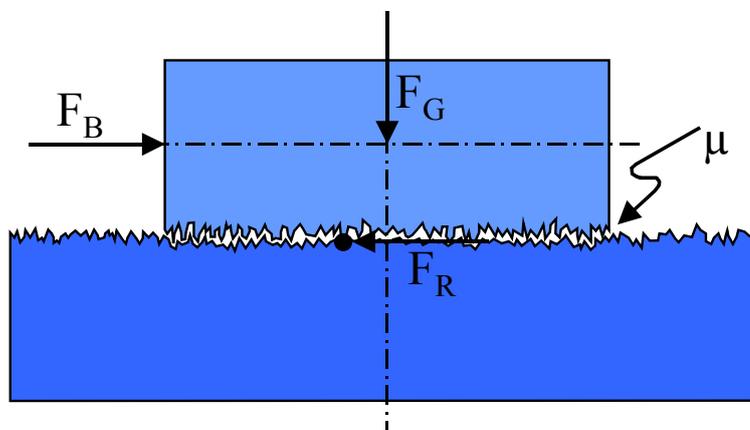


Abbildung 2-6: Kontaktfläche zwischen zwei Körpern im Reibungssystem

Dabei liegt der Prüfkörper in Ruhe, sobald sich ein Gleichgewicht zwischen der Belastung in den Kontaktflächen (Flächenpressung) und den Materialeigenschaften der beteiligten Körper (Festigkeit) eingestellt hat. Aufgrund der unterschiedlichen Rauigkeitsprofile beider Oberflächen ist keine gleichmäßige Flächenpressung vorhanden; vielmehr liegt eine auf mindestens drei oder mehr Auflagepunkte konzentrierte Kraftwirkung vor. Die in den Auflagepunkten wirkenden Kräfte sind abhängig von der jeweiligen Gewichtskraft des Prüfkörpers und der Anzahl der Auflagepunkte.

Sobald in einem solchen System horizontal wirkende Kräfte auftreten, rückt die Reibung ins Zentrum der Betrachtung. Dieses wird labortechnisch im Zugversuch und dem dabei aufgenommenen Kraft-Weg-Verlauf (vgl. Abbildung 2-7) abgebildet.

Bei diesen Beispielen ist ein Holzkörper auf einer hölzernen Unterlage mit einer konstanten Zuggeschwindigkeit bewegt worden. In der ruhenden Ausgangslage (vgl. Pkt. 0) sind die beteiligten Körper mit ihren Oberflächenprofilen verzahnt, wobei

Setzvorgänge im Laufe der Zeit (z. B. Versuchsvorbereitung, Positionierung des Prüfkörpers) zu einer Intensivierung der Verzahnung geführt haben. Dabei nisten sich Oberflächenspitzen des Prüfkörpers in den Oberflächentälern der Unterlage ein. Mit steigender Zugkraft geschieht nun folgendes: Nach Überschreiten einer maximalen Zugkraft (vgl. Pkt.1) erfolgt eine geringfügige ruck- oder sprungartige Verschiebung des Prüfkörpers mit einem Rückgang der wirksamen Zugkraft. Unmittelbar danach beginnt ein erneuter Kraftanstieg mit einer weiteren Bewegung des Prüfkörpers. Nach Überschreiten der anfänglichen Haftreibungskraft (vgl. Pkt.1) stellt sich im folgenden ein niedrigeres Niveau der erforderlichen Zugkräfte (vgl. Pkt.2) ein. Der dargestellte Kraft-Weg-Verlauf zeigt, dass nach Überschreiten der Haftreibung (vgl. Pkt. 1) der Körper in einen gleitähnlichen Zustand mit einem geringeren Kraftniveau übergeht (vgl. Pkt.2).

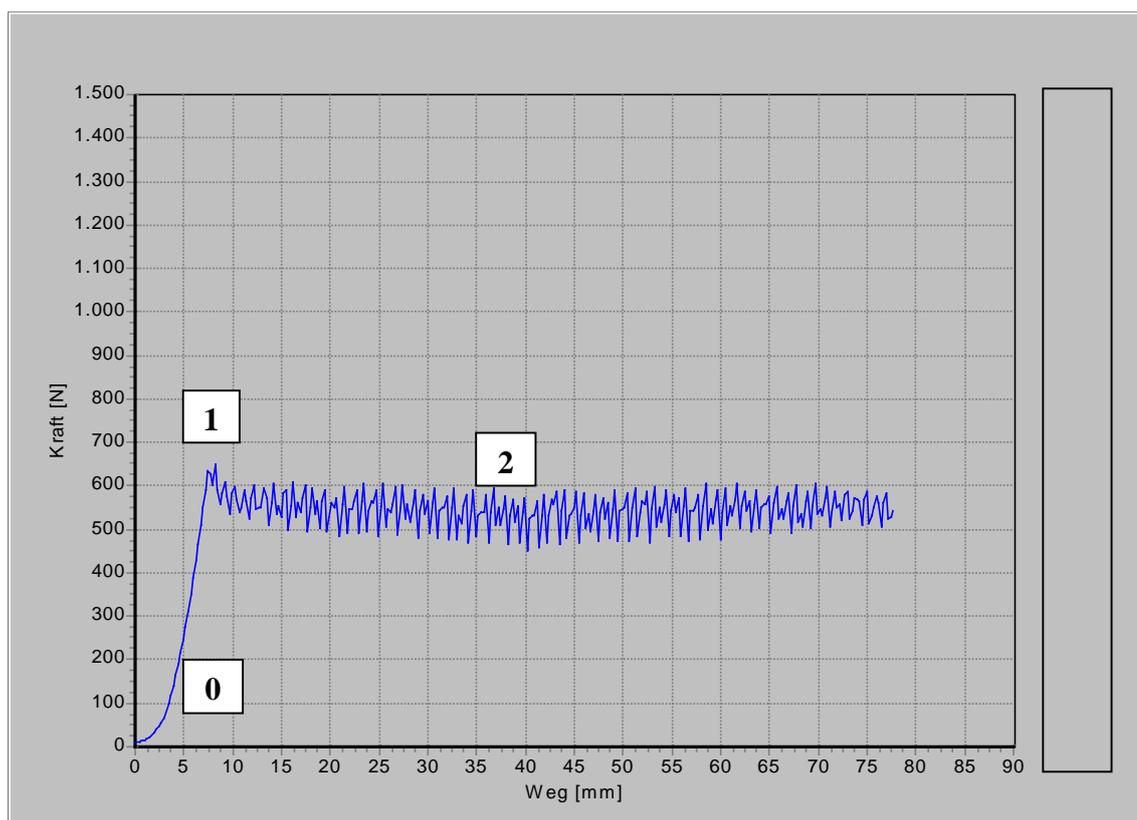


Abbildung 2-7: Messschrieb mit ausgeprägtem Haftreibungsgrenzfall

Dieser Kraft-Weg-Verlauf ist auf folgenden Wirkmechanismus zurückzuführen: In den Kontaktzonen steigt mit zunehmender Zugkraft die Flächenpressung und führt zu einem ansteigenden Spannungszustand, der sich in einer Verformung der Kontaktzonen

(Formänderungsarbeit) und einer Verschiebung der Kontaktflächen zueinander (Verschiebearbeit) äußert. Zunächst gleiten die Körper an den Flanken der momentanen Kontaktflächen aneinander entlang (in der Regel eine kaum sichtbare Bewegung im Mikrobereich), verformen dabei die Profilkonturen (Verschleiß) und gehen ggf. mit Überschreiten einer maximalen Zugkraft (vgl. Pkt. 1) in eine gut erkennbare relative Verschiebung (Bewegung im Makrobereich) über. Dabei lösen sich die Körper in diesen Kontaktzonen kurzfristig voneinander - der Körper „ruckt“ oder „springt“. Dabei baut sich der momentane Spannungszustand kurzfristig ab, bis (nach der Landung in einem benachbarten Profiltal) ein erneuter Zyklus des Kraftanstiegs mit einem Aufgleiten in den Kontaktzonen beginnt. Da aufgrund der kontinuierlich aufgebrachten Zugkraft die Setzvorgänge nach jedem ruckartigem Versatz nur teilweise erfolgen, ist im folgenden Verlauf ein geringeres Zugkraftniveau vorhanden (vgl. Pkt. 2).

Die Profilstrukturen der Reibpartner bestimmen somit die Kräfte, die für eine Verschiebung von vergleichsweise festen Körpern zueinander aufgebracht werden müssen. Anders als beispielsweise bei tribologischen Untersuchungen, bei denen die Rauigkeiten der Reibpartner in der Regel auf einen vergleichsweise engen Bereich begrenzt sind, müssen bei der Ladungssicherung Materialpaarungen mit gänzlich unterschiedlichen Oberflächenprofilen zugrunde gelegt werden. Hier reichen die Rauigkeitswerte von wenigen μm bei metallischen Flächen bis hin zu mehreren mm bei Flächen mit besonderen Oberflächenkonturen (z. B. besandete und kunststoffbeschichtete Antirutschflächen, genutete Aluminiumprofile, Tränenbleche), so dass ein nahtloser Übergang von Rauigkeiten im tribologischen Sinne bis hin zu formschlüssigen Verbindungen im maschinenbaulichen Sinne besteht. Der Einsatz von gummiartigen Antirutschmatten und der damit erzielbaren volumenmäßigen Ausfüllung von Oberflächenunebenheiten unterstreicht ebenfalls, dass eine Begrenzung des Reibungskoeffizienten auf $0 \leq \mu \leq 1$ nicht zulässig ist.

2.3.2. Reibungsverläufe ohne ausgeprägten Haftreibungsgrenzfall

Als Besonderheit stellen sich die Kurven der Reibungskräfte bzw. der Reibbeiwerte bspw. von elastischen-plastisch verformbaren Materialien heraus, da bei ihnen ein kontinuierlicher Übergang in den Gleitbereich erfolgt, ohne dass ein Haftreibungsgrenzfall überwunden worden ist (vgl. Abbildung 2-8). Ursächlich hierfür ist eine merkliche

elastische Verformung der ARM in den Kontaktbereichen, so dass schon eine Gleitbewegung erfolgt, auch wenn einige Kontaktstellen noch miteinander verzahnt sind.

