- Ergebnisbericht -

(Kurzfassung)

Das Forschungsvorhaben AiF-FV-Nr.: 14008 N (AiF-Antrags-Nr.: 03246/03 N)

wurde aus Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit

über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigung e.V.

Otto von Guericke

gefördert

und im Auftrag der

Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e. V. (GVB) durchgeführt.

Ermittlung von Kriterien zur Beurteilung von Antirutschmatten für die Ladungssicherung und Erarbeitung geeigneter Prüfverfahren

von

Dipl.-Ing. N. Biermann

Dortmund, 15.Juli 2005

FLog

Universität Dortmund * Fakultät Maschinenbau

Fachgebiet Logistik * Prof. Dr.-Ing. R. Jansen

Leonhard-Euler-Straße 5 * 44227 Dortmund * Tel.: 0231 / 755-5700

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

2. Bedeutung der Reibung für die Ladungssicherung 3

2.1. Definition von Reibungsbegriffen 3

2.2. Berechnung von Reibungskräften für die Ladungssicherung 4

2.2.1. Gewichtskraft des Ladegutes 4

2.2.2. Massen-/Trägheitskraft des Ladegutes 4

2.2.3. Reibungskraft des Ladegutes 5

2.2.4. Sicherungskraft zur Ladungssicherung 5

2.3. Rahmenbedingungen zur Berechnung von ladungssicherungsrelevanten Reibungskräften 6

3. Rutschhemmende Materialien für die Ladungssicherung 11

3.1. Klassifizierung gängiger Antirutschmatten 11

3.1.1. Antirutschmatten aus Gummigranulat 11

3.1.2. Antirutschmatten aus Vollgummi 13

3.1.3. Antirutschmatten aus Polyurethan 14

3.1.4. Schaumstoffbeschichtete Gewebe-Antirutschmatten 14

3.1.5. Klebstoffbeschichtete beschichtete Gewebe-Antirutschmatten 16

3.1.6. Klebstoffbeschichtete und -getränkte Faser-Antirutschmatten (Filz-ARM) 16

3.1.7. Rutschhemmend beschichtete Vollpappen und Papiere 17

3.1.8. Rutschhemmend beschichtete Wellpappe und Pappe mit innenliegendem Trägermaterial aus Kunststoffen 18

3.1.9. Rutschhemmend beschichtete Bodenbeläge 19

3.2. Rohstoffe zur Herstellung von Antirutschmatten 19

3.2.1. Kunststoff 19
3.2.2. Kautschuk 21
3.2.3. Gummi 21
3.3. Ladungssicherungsrelevanten Eigenschaften von Antirutschmatten 22
3.3.1. Reibungskennwerte (Haft- und Gleitreibbeiwert) 22
3.3.2. Kennwerte einer ziehenden Beanspruchung 23
3.3.3. Kennwerte einer scherenden Beanspruchung 24
3.3.4. Kennwerte einer drückenden Beanspruchung 24
3.3.5. Verschleiß- /Abriebsverhalten 25
3.3.6. Alterungsverhalten 25

4. Reibungstheorie für elastisch nachgiebige und dynamische Reibungssysteme 27
4.1. Reibungstheorie der Festkörperreibung 27
4.2. Reibungstheorie für elastisch nachgiebige Reibungssysteme 29
4.3. Reibungstheorie für dynamische Systeme 32

5. Empirische Ermittlung von Qualitätsmerkmalen 33
5.1. Ermittlung von Reibbeiwerten 33
5.2. Ermittlung flächenpressungsspezifischer Reibbeiwerte 37
5.3. Bestimmung der Temperaturabhängigkeit von Reibbeiwerten 38
5.4. Ermittlung von Zugfestigkeitskennwerten 40
5.5. Ermittlung des Verschleiß-/Abriebsverhaltens 42
5.6. Ermittlung von Kennwerten für die chemische Beständigkeit gegenüber ausgewählten Betriebsstoffen 45
5.7. Ermittlung von Reibbeiwerten in dynamischen Systemen 52

6. Zusammenfassung und Ausblick 55

1. Einleitung

Vor dem Hintergrund einer effizienten Gestaltung von Logistik-Prozessen müssen insbesondere die distributionsspezifischen Kosten verstärkt betrachtet werden. Aber auch unter hohem Kostendruck oder unter der umweltpolitischen Zielsetzung der Abfallvermeidung, -verringerung bzw. umweltgerechten Verwertung darf die originäre Aufgabe und Bedeutung der Verpackung zum Schutz der Produkte auf dem gesamten Weg vom Versender bis zum Empfänger sowie die sichere Transportabwicklung nicht vernachlässigt werden.