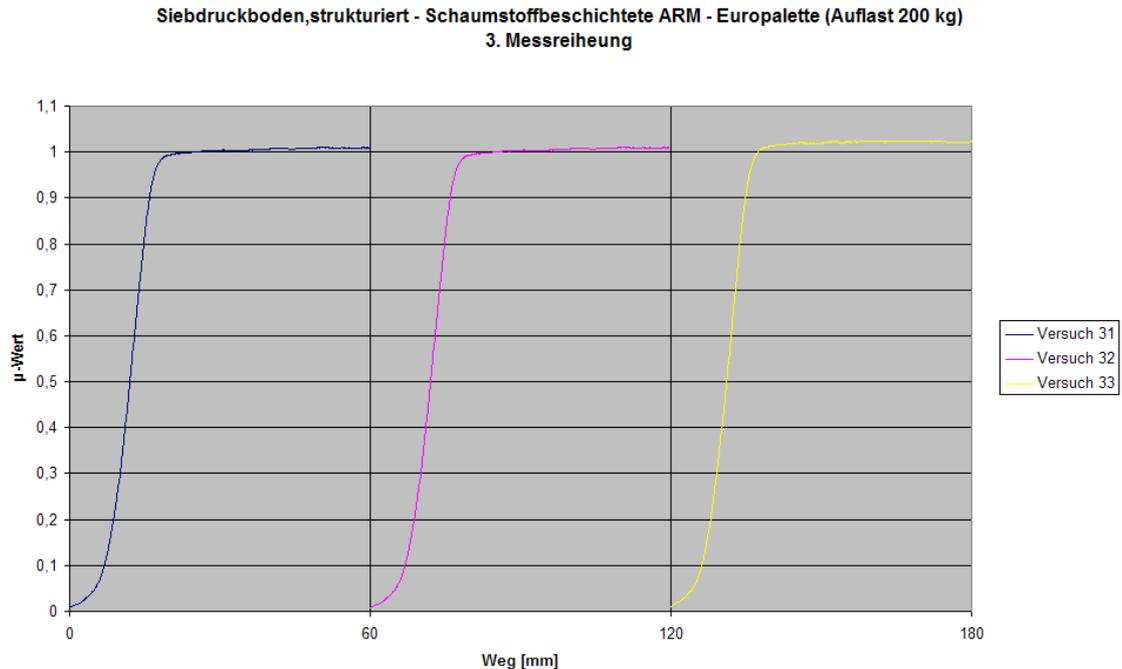


Abbildung 2-8: *Messschrieb ohne ausgeprägtem Haftreibungsgrenzfall*

2.3.3. Flächenpressungsabhängigkeit der Reibbeiwerte

Umfangreiche empirische Untersuchungen zeigen weiterhin, dass der Einfluss der spezifischen Flächenpressung auf die Reibbeiwerte bei vergleichsweise formfesten Werkstoffen mit einer vergleichsweise harten Oberfläche geringer ist als bei leicht verformbaren Werkstoffen mit einer weichen Oberfläche (vgl. Abbildung 2-9 und Abbildung 2-10).

Auch vor diesem Hintergrund ist eine feste Abhängigkeit zwischen Haft- und Gleitreibungswerten sowie die Verwendung von Werten, die nicht auf den jeweiligen Anwendungsfall bezogen sind, nicht gegeben bzw. nicht zulässig.

Gummigranulat-ARM, 3 mm

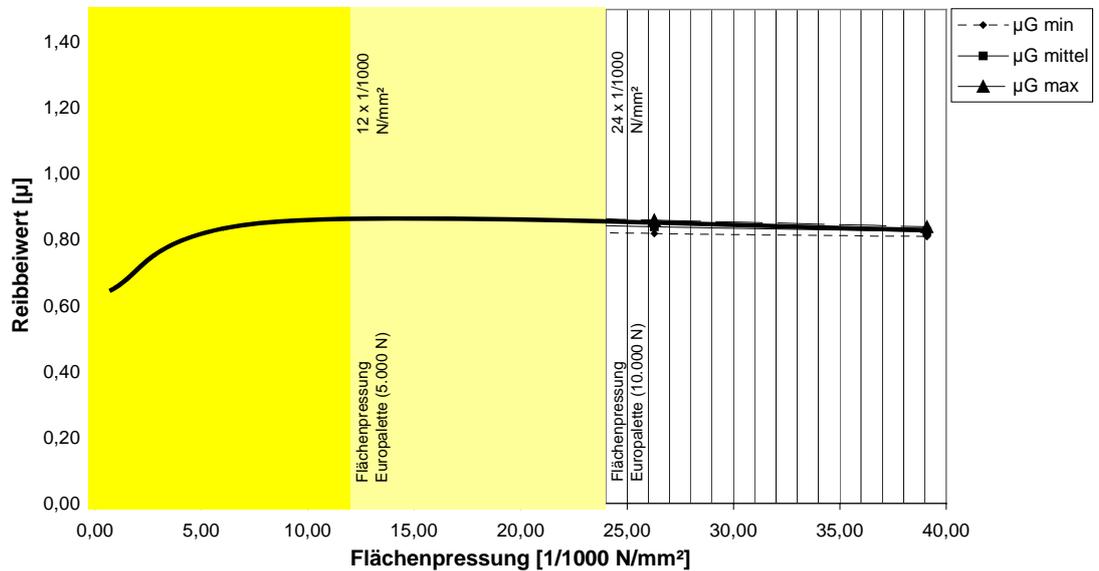


Abbildung 2-9: Flächenpressungsspezifischer Verlauf von Gleitreibbeiwerten einer Gummigranulat-ARM

Schaumstoffbeschichtete ARM mit gelochter Oberfläche, 4 mm

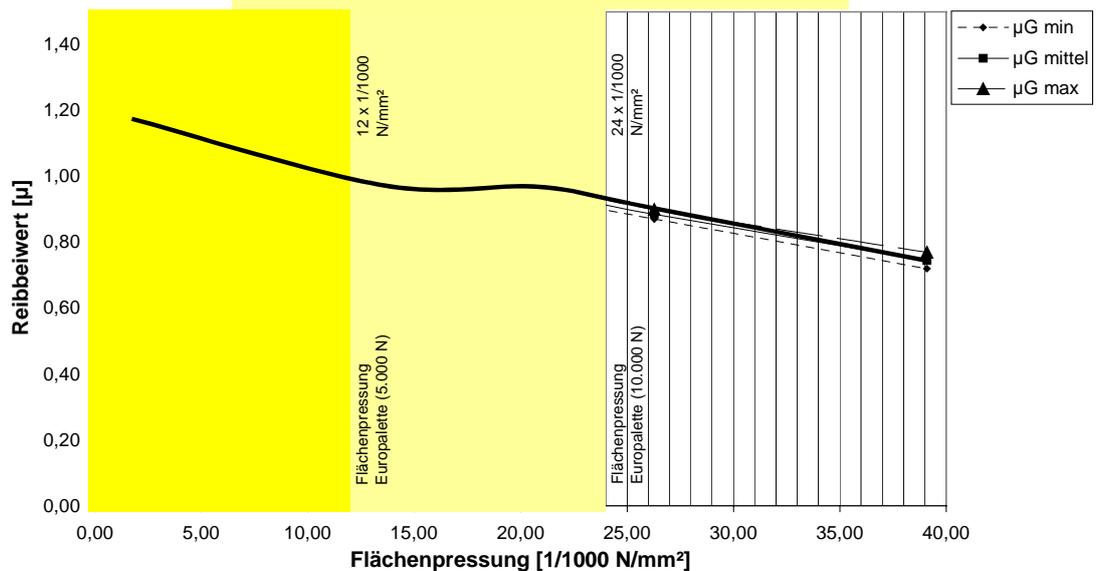


Abbildung 2-10: Flächenpressungsspezifischer Verlauf von Gleitreibbeiwerten einer schaumstoffbeschichteten ARM mit gelochter Oberfläche

2.3.4. Zwischenergebnis

Vor dem hier dargestellten Hintergrund stellt sich die klassische Reibungstheorie der Festkörpermechanik als Sonderfall heraus, bei dem sich aufgrund der Festigkeiten der beteiligten Reibungspartner kein entscheidender Einfluss auf Formänderungsvorgänge in den Oberflächenprofilen und infolge dessen auf die Anzahl der wirksamen Kontaktstellen ergibt.

In der Realität der Ladungssicherung, in der elastisch-plastisch verformbare Objekte zum Einsatz gelangen, werden die wirksamen Reibungskräfte bzw. Reibbeiwerte durch die wirksame Anzahl der infinitesimal kleinen Kontaktstellen und der dort wirksamen Festigkeitsmerkmale der Reibungspartner beeinflusst.

Im Rahmen derartiger Untersuchungen ist somit nachgewiesen worden, dass zwischen dem Haftreibbeiwert und dem Gleitreibbeiwert einer Reibungskombination kein mathematischer Zusammenhang besteht /BIER01/.

3. Reibbeiwerte in dynamischen Systemen

Aufgrund vertikal wirkender Schwingungen und Stöße wirkt im Moment einer senkrechten Bewegung eine „Dynamik-Kraft“ auf das Ladegut, welche die wirksame Normalkraft um den senkrechten Anteil dieser Dynamikkraft reduziert oder erhöht. Infolge der rechnerischen Beziehung zwischen Normalkraft, Reibbeiwert und Reibungskraft werden somit in einem dynamischen Reibungssystem auch die tatsächlich momentan wirkende Reibungskraft und der jeweilige Reibbeiwert beeinflusst.

Ergänzend zu der Berechnung der effektiven, vertikal wirkenden Kräfte sowie der daraus abzuleitenden, horizontal wirkenden momentanen Reibungskräfte erhält die Dauer der Kraftwirkung eine entscheidende Bedeutung.

Aufgrund der kleinen Zeitintervalle ist jedoch davon auszugehen, dass die realen, momentan wirkenden Kräfte wesentlich durch weitere Rahmenbedingungen wie beispielsweise das Feder-Dämpfungs-Verhalten des gesamten Reibungssystems (z. B. Transportmittel, rutschhemmendes Material, Ladegut) beeinflusst werden.

3.1. Versuchsbeschreibung für die Ermittlung von Reibbeiwerten mit Prüfmodellen

3.1.1. Quasistatische Reibbeiwertermittlung

Zur Ermittlung von Reibungskräften in einem ruhenden System ist ein Prüfstand gemäß Abbildung 6-1 eingesetzt worden, der gemäß eines für die Ladungssicherung maßgeblichen Prüfspektrums konzipiert ist und aus folgenden Komponenten besteht:

- Unterbau der Ladefläche,
- Spannvorrichtung an der Ladeinheit,
- Universalprüfeinrichtung für Zug- und Druckprüfungen und
- PC-basierte Auswerteeinrichtung.

Der Unterbau der Ladefläche besteht in diesem Beispiel aus einer vollständig mit Sand gefüllten Holzkiste, die aufgrund ihres Gewichtes und der Sandfüllung als starre

Unterlage zu betrachten ist. Die zu verwendenden Ladeflächenbeläge werden auf diese Unterlagen aufgeschraubt, wobei die vier Befestigungsschrauben außerhalb der Standflächen der Prüfkörper liegen. Darauf werden die Prüfobjekte abgestellt, mit den Prüfgewichten symmetrisch belastet und mittels der Spannvorrichtung an dem Zugprüfstand angeschlossen.



Abbildung 3-1: Versuchsstand zur stationären Ermittlung von Reibbeiwerten mit Prüfmodellen

Eine Universalprüfmaschine verfährt in einer einachsigen Zugbewegung einen Aufnahmeschlitten in vertikaler Richtung, wobei die für die Hub- oder Senkbewegung erforderlichen Antriebskräfte durch eine Kraftmessdose erfasst werden. An dem Aufnahmeschlitten wird ein Stahlseil angeschlagen und über eine Umlenkrolle mittels einer Spannvorrichtung am Prüfkörper befestigt. Die gesamte Einrichtung wird vor Versuchsbeginn und bei Unterbrechung der Versuche nach Herstellervorgaben kalibriert

bzw. justiert, wobei insbesondere der Reibungswiderstand der Umlenkrolle ermittelt wird.

Die Dokumentation der Prüfparameter und der Messergebnisse erfolgt über einen angeschlossenen Personal Computer in der Form von grafischen Kraft-Weg- bzw. Reibbeiwert-Diagrammen sowie tabellarischer Ausdrücke. Die Seilanschlagspunkte an dem Aufnahmeschlitten und der Spannvorrichtung am Prüfkörper sind derart ausgeführt, dass durch eine geringe Presspassung zwischen Seilkausche und Aufnahmebolzen ein spielfreier Zug erfolgt. Die Versuchsdurchführung erfolgt standardmäßig in einem Klima E gemäß DIN ISO 2233 bei +20 °C Raumtemperatur und 65 % relative Luftfeuchtigkeit.

Die zu verwendenden Ladeflächenbeläge (Siebdruckboden, strukturiert, gebraucht, trocken, besenrein) werden auf die Unterlage rutschfest aufgeschraubt. Darauf werden die Prüfkörper (Holzpalettenkufe (400 mm x 100 mm) mit Alu-Kasten) abgestellt. Weiterhin werden rutschhemmende Materialien vollflächig zwischen die Ladefläche und die Holzpalettenkufe gelegt, wobei sichergestellt wird, dass auch bei Beladung des Prüfkörpers kein Kontakt zwischen Prüfkörper und Unterlage besteht. Der Prüfkörper wird mit Prüfungsgewichten symmetrisch belastet und mittels der Spannvorrichtung an dem Zugprüfstand angeschlossen.

Die Zuggeschwindigkeit ist in Anlehnung an andere Prüfnormen auf 100 mm/min eingestellt werden.

Für jeden Messdurchgang erfolgte eine Neupositionierung des Prüfkörpers und/oder der rutschhemmenden Materialien, so dass ein Einfluss von Materialverschleiß auf die Messergebnisse ausgeschlossen werden kann.

Eine möglichst realitätsnahe Ermittlung von Reibungskräften und Reibbeiwerten setzt die Durchführung mehrfacher Messreihen mit jeweils anderen Prüfobjekten für Ladefläche, ARM und Ladungsträger bzw. Ladegut voraus.

Die Messung der Zug- bzw. Reibungskräfte sowie die Darstellung der Kraftverläufe bzw. die Darstellung der umgerechneten Reibbeiwerte erfolgten zeitgleich. Damit konnten während der einzelnen Messungen Bewertungen des Messergebnisses erfolgen, indem außergewöhnliche und unerwartete Ereignisse sofort erkannt werden und die Messungen ggf. wiederholt werden konnten.

Pro Messreihe wurden mit unveränderten bzw. gleichen Parametern mindestens drei Einzelmessungen durchgeführt. Sofern unerwartete Ergebnisse zu beobachten waren, wurden diese Messungen komplett wiederholt, so dass sich ggf. aus der Summe der Messungen die dokumentierten Ergebnisse ableiten lassen.

Die Wiederholgenauigkeit der Messungen hat sich als sehr gut herausgestellt, da sich bei mehrfacher, unabhängiger Wiederholung der Messungen mit wechselnden Prüfobjekten bei ansonsten gleichen Versuchsparametern und einer Überlagerung der Messkurven ein nahezu deckungsgleicher Verlauf der Messkurven ohne ausgeprägte Schwankungsweite ergab.

3.1.2. Simulation dynamischer Stoß- und Schwingungsbelastungen

Zur Ermittlung der Reibbeiwerte in einem dynamisch angeregten System ist die Ladefläche direkt auf einer Schwingprüfeinrichtung befestigt worden.

Hier sind sowohl vertikal abwärts gerichtete Einzelstöße als auch für den Lkw-Transport typische Schwingungsbelastungen simuliert worden.

Der weitere Aufbau entspricht dem zuvor beschriebenen.

Die Simulation von Schwingungsprofilen im Transportprozess erfolgt mangels deutscher oder europäischer Prüfnormen nach ASTM 4728 und/oder ASTM 4169.

Die ASTM-Normen ASTM D 4728 Random Vibration Test Of Shipping Containers und ASTM D 4169 Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems) sind zur Zeit die einzigen auch auf europäische Verhältnisse anwendbaren Normen für Schwingungs-Prüfungen von transportierten Gütern.

Die hierbei erzeugten Schwingungsprofile simulieren realitätsnah das Schwingungsverhalten von Lkw auf Straßen. Wie auch in der Realität entstehen dabei durch Überlagerungen von Frequenzen unterschiedlicher Beschleunigungsintensität Stöße und Schocks, die bis zu 3,5 g Beschleunigung erreichen können. Die Testspektren werden als spektrale Leistungsdichten (PSD = Power Spectral Density) in $[g^2/Hz]$ über der Frequenz angegeben und können somit auf einfache Weise in die Steuerung einer Schwingprüfeinrichtung eingegeben werden. /ASTM4169/, /ASTM4728/

Empfehlungen für anzuwendende Schärfegrade und Prüfdauern sowie eine genaue Spezifizierung des Frequenzspektrums werden jedoch nur in ASTM D 4169 gegeben /ASTM4169/. Der „Assurance Level“ beschreibt die Intensität des Tests und basiert auf der Wahrscheinlichkeit des Auftretens in typischen Distributionswegen. Level 1 beschreibt die härteste Intensität mit gleichzeitig geringer Wahrscheinlichkeit des Auftretens. Level 3 beschreibt die geringste Intensität, jedoch mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit des Auftretens. Für die Prüfungen im Rahmen dieser Arbeit wurden die Versuchsparameter so gewählt, dass ein allgemeiner Lkw-Transport mit dem Assurance Level 3 und Level 1 sowie zum Vergleich ohne Schwingungsanregung abgebildet worden ist.

3.2. Ergebnisse: Einsatz einer weichen, schaumstoffbeschichteten ARM

Die Messkurven der Reibungskombination Siebdruckboden – schaumstoffbeschichtete, weiche ARM – Holzkufe in einem quasistatischen, ruhenden System zeigten den typischen Kurvenverlauf der Reibbeiwerte von weichen, formveränderbaren ARM ohne ausgeprägten Haftreibungsgrenzfall (vgl. Abbildung 3-2).

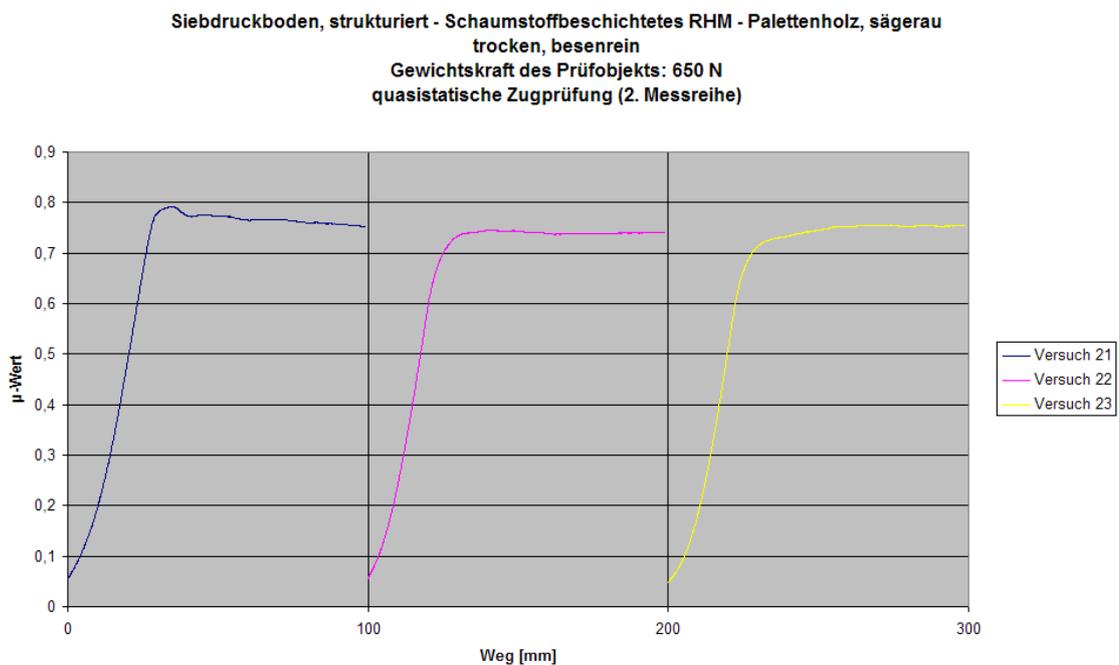


Abbildung 3-2: *Messschrieb des Reibbeiwertes eines schaumstoffbeschichteten RHM im quasistatischen Zugversuch*

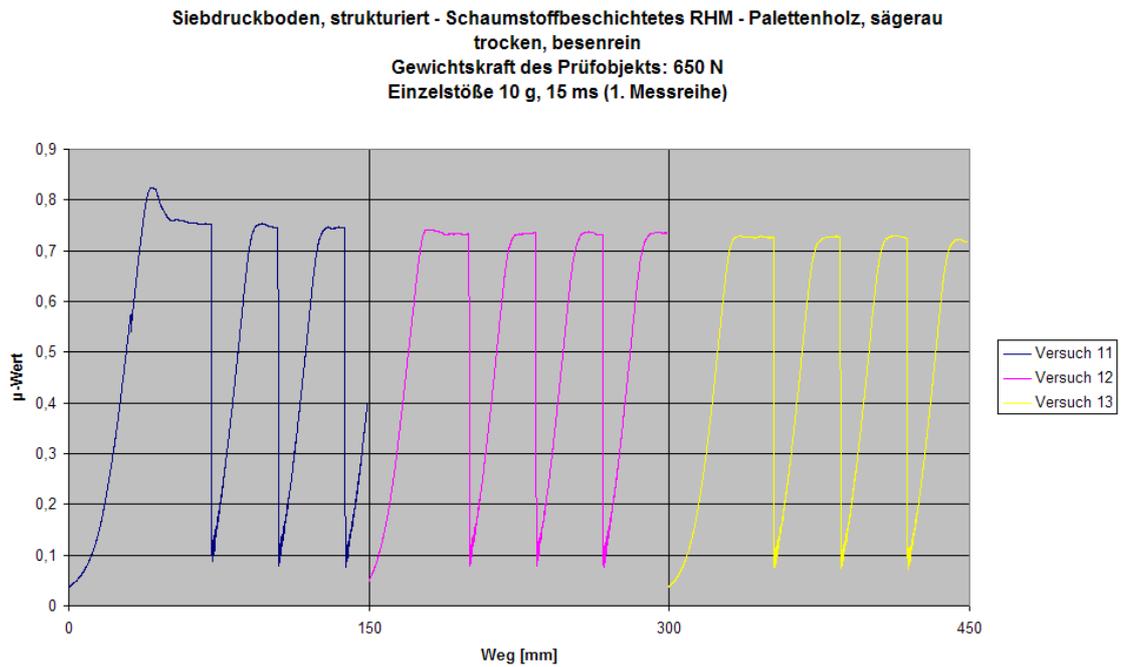


Abbildung 3-3: Messschrieb des Reibbeiwertes eines schaumstoffbeschichteten RHM bei Einzelstößen