Ein Ansatz zur Optimierung der Verpackungslogistik analysiert die sichere Versendung von Gütern und konzentriert sich dabei auf den Bereich der Ladungssicherung zum Schutz der Produkte und zur Reduzierung von Unfällen.

Eine entscheidende Rolle nehmen bei der Sicherung von Ladegütern die Reibungskräfte ein, die über ihre Reibwirkung mit dazu beitragen, Güter auf dem Fahrzeug zu sichern, und die durch den Einsatz von rutschhemmenden Materialien optimiert werden können. Da grundsätzlich beim Kontakt zweier Körper – dem Ladegut einerseits und der Ladefläche andererseits – Reibung auftritt, deren Kennwert bzw. Reibbeiwert μ von den jeweiligen Oberflächeneigenschaften der Reibungspartner bestimmt wird, damit als materialpaarungsspezifische Konstante gegeben ist und nicht ad hoc geändert werden kann, stellt sich die Frage, wie die Reibungskennwerte bzw. die Reibbeiwerte optimiert werden können.

Das kann grundsätzlich durch rutschhemmende Materialien geschehen, die zwischen dem eigentlichen Ladegut und der ursprünglichen Ladefläche eingebracht werden. Aus diesem Grunde ist der Einsatz von rutschhemmenden Materialien (RHM), bevorzugt von Antirutschmatten (ARM), gängige Praxis bei der korrekten Ladungssicherung. Es zeigt sich jedoch, dass gerade der Einsatz von ARM aufgrund vielfältiger Einflüsse nicht einfach ist. In der Regel werden ARM jedoch nahezu ausschließlich mit ihrem Reibbeiwert beworben, wobei die Möglichkeit zur Reduzierung ergänzender Sicherungsmittel in den Vordergrund gestellt wird. Nur sehr wenige Anbieter und Lieferanten von ARM sind derzeit bereit und in der Lage, zuverlässige und nachprüfbare Kennwerte zu ihren ARM zu veröffentlichen.

Darüber hinaus fehlen jedoch derzeit verlässliche Informationen zur umfassenden Bewertung der ARM-Qualität sowie geeignete Prüfverfahren zur Ermittlung derartiger Kennwerte. Zum Nutzen der Anwender von ARM und zum Zweck einer qualifizierten und überprüfbaren Ladungssicherung ist jedoch eine Festlegung geeigneter Kennwerte für ARM unumgänglich.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist deshalb die Ermittlung von Kriterien zur Beurteilung von Antirutschmatten für die Ladungssicherung, die durch die Formulierung bzw. die Auswahl von geeigneten Prüfverfahren sowie durch die Beschreibung von praxisgerechten Anwendungsempfehlungen ergänzt wird.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Forschungsarbeit fließen zudem in das VDI-Richtlinienwerk – insbesondere die Richtlinie VDI 2700 Bl. 14 „Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen - Verfahren zur Ermittlung von Reibbeiwerten“ und VDI 2700 Bl. 15 „Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Rutschhemmende Materialien“ ein. Dadurch wird der Transfer der Forschungsergebnisse in eine breit gestreute industrielle Anwendung unterstützt.

2. Bedeutung der Reibung für die Ladungssicherung

Da das Themenfeld „Rutschhemmende Materialien bzw. Antirutschmatten“ einerseits untrennbar mit dem Themenfeld „Reibung“ verbunden ist und andererseits oftmals keine klaren Kenntnisse unterschiedlicher Reibungsphänomene gegeben sind, ist es zweckmäßig, zunächst einmal die charakteristischen Reibungsbegriffe zu definieren und die Berechnung von Reibungskräften zu erläutern.