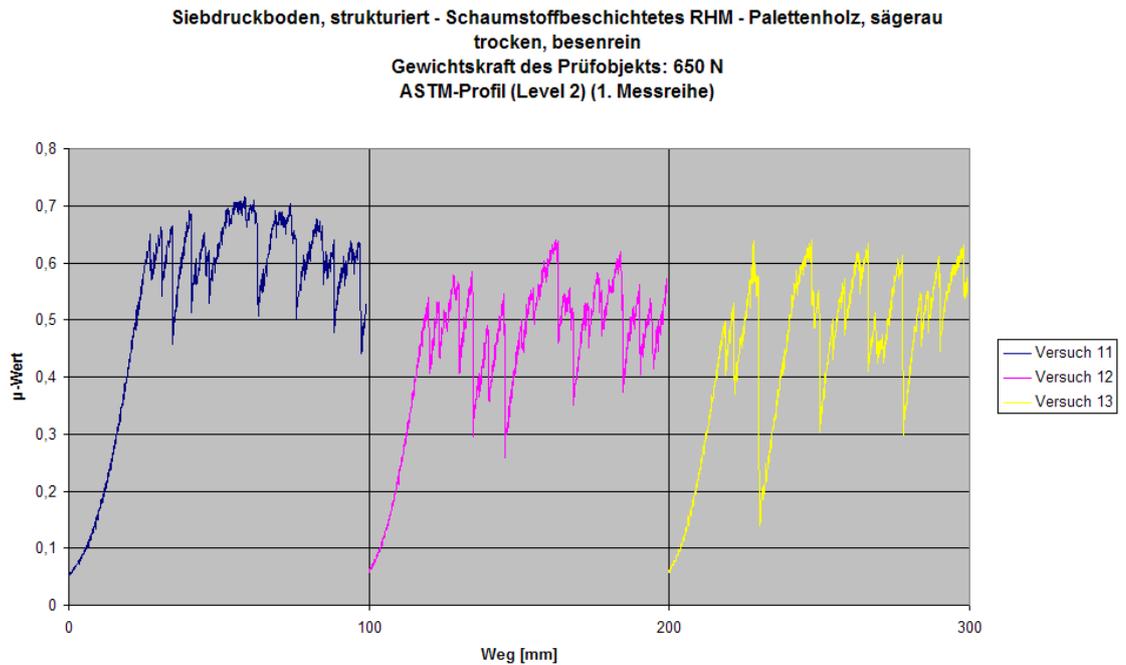


Abbildung 3-4: Messschrieb des Reibbeiwertes eines schaumstoffbeschichteten RHM bei Schwingungsbelastung

In der Abbildung 3-3 ist der Messschrieb einer Prüfung zu sehen, bei dem vertikal abwärtsgerichtete Einzelstöße mit einer Amplitude von 10 g und einer Stoßdauer von 15 ms in das Reibungssystem eingeleitet wurden.

Mit jedem Einzelstoß sind die wirksamen Druckkräfte in der Kontaktfläche reduziert worden. Anschließend wurde wieder das ursprüngliche Kraftniveau erreicht. Somit sind in den jeweiligen Entlastungsmomenten lediglich geringe Reibungskräfte – entsprechend geringe Reibbeiwerte - für die Bewegung des Prüfobjektes aufgebracht worden.

Aufgrund der kurzen Wirkungsdauer ist keine kontinuierliche Verschiebung, sondern ein wiederholtes „Wandern“ des Prüfobjektes festgestellt worden.

Der Abbildung 3-4 ist zu entnehmen, dass die Reibungskräfte bzw. Reibbeiwerte dieser Reibungskombination bei einer dynamischen Schwingungsanregung gemäß ASTM 4728 /ASTM4728/ mit einem quantifizierbaren Kennwert in keiner Weise beziffert werden können, da die momentanen Reibungskräfte unmittelbar von den vertikal wirksamen Druck- oder Entlastungsspitzen beeinflusst werden.

Im Unterschied zu den folgenden Prüfungen ist die ausgeprägte Dämpfungswirkung der weichen, elastisch-plastisch verformbaren ARM zu erkennen, da das Reibungsniveau auf einem vergleichsweise höheren Niveau liegt (vgl. Abbildung 3-7).

3.3. Ergebnisse: Einsatz einer harten Vollgummi-ARM

Die Abbildung 3-5 lässt in ihren Messkurven der Reibungskombination Siebdruckboden – Vollgummi-ARM – Holzkufe in einem quasistatischen, ruhenden System den typischen Kurvenverlauf der Reibbeiwerte von vergleichsweise harten, formstabilen Vollgummi-ARM ohne ausgeprägten Haftreibungsgrenzfall erkennen.

Als Grund für das nahezu identische Reibungsniveau ist die Eigenschaft der rutschhemmend wirksamen Oberfläche der ARM in Verbindung mit dem Siebdruckboden (z. B. Vielzahl der effektiv wirksamen Kontaktbereiche) sowie in Verbindung zur Palettenholzkufe (z. B. aufgrund der Faserstruktur der Holzkufe sind die wirksamen Kontaktstellen reduziert) festzuhalten.

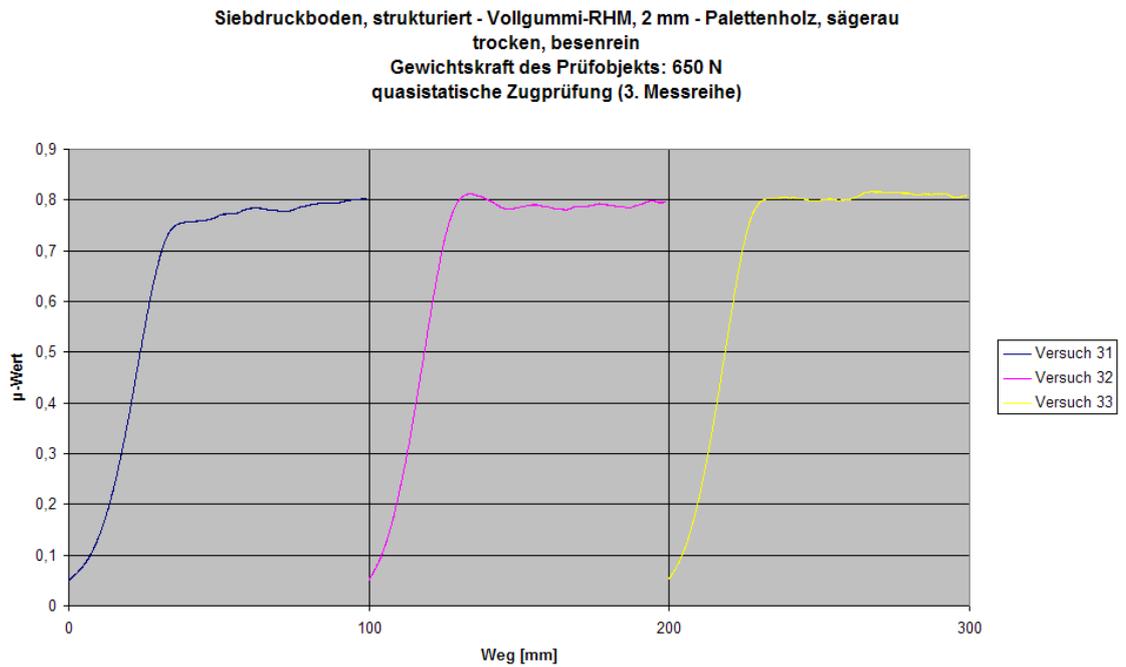


Abbildung 3-5: Messschrieb des Reibbeiwertes eines Vollgummi-RHM im quasistatischen Zugversuch

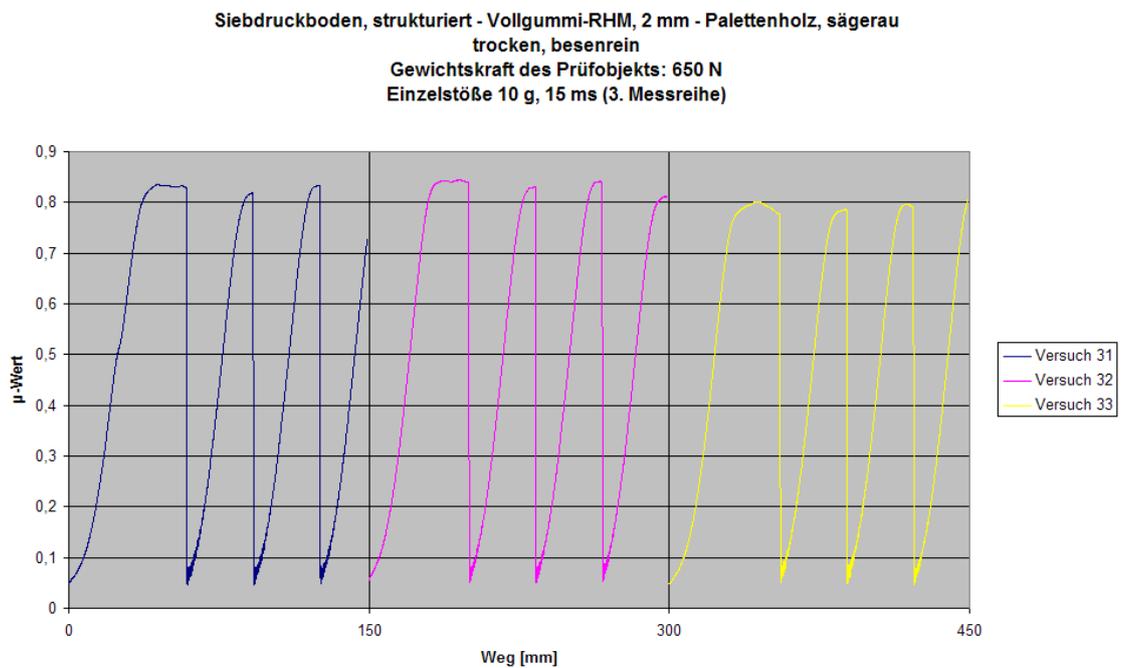


Abbildung 3-6: Messschrieb des Reibbeiwertes eines Vollgummi-RHM bei Einzelstößen

Die Abbildung 3-6 stellt den Messschrieb einer Prüfung dar, bei dem wie zuvor vertikal abwärtsgerichtete Einzelstöße mit einer Amplitude von 10 g und einer Stoßdauer von 15 ms in das Reibungssystem eingeleitet wurden.

Hier ist ein weitgehend identisches Verhalten wie bei den weichen, schaumstoffbeschichteten ARM festzustellen.

Die Abbildung 3-7 zeigt, dass die Reibungskräfte bzw. Reibbeiwerte dieser Reibungskombination bei einer dynamischen Schwingungsanregung gemäß ASTM 4728 /ASTM4728/ nicht quantifiziert werden können, da die momentanen Reibungskräfte unmittelbar von den vertikal wirksamen Druck- oder Entlastungsspitzen beeinflusst werden.

Im Unterschied zu den vorausgegangenen Prüfungen ist die geringere Dämpfungswirkung der vergleichsweise harten, formfesten Vollgummi-ARM mit einem kleineren Reibungsniveau zu erkennen (vgl. Abbildung 3-4).

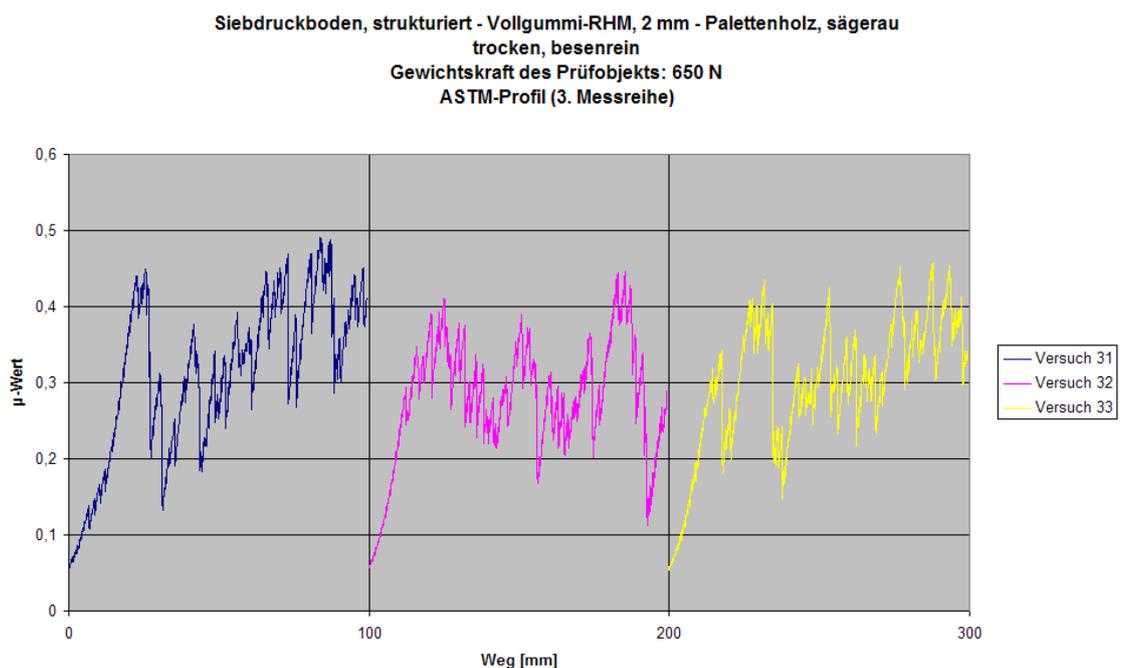


Abbildung 3-7: Messschrieb des Reibbeiwertes eines Vollgummi-RHM bei Schwingungsbelastung

4. Reibungskräfte bei niedergezurrten Ladegütern

4.1. Versuchsaufbau für die stationäre Ermittlung von Reibbeiwerten mit niedergezurrten Ladegütern

Für diese Untersuchungen ist ein Stellzylinder eingesetzt worden, der eine gleichförmige Zug- oder Druckbewegung mit einer definierten maximalen Verschiebekraft ermöglicht. (vgl. Abbildung 4-1).

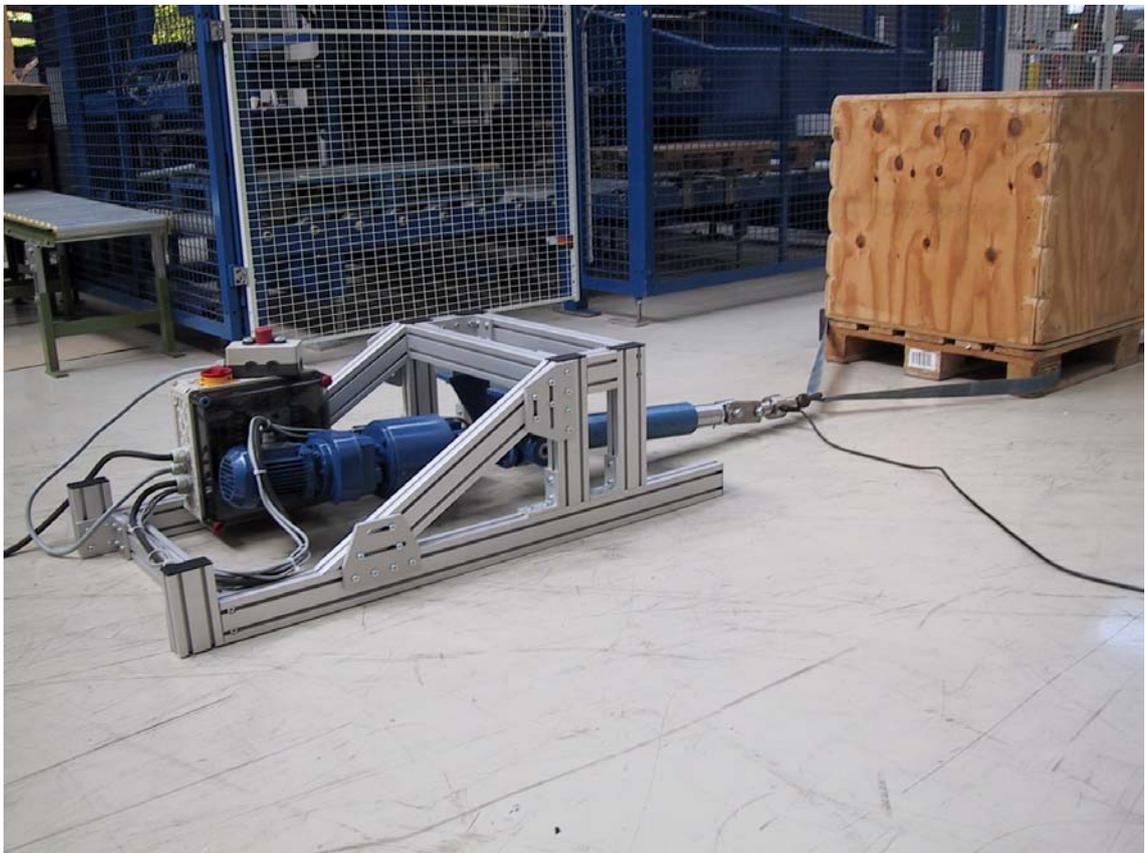


Abbildung 4-1: Mobiler Prüfstand zur Ermittlung von mit originalen und original-ähnlichen Prüfobjekten

Der Zylinderkolben wurde mit dem zu prüfenden Ladegut gekoppelt, so dass sowohl Zug- als auch Druckvorgänge ausgeführt werden konnten. Ein tief liegender Kraftangriffspunkt am Ladegut verhinderte eine Verfälschung der Messergebnisse aufgrund

von Drehmomenten. Es war grundsätzlich gewährleistet, dass ein weitgehend axiales Kräftesystem gegeben war.

Die Kraftmessung erfolgte über kalibrierte Messaufnehmer, deren Erfassungsbereich auf die jeweilige Aufgabenstellung angepasst wurde.

Die grafische Darstellung der Messkurven sowie die weitere Auswertung erfolgte mit einer Prüfsoftware, die sowohl die gemessenen Reibungskraftverläufe als auch die umgerechneten Reibbeiwerte dokumentieren konnte.

Die Messeinrichtung wird vor der Schwingprüfeinrichtung rutschfest positioniert.

Die Prüfobjekte/Ladegüter wurden mit dem Kopf des Stellzylinders möglichst spielfrei verbunden.

Für jeden Messdurchgang erfolgte eine Neupositionierung des Prüfkörpers, so dass ein Einfluss von Materialverschleiß auf die Messergebnisse ausgeschlossen werden kann.

Die Dokumentation der Prüfparameter und der Messergebnisse erfolgte über einen angeschlossenen Personal Computer in der Form von grafischen Kraft-Weg-Diagrammen.

Die Versuchsdurchführung erfolgte bei dem zuvor erwähnten Umgebungsklima.

Bei diesen Untersuchungen gelangen originale Reibungspartner im gebrauchten Zustand, d. h. mit eindeutigen Gebrauchsspuren, zum Einsatz.

Die Messung der Zug-, Druck- bzw. Reibungskräfte sowie die Darstellung der Kraftverläufe bzw. die Darstellung der umgerechneten Reibbeiwerte erfolgten wie schon zuvor beschrieben.

4.2. Versuchsdurchführung für die Ermittlung von Reibbeiwerten mit niedergezurrten Ladegütern

Für die anstehenden Prüfungen wurden palettierte Ladeeinheiten mit Europaletten als Ladungsträger eingesetzt, deren Palettenbesatz aus einer vergleichsweise formstabilen Holzkiste bestand. Damit konnte sichergestellt werden, dass die erforderlichen Zurrkräfte in vollem Umfang wirksam werden konnten und die Ladeinheit reibschlüssig mit der Unterlage/Ladefläche verbunden war. Eine Reduzierung der Zurrgurtspannung

gen infolge einer schrumpfenden Ladeinheit war auf diese Weise wirkungsvoll unterbunden.

Die Masse der Ladeinheiten betrug 400 kg und war mit schwingungsdämpfenden Sandsäcken gleichmäßig befüllt, so dass auch diesbezüglich das reale Verhalten vieler Ladegüter abgebildet worden ist.

Jede Ladeinheit wurde sowohl in gänzlich ungesichertem als auch in sachgerecht niedergezurrter Zustand einer ziehenden Belastung ausgesetzt.

Die Berechnung der Mindest-Vorspannkraft im Zurrmittel erfolgte nach den aktuellen Regelwerken /EN 12195/, /VDI2700/:

Gewichtskraft der Ladeinheit:	$F_G = G = 4000 \text{ N} = 400 \text{ daN}$
Überspannungen:	$n = 2$
Längenverhältnis:	$L_i/L_{iv} = 1070 \text{ mm} / 1050 \text{ mm} \sim 1,02$
Beschleunigungsfaktor:	$a = f = 8 \text{ m/s}^2 = 0,8 \text{ g}$
Gleitreibbeiwert:	$\mu_{Gmin} = 0,18$
Mindest-Vorspannkraft:	$F_{zi} = Z_i = 3513 \text{ N} \sim 350 \text{ daN}$

Die gemessenen Vorspannkraft in den verwendeten Zurrgurten erreichten je nach Ratschestellung Werte zwischen 3373 und 3728 N, so dass die Ladeinheiten als ausreichend gesichert gelten konnten.

Die erste Versuchsreihe zur Ermittlung von Reibbeiwerten wurde im quasistatischen Zugversuch durchgeführt, die weiteren bei einer Schwingungsbelastung gemäß ASTM 4728 mit niedrigem und hohem Level. Dadurch konnte einerseits die Vergleichbarkeit der hier gemessenen Reibbeiwerte mit früheren Ergebnissen gewährleistet werden und andererseits die Abhängigkeit der gemessenen Reibbeiwerte von der jeweiligen dynamischen Belastung bewertet werden.

4.3. Ergebnisse: Reibungskräfte in einem ruhenden System bei un- und bei gesicherter Ladeinheit

Die Messkurven der Abbildung 4-2 zeigt auf, dass mit einem Gleitreibbeiwert von ca. $\mu_{Gmin} = 0,17$ ein Ergebnis im üblichen Bereich für die Reibungskombination Siebdruckboden, strukturiert, gebraucht, trocken und besenrein und Holz-Europalette, sägerau, gebraucht und trocken, jedoch am unteren Toleranzfeld, ermittelt worden ist.