2.1. Definition von Reibungsbegriffen

Reibung ist nach DIN 53119, DIN 50320 und DIN 53375 /DIN53119, DIN 50320, DIN53375/ eine Wechselwirkung zwischen sich berührenden Stoffbereichen von Körpern, die eine Relativbewegung zwischen ihnen ver- oder behindert.

Haftreibung bzw. Ruhereibung (auch statische Reibung) liegt dann vor, sofern ein Körper unter Einwirkung einer resultierenden Kraft, die ihn gegen seine Unterlage presst, in Ruhe liegen bleibt. Sie ist der Widerstand eines Körpers gegen das Gleiten.

Gleitreibung (auch dynamische Reibung) liegt dann vor, wenn ein Körper aufgrund einer außen angreifenden Kraft auf seiner Unterlage bewegt wird und verrutscht.

Rollreibung entsteht, sobald ein zylindrischer Körper mit dem Radius r auf einer Unterlage abrollt.

Haft-Reibbeiwert bzw. Haftreibungskoeffizient ist das Grenzverhältnis der Reibungs- zur Normalkraft, bei dem ein Körper auf einer horizontalen Ebene gerade zu gleiten beginnt.

Gleit-Reibbeiwert bzw. Gleitreibungskoeffizient ist das Grenzverhältnis der Reibungs- zur Normalkraft während des Gleitens.

Reibungskraft ist die Kraft, die bei Haft- und Gleitreibung in der Kontaktfläche zwischen einem Körper und seiner Unterlage wirkt. Sie ist grundsätzlich einer Massekraft entgegengerichtet.

Normalkraft ist die zum Erdmittelpunkt gerichtete Summe aller Kräfte, mit denen ein Körper gegen seine Unterlage gepresst wird. Sie setzt sich im Allgemeinen aus der jeweiligen Gewichtskraft und der ggf. durch Zurrmittel aufgebrachten Kraft zusammen.

Massen- oder Trägheitskraft ist die Kraft, die außen an einem Körper parallel zur Reibungsfläche angreift und versucht, ihn auf seiner Unterlage zu verschieben.

2.2. Berechnung von Reibungskräften für die Ladungssicherung

2.2.1. Gewichtskraft des Ladegutes

Die Gewichtskraft F_G eines Ladegutes bzw. der gesamten Ladung errechnet sich aus der jeweiligen Masse m des einzelnen Ladegutes bzw. der Gesamtladung multipliziert mit der Erdbeschleunigung g und ist zum Erdmittelpunkt gerichtet. /VDI2700/

$$\mathbf{F_G = m \times g} \qquad \text{(Gl. 2-1)}$$

2.2.2. Massen-/Trägheitskraft des Ladegutes

Jede Ladung hat aufgrund der Massenträgheit das Bestreben, sich einer Änderung ihres Bewegungszustandes zu widersetzen. Einmal in Bewegung versetzt - Ladefläche und Ladegut bilden dabei ein relativ zueinander ruhendes System - ist die bewegte Einheit aufgrund ihrer Massenträgheit bestrebt, diese Bewegung mit unveränderter Geschwindigkeit und mit unveränderter Bewegungsrichtung beizubehalten. Diese der Beschleunigung beim Anfahren, bei Kurvenfahrt und beim Bremsen entgegen gerichtete Kraft wird als Massenkraft F bezeichnet. Die Ladung hat aufgrund ihrer Massenträgheit das Bestreben, sich relativ zur beschleunigten oder abgebremsten Ladefläche zu verschieben oder zu kippen. Der Angriffspunkt für die Massenkraft liegt im Schwerpunkt S der Ladung bzw. der Ladegüter. /VDI2700/

Massenkraft bei geradliniger Bewegung

Jedes Ladegut der Masse m erfährt bei Änderung der konstanten, geradlinigen Bewegung des Systems Ladefläche/Ladegut eine Massen- oder Trägheitskraft F, die sich aus

der Masse m des Ladegutes multipliziert mit der jeweiligen Beschleunigung a des Fahrzeugs (z. B. Beschleunigung bzw. Bremsen) errechnet und in bzw. entgegen der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs wirkt.