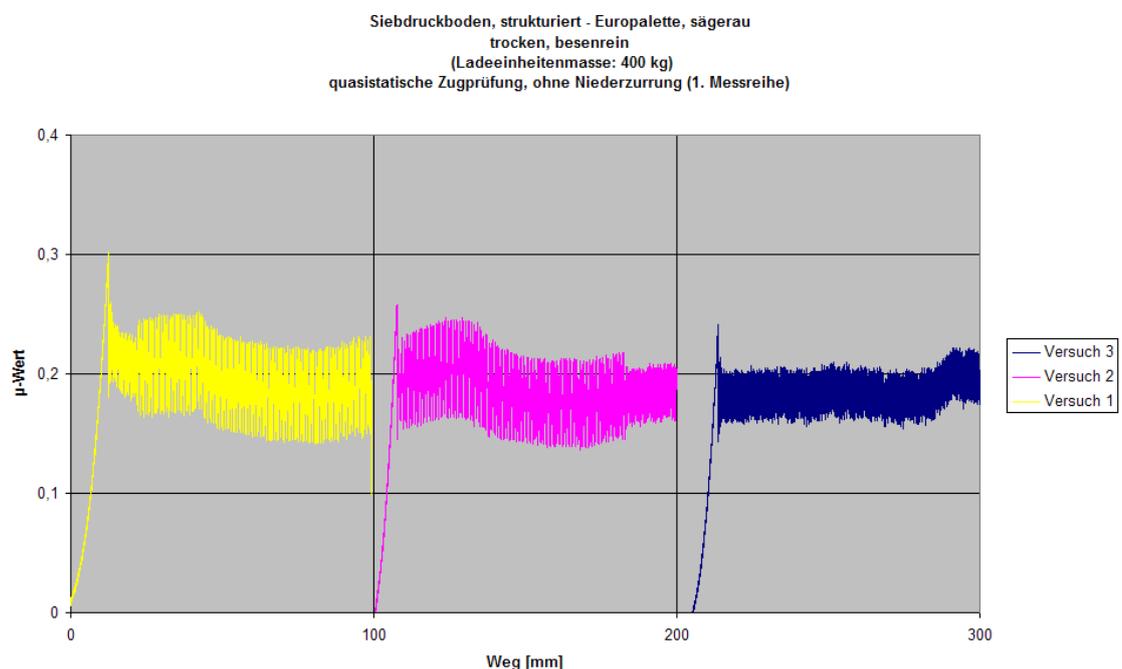


Abbildung 4-2: *Messschrieb des Reibbeiwertes einer nicht niedergezurrten, palettierten Ladeinheit im quasistatischen Zugversuch*

Die Zugkraftmessungen an der niedergezurrten Ladeinheit hat die Erwartungen jedoch nicht bestätigt.

Nach der derzeit geltenden Ladungssicherungspraxis stand zu erwarten, dass bis zu einer Zug- bzw. Reibungskraft, die dem 0,8-fachen der Gewichtskraft entspricht, keine Verschiebung der niedergezurrten Ladeinheit erfolgen sollte. Diese Erwartung wurde nicht bestätigt.

Schon bei einer Zugkraft von dem 0,4-fachen der Gewichtskraft begann die niedergezurrte Ladeinheit zu verrutschen (vgl. Abbildung 4-3). Dabei ist gleichzeitig eine kurzfristige Reduzierung der Zurrspannung im Gurt festgestellt worden.

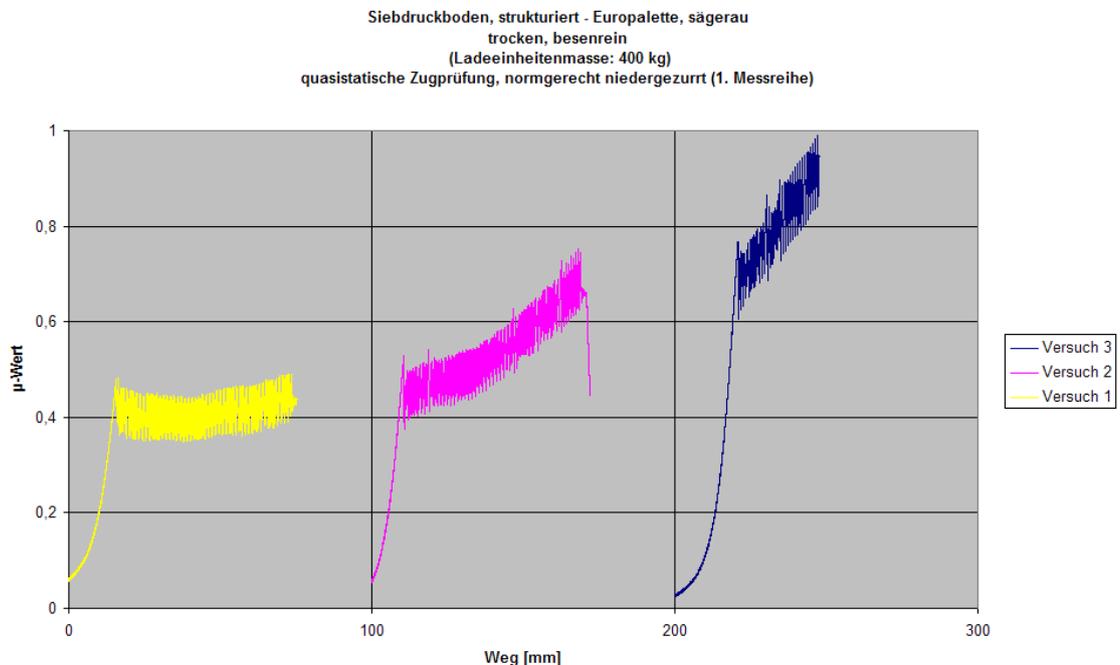


Abbildung 4-3: Messschrieb des Reibbeiwertes einer niedergezurrten, palettierten Ladeinheit im quasistatischen Zugversuch

Da der Zurrpult jedoch an den oberen Kanten der Ladeinheit rutschfest fixiert war, verspannte er sich mit fortschreitender Verschiebung der Ladeinheit und erhöhte so die effektiv wirksame Rutschhemmung. In dieser Situation wirkte der Zurrpult anteilig sowohl kraft- als auch formschlüssig.

Es ist somit festzustellen, dass trotz der vorgabegerechten Niederzurrung Einflüsse wirksam sind, die einer sicheren Ladungssicherung entgegenstehen. Als ursächlich können einerseits geringfügige Setzvorgänge in den Kontaktflächen der Ladeinheit zur Unterlage als auch ggf. zwischen Ladungsträger und palettierter Holzkiste angesehen werden und andererseits die im Zurrpult vorhandene Dehnbarkeit unter zunehmender Beanspruchung.

4.4. Reibungskräfte in einem schwingenden System (0,25 g_{rpm}) bei un- und bei gesicherter Ladeinheit

Vor dem Hintergrund der bisher vorgestellten Ergebnisse entsprechen die in der Abbildung 4-4 dargestellten Messkurven einer nicht niedergezurrten Ladeinheit dem erwarteten Ergebnis: kleine, nicht quantifizierbare Reibbeiwerte unter einer schwachen dynamischen Schwingungsbeanspruchung.

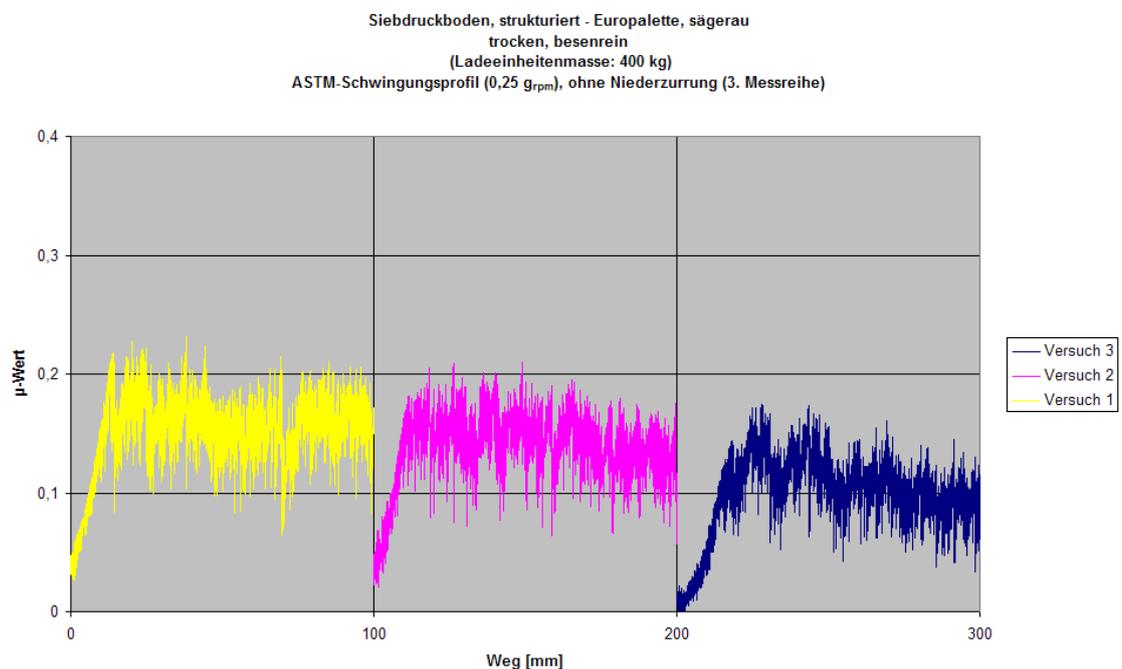


Abbildung 4-4: *Messschrieb des Reibbeiwertes einer nicht niedergezurrten, palettierten Ladeinheit bei Schwingungsbelastung (0,25 g_{rpm})*

Sinngemäß das Gleiche gilt auch für die Zugkraftmessungen gemäß der Abbildung 4-5 bei der niedergezurrten Ladeinheit. (Hier ist in der zweiten Messkurve zudem deutlich eine Unstetigkeit zu erkennen, die auf ein ruckartiges Durchrutschen der Ladeinheit unter den gespannten Zurrgurten zurückzuführen ist.)

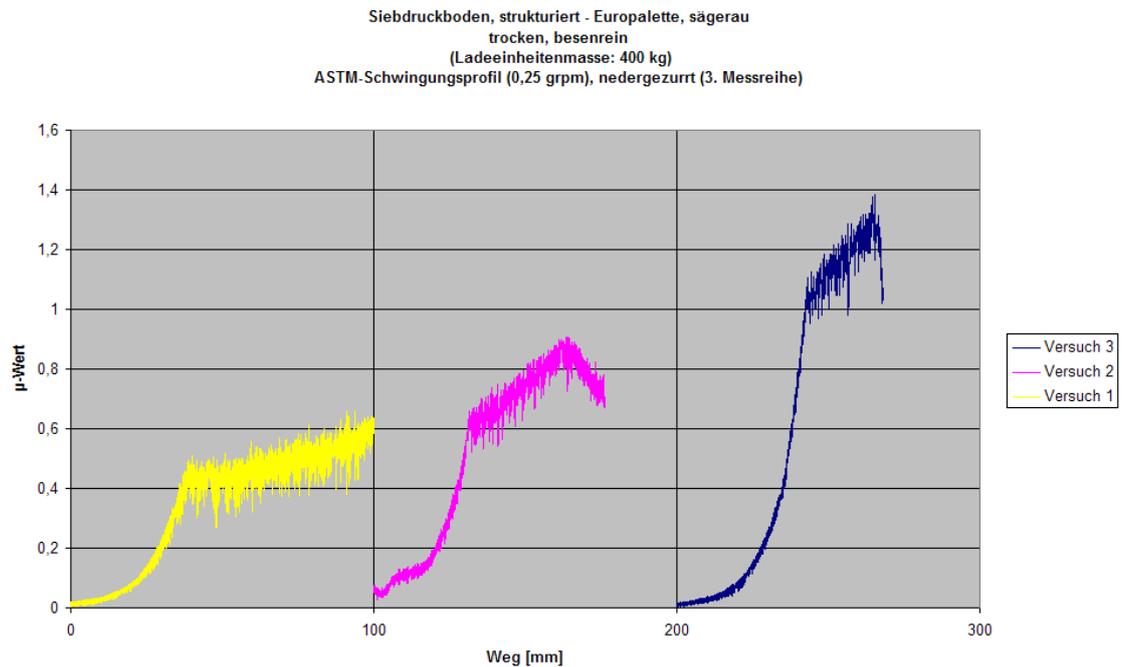


Abbildung 4-5: Messschrieb des Reibbeiwertes einer niedergezurrtten, palettierten Ladeinheit bei Schwingungsbelastung (0,25 grpm)

4.5. Reibungskräfte in einem schwingenden System (0,25 grpm) bei un- und bei gesicherter Ladeinheit

Bei einer heftigen Schwingungsbelastung, die dem schnellen Durchfahren einer schlechten Wegstrecke entspricht, reduzieren sich die effektiv wirksamen Reibungs- bzw. Zugkräfte sowohl im ungesicherten als auch im niedergezurrtten Zustand der Ladeinheit auf ein Minimum (vgl. Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7).

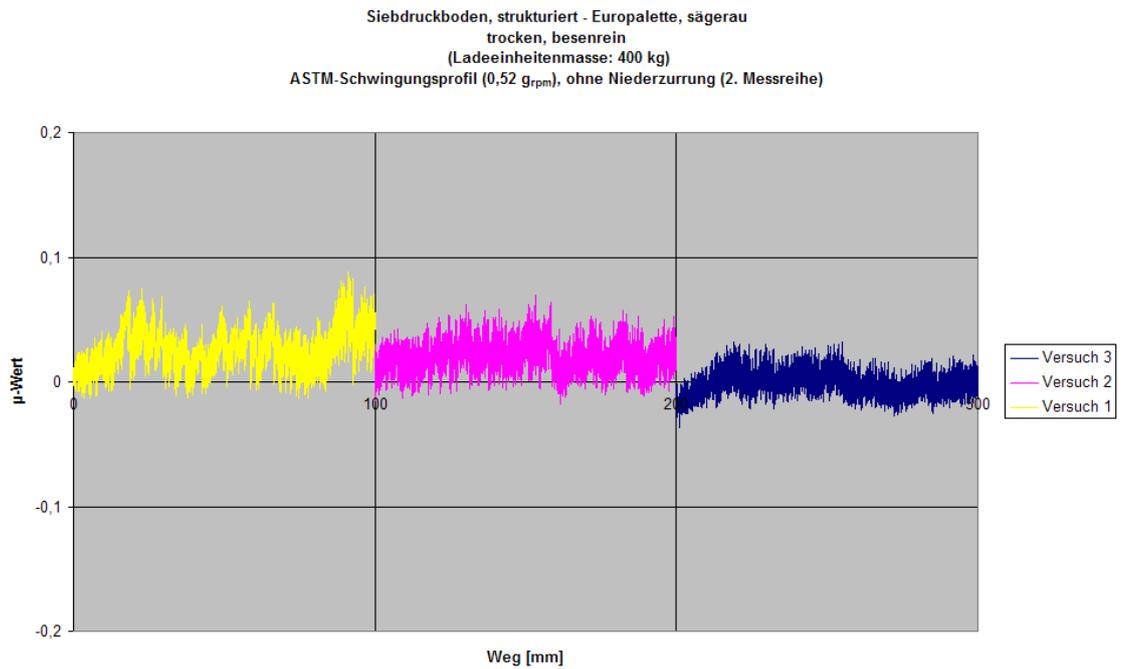


Abbildung 4-6: Messschrieb des Reibbeiwertes einer nicht niedergezurrten, palettier-ten Ladeinheit bei Schwingungsbelastung (0,25 grpm)

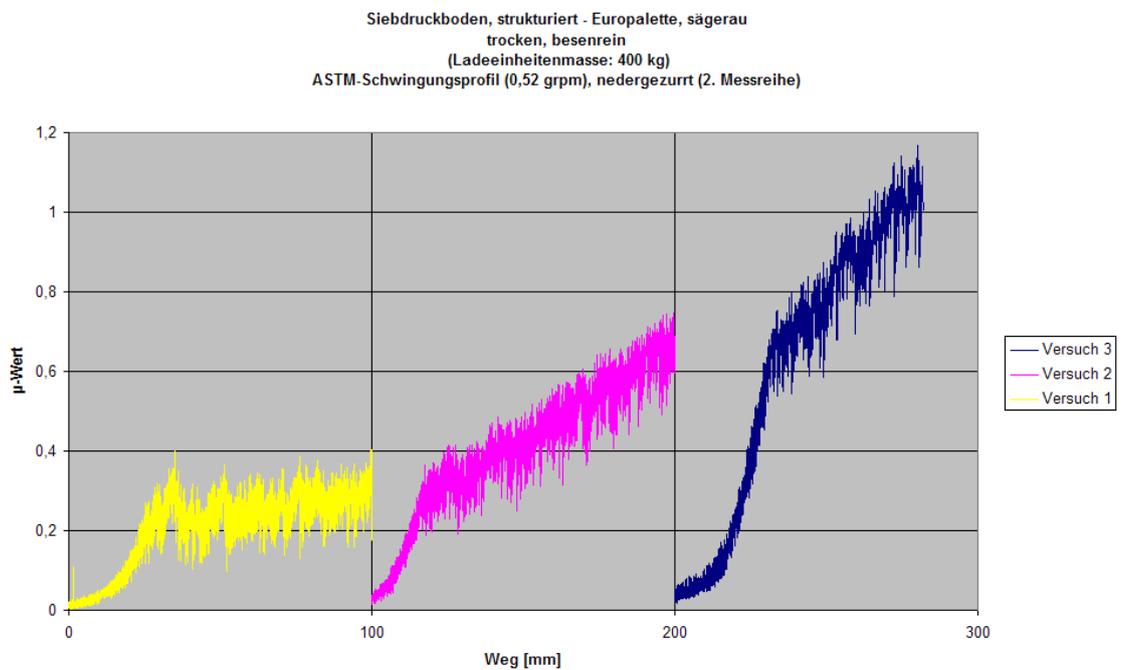


Abbildung 4-7: Messschrieb des Reibbeiwertes einer niedergezurrtten, palettierten Ladeinheit bei Schwingungsbelastung (0,52 g_{rpm})

5. Zulässigkeit von vereinfachten Berechnungsansätzen

In der Richtlinie VDI 2700 als dem relevanten technischen Regelwerk für die Ladungssicherung wird dem derzeitigen Kenntnisstand bzgl. der für die Ladungssicherung relevanten Reibungsmechanismen insoweit Rechnung getragen, dass für die Berechnung von Ladungssicherungsmaßnahmen nicht der Haftreibbeiwert, sondern der Gleitreibbeiwert eingesetzt werden muss.

Diese Vorgabe hat sich in den durchgeführten Untersuchungen als unbedingt einzuhaltende Mindestvorgabe herausgestellt. Aufgrund der Tatsache, dass nahezu alle realen Objekte, sowohl die Ladeflächen der Transportfahrzeuge als auch die zu sichernden Ladegüter und die nutzbaren Ladungssicherungsmittel, als dehnbare und verformbare Gegenstände zu betrachten sind, können minimale Bewegungsvorgänge aufgrund von Trägheitskräften grundsätzlich nicht verhindert werden; geringfügige Gleit-, Rutsch- oder Wandervorgänge sind dann vorhanden. Damit ist der Grenzfall der Haftreibung, der absoluten Fixierung bei Beschleunigungs- oder Verzögerungsvorgängen eindeutig überschritten. Zur Berechnung von Reibungskräften zur Auslegung von Ladungssicherungsmaßnahmen müssen vor diesem Hintergrund die Gleitreibbeiwerte herangezogen werden.

Darüber hinaus haben alle diesbezüglich durchgeführten Prüfungen aufgezeigt, dass Reibungskräfte, die in den üblichen quasistatischen Untersuchungen ermittelt worden sind, beim Einwirken von dynamischen Stoß- oder Schwingungbelastungen gravierend unterschritten worden sind. Vor diesem Hintergrund kann die Forderung der Richtlinie VDI 2700, im Zweifelsfall, also beim Vorliegen unterschiedlicher Reibbeiwerte für vergleichbare Reibungskombinationen, ausschließlich den kleinsten Gleitreibbeiwert zu verwenden, nur als absolute Minimalforderung bewertet werden.

Weiterhin ist es dringend zu empfehlen, die Übertragbarkeit von Reibbeiwerten auf den jeweiligen Anwendungsfall nachweislich zu überprüfen und zu dokumentieren, da bspw. schon unterschiedliche Abmessungen der Standflächen insbesondere von veränderbaren Materialien bei ansonsten gleichen Rahmenbedingungen zu unterschiedlichen Reibbeiwerten führen.