$$\mathbf{F = m \times a} \qquad \text{(Gl. 2-2)}$$

Der zeitliche Verlauf der auf das Ladegut einwirkenden Beschleunigung nach Größe und Richtung ergibt sich direkt aus dem Bewegungsablauf des Fahrzeuges, bezogen auf den Schwerpunkt S von Ladegut oder Ladung. /VDI2700/

Massenkraft bei nicht geradliniger Bewegung

Die Massenkraft F bei Kurvenfahrt errechnet sich aus der Masse m des Ladegutes multipliziert mit der Kurvenbeschleunigung v^2/r des Fahrzeugs, wobei v die gefahrene Geschwindigkeit und r der Kurvenradius – bezogen auf den Ladungsschwerpunkt S - ist. Diese Massenkraft ist bestrebt, die Ladung auf der Ladefläche in Richtung des Kurvenaußenrandes zu bewegen.

$$\mathbf{F = m \times v^2 / r} \qquad \text{(Gl. 2-3)}$$

2.2.3. Reibungskraft des Ladegutes

Die Reibungskraft F_R wirkt einer Verschiebung von einem einzelnen Ladegut bzw. einer gesamten Ladung aufgrund wirkender Massenkräfte entgegen und ist damit im Sinne einer Sicherungskraft wirksam. Die Reibungskraft F_R errechnet sich aus der Gewichtskraft der Ladung F_G bzw. der Normalkraft F_N multipliziert mit dem Reibbeiwert μ. /VDI2700/

$$\mathbf{F_R = \mu \times F_G} \qquad \text{(Gl. 2-4)}$$

2.2.4. Sicherungskraft zur Ladungssicherung

Um der Ladung die Möglichkeit zu nehmen, relativ zur Ladefläche in Bewegung zu geraten, ist die Ladung zu sichern. Für die Berechnung von Ladungssicherungskräften sind die Maximalwerte der Massenkräfte gemäß Richtlinie VDI 2700 „Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen“ und Richtlinie VDI 2700 Blatt 2 „Zurrkräfte“ anzusetzen.

Den Differenzbetrag zwischen Massenkraft F und wirksamer Reibungskraft F_R bezeichnet man als Sicherungskraft F_S.

$$\mathbf{F_S = F - F_R} \qquad \text{(Gl. 2-5)}$$

Die Sicherungskraft F_S ist die Kraft, die von den Sicherungsmitteln zur Sicherung der Ladegüter aufgenommen werden muss. /VDI2700/

Damit können die Rahmenbedingungen beschrieben werden, die für eine qualitative Bewertung von rutschhemmenden Materialien und für deren jeweilige Anwendungsbereiche herangezogen werden müssen.

2.3. Rahmenbedingungen zur Berechnung von ladungssicherungsrelevanten Reibungskräften

Bei der Durchführung einer geeigneten Ladungssicherung ist Reibung als Widerstandskraft gegen das Verschieben eines Körpers (Ladegut) auf seiner Unterlage (Ladefläche) bzw. zwischen einzelnen Ladegütern die entscheidende Größe (vgl. Abb. 2-1).