6. Literatur

6.1. Fachbücher

- /BACH98/ Bachmann, Th.; Wechselwirkungen im Prozess der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn; Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt; Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Nr. 360; VDI Verlag, Düsseldorf, 1998, ISBN 3-18-336012-8
- /BIER05/ Biermann, N.; Antirutschmatten für die Ladungssicherung; Schriftenreihe Transport- und Verpackungslogistik, Forschungsberichte und Fachbeiträge; Band 65; Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. R. Jansen; Deutscher Fachverlag GmbH, Frankfurt am Main (2005); ISBN 3-86641-030-1
- /BIER01/ Biermann, N.; Ermittlung der Reibbeiwerte von Materialpaarungen im Hinblick auf die Gewährleistung einer anforderungsgerechten Ladungssicherung; Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V; AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 12292N (2001)
- /BOEH88/ Böhm, J. M.; Eine inkrementelle Formulierung für Festkörperkontakt mit Reibung; Dissertation: Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1988
- /FREE98/ Freek, J., Süsselbeck, G.; Ladungssicherung im Container; Landsberg/Lech (1998)
- /NIEH77/ Niehues, H.; Schwingungsverhalten von Kraftfahrzeugen unter Berücksichtigung von Zusatzmassen, Reibung und Aufbauelastizität; Dissertation: Fakultät Maschinenbau und Elektrotechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 1977
- /SCIB94/ Sciba, R., Scheil, M., Windhövel, U.; Vergleichsuntersuchungen zur instationären Reibzahlmessung auf Fußböden; Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz – Forschung – Fb 701; (Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz); Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven, 1994; ISBN 3-89429-448-5
- /SIMO74/ Simons, J. und James, D. ; The Nature of Friction; SAE preprints 437, A. 74, pp. 2

/WINK96/ Winkler, G.; Transporteignungsprüfungen: Prüfmethode, -einrichtung und Spezifikation; VVL-Seminar: Simulation von Transportbelastungen, Dortmund (1996)

6.2. Fachzeitschriften

/ARND99/ Arndt, E.-H.; Die Physik will es so: Ladungssicherung in Kleintransportern sind ein „Muss“; In: Fracht + Materialfluss FM 5/99, Seite 64, 65

/BIER01-04/ Biermann, N.; Sicher mit Ladungssicherung: Transportsicherung in der Distributionskette – wer kümmert sich darum? In: Fracht und Materialfluss 5/2001, Seite 60 - 61

/BIER01-03/ Biermann, N.; Reibungskräfte: ihre Bedeutung in der Transportsicherung – Teil 2; In: Distribution 5/2001, Seite 36 - 37

/BIER01-02/ Biermann, N.; Reibungskräfte: ihre Bedeutung in der Transportsicherung – Teil 1; In: Distribution 4/2001, Seite 49 - 52

/BIER01-01/ Biermann, N.; Faktoren für die Ladungssicherung – Qualitätsmerkmale von Kunststofffolien beim Schrumpfen und Stretchen; In: PackReport 5/2001

/BIER00-02/ Biermann, N.; Monsieur Coulomb und die Ladungssicherung: Was hat die Ladungssicherung mit der Reibung zu tun? In: PackReport 12/2000, Seite 67 - 70

/BIER00-01/ Biermann, N.; Schwergewicht: sicher und standfest: Wie sicher stehen Ladegüter auf der Ladefläche? In: PackReport 9/2000, Seite 77 - 80

/ESCH90/ Eschke, K.-R., Ewe, H. Petzoldt, J. D., Szymcczak, P., Zhang, X.; Haftreibung beim Transport: Ladungssicherung – doch ein Thema? In: Neue Verpackung 9/90

/TROS98/ Trost, Th.; Source reduction by European Testing Schedules: Identification of Damage Including Mechanism; Bcr information European Commission, 1998

6.3. Normen und Richtlinien

- /ASTM999/ ASTM D 999; Standard Methods for Vibration Testing of Shipping Containers; Beuth Verlag GmbH; Berlin, 2001
- /ASTM4169/ ASTM D 4169 ; Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001
- /ASTM4728/ ASTM D 4728 ; Standard Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Containers; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001
- /CTU99/ CTU-Packrichtlinien; Richtlinien für das Packen von Ladung außer Schüttgut in oder auf Beförderungseinheiten (CTUs) bei Beförderung mit allen Verkehrsträgern zu Wasser und zu Lande; Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen; Abteilung Luft- und Raumfahrt, Schifffahrt; Verkehrsblatt – Dokument Nr. B 8087 – Vers. 02/99; Verkehrsblatt – Verlag Borgmann, Dortmund (1999)
- /DIN30781/ DIN 30 781-1 und –2; Transportkette
Teil 1: Grundbegriffe
Teil 2: Systematik der Transportmittel und Transportwege
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1989
- /DIN30782/ DIN 30782-E
Teil 1: Transportbelastungen - Grundlagen und Übersicht über die Normenstruktur
Teil 2: Transportbeanspruchung; Mechanisch-dynamische Beanspruchung; Schwingungen und Stoßbelastungen beim Straßentransport
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1996
- /DIN30786/ DIN 30786; Transportbelastungen; Mechanisch-dynamische Belastungen
Teil 1: Grundlagen, 1993
Teil 2: Schwingungen und Stoßbelastungen bei Straßentransport, 1986
Beuth Verlag GmbH, Berlin,

- /DIN30786E/ DIN 30786
Teil 1 (Entwurf); Datensammlung von Transportbelastungen:
Mechanisch-dynamische Belastungen
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001
- /DIN30787/ DIN 30787; Transportbelastungen: Mechanisch-dynamische
Belastungen: Messen und Auswerten
Teil 2: Datenerfassung und allgemeine Anforderungen an Messein-
richtungen;
Teil 3: Datengültigkeitsüberprüfung und Datenaufbereitung für die
Auswertung;
Teil 6: Transportüberwachung mit automatischen Aufzeichnungsge-
räten zur Messung stochastisch auftretender Stöße
Beuth verlag GmbH, Berlin, 1998
- /DIN55350/ DIN 55350; Begriffe zu Qualitätsmanagement und Statistik
Teil 11: Begriffe des Qualitätsmanagements
Teil 12: Merkmalsbezogene Begriffe
Teil 13: Begriffe zu Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und
Ermittlungsergebnissen
Teil 14: Begriffe der Probenahme
Teil 15: Begriffe zu Mustern
Teil 16: Begriffe der Qualitätssicherung – Begriffe zu Qualitäts-
sicherungssystemen (Entwurf)
Teil 17: Begriffe der Qualitätsprüfungsarten
Teil 18: Begriffe zu Bescheinigungen über die Ergebnisse von
Qualitätsprüfungen – Qualitätsprüf-Zertifikate
Teil 21: Begriffe der Statistik – Zufallsgrößen und Wahrscheinlich-
keitsverteilungen
Teil 22: Begriffe der Statistik – Spezielle Wahrscheinlich-
keitsverteilungen
Teil 23: Begriffe der Statistik – Beschreibende Statistik
Teil 24: Begriffe der Statistik – Schließende Statistik
Teil 31: Begriffe der Annahmestichprobenprüfung
Teil 33: Begriffe der statistischen Prozesslenkung (SPC)
Teil 34: Erkennungsgrenze, Erfassungsgrenze und Erfassungsver-
mögen
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995

- /DIN70010/ DIN 70010 (Entwurf); Systematik der Straßenfahrzeuge: Begriffe für Kraftfahrzeuge, Fahrzeugkombinationen und Anhängfahrzeuge; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1999
- /EN12195/ DIN EN 12195; Sicherheit
Teil 1 (Entwurf): Ladungssicherungseinrichtungen: Berechnung von Zurrkräften, 1996
Teil 2: Ladungssicherungseinrichtungen auf Straßenfahrzeugen: Zurrgurte aus Chemiefasern, 2001
Teil 3: Ladungssicherungseinrichtungen auf Straßenfahrzeugen: Zurrketten, 2001
Teil 4 (Entwurf): Ladungssicherungseinrichtungen auf Straßenfahrzeugen: Zurrdrahtseile, 2002
- /EN22244/ DIN EN 22244; Versandfertige Packstücke: Verpackung: Horizontale Stoßprüfung (waagerechte oder schiefe Ebene: Pendel)
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1993
- /EN22247/ DIN EN 22247; Versandfertige Packstücke: Verpackung: Schwingprüfung mit niedriger Festfrequenz
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1993
- /EN28318/ DIN EN 28318; Verpackung: Versandfertige Packstücke: Schwingprüfung mit variabler sinusförmiger Frequenz; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1993
- /EN60068/ DIN EN 60068; Umweltprüfungen
Teil 2: Prüfungen; Prüfung Fe: Schwingen – Sinusimpulse
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995
- /ISO830/ DIN EN 28318; Verpackung. Versandfertige Packstücke: Schwingprüfung mit variabler sinusförmiger Frequenz (ISO 8318:1986)
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1993
- /ISO2233/ DIN EN ISO 2233; Verpackung: Versandfertige Packstücke: Klimatische Vorbehandlung für die Prüfung; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001
- /ISO2244/ DIN EN ISO 2244; Verpackung: Versandfertige Packstücke und Ladeinheiten: Horizontale Stoßprüfung; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2002

- /ISO2247/ DIN EN ISO 2247; Verpackung: Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten: Schwingprüfung mit niedriger Festfrequenz; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2002
- /ISO8002/ DIN ISO 8002; Landfahrzeuge: Mechanische Schwingungen: Verfahren zur Darstellung von Messdaten; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995
- /ISO8318/ DIN ISO 8318; Verpackung: Versandfertige Packstücke: Schwingungsprüfung mit variabler sinusförmiger Frequenz; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1989
- /VDI2490/ VDI 2490; Verpackung, Transport und Lagerung von Material; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995
- /VDI2700/ VDI 2700; Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen, 2004
Blatt 2: Zurrkräfte, 2002
Blatt 3.1: Gebrauchsanleitung für Zurrmittel, 2006
Blatt 3.2: Einrichtungen und Hilfsmittel zur Ladungssicherung, 2006
Blatt 4: Lastverteilungsplan,
Blatt 5: Qualitätsmanagementsysteme, 2001
Blatt 6: Zusammenladung von Stückgütern, 2006
Blatt 7: Ladungssicherung im Kombinierten Verkehr, 2000
Beuth Verlag GmbH, Berlin
- /VDI3968/ VDI 3968; Sicherung von Ladeeinheiten;
Blatt 1: Anforderungsprofil, 1994
Blatt 2: Organisatorisch-technische Verfahren, 1994
Blatt 3: Umreifen, 1994
Blatt 4: Schrumpfen, 1994
Blatt 5: Stretchen, 1994
Blatt 5E: Stretchen (Entwurf), 2007
Blatt 6: Sonstige Verfahren, 1994
Beuth Verlag GmbH, Berlin

6.4. Literatur im Internet

- /DB02/ Deutsche Bahn AG; Kombiniertes Verkehr; URL:
http://bahn.de/konzern/gv/kombiverkehr/die_bahn_internatkv.shtml
(Stand 09.04.2002)
- /EXPO01/ Transport- und Lagerbeanspruchung; URL:
www.exportverpackung.de/wissenswertes/beanspruchung/mechanik.html
(Stand: 07.12.2001)
- /GDV07-01/ Schieder, U.; GDV-Kontrollen decken auf: Schlamperei mit der Lkw-Ladung ist immer noch an der Tagesordnung – Europäische Regelungen notwendig – über 500 Millionen Mark pro Jahr an Schäden; Veranstaltungsarchiv: Presseforum Schaden und Unfall 2001; URL:
<http://www.gdv.de> (Stand 22.01.2007)
- /GDV07-02/ Gwehenberger, J., Schieder, U.; GDV; Arbeitskreis Unfall-Risiko Lkw; Veranstaltungsarchiv: 40. Deutscher Verkehrsgerichtstag 2002; URL:
<http://www.gdv.de> (Stand 22.01.2007)
- /STAT02/ Statistisches Bundesamt; Lkw dominiert im Güterverkehr; URL:
<http://www.destatis.de/presse/deutsch/pm2000/p3310191.htm> (Stand: 10.04.2002)
- /STVO06/ Straßenverkehrsordnung StVO § 22 „Ladung“; Bundesministerium der Justiz: URL: http://www.gesetze-im-internet.de/stvo/_22.html (Stand 06.06.2007)