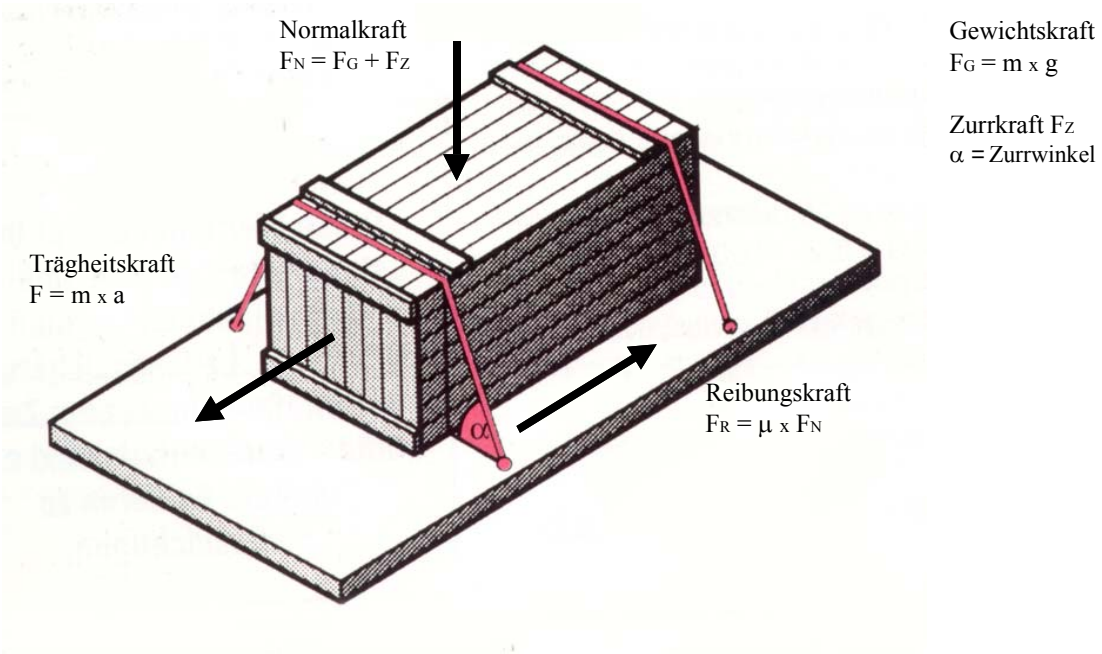


Abb. 2-1: Zusammenhang zwischen Beschleunigungs-, Reibungs- und Normalkraft bei der Ladungssicherung

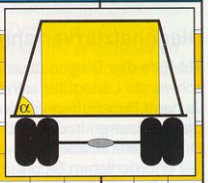
Für den Bereich der Ladungssicherung, bei der mit dem Einsatz von rutschhemmenden Materialien die Reibung zwischen Ladefläche und Ladegütern bzw. zwischen gestapelten Ladegütern und somit die erforderlichen ergänzenden Sicherungs-maßnahmen beeinflusst werden können, liegen in den verfügbaren Regel- und Richtlinienwerken keinerlei quantitative Informationen zu nutzbaren Reibbeiwerten vor. Welche Auswirkungen beispielsweise die Schwankungsbreite von Reibbeiwerten, die u. a. mit geeigneten Antirutschmatten gezielt variiert werden kann, auf die Anzahl der zu verwendenden Zurrgurte hat, verdeutlicht Abbildung 2-2:

Hier wird deutlich, dass der Reibbeiwert μ entscheidend mitbestimmt, wie groß die aufzubringende Normalkraft F_N und damit auch die Anzahl der Zurrgurte und die entsprechende Vorspannkraft sein müssen. Hierbei wird insbesondere die wirtschaftliche Bedeutung der Zugrundelegung korrekter Reibbeiwerte beim Niederzurren anschaulich dargestellt. Erst mit Vorliegen von Reibbeiwerten, die für die vorgesehenen Einsatzfelder Anwendung finden können, ist eine belastungsgerechte Ladungssicherung mit der Auswahl und Dimensionierung ergänzender Sicherungsmittel wie beispielsweise Zurrgurten möglich. Sachlich exakt definierte Reibbeiwerte sind somit Voraussetzung, um eine mangelhafte – weil unterdimensionierte – Ladungssicherung oder eine kostenintensive – weil überdimensionierte – Ladungssicherung zu vermeiden.

Tabelle Einfachmethode Niederzurren

Anzahl der erforderlichen Zurrmittel

Vorspannkraft	Gewicht der Ladung / Zurrwinkel α (°) / Reibbeiwert μ	1 to			2 to			3 to			4 to			6 to			8 to			12 to			16 to		
		35	60	90	35	60	90	35	60	90	35	60	90	35	60	90	35	60	90	35	60	90	35	60	90
250 daN	0,3	6	4	3	12	8	7	17	12	10	23	15	13	35	23	20									
	0,6	2	2	2	2	2	2	3	2	2	5	3	3	7	5	4									
500 daN	0,3	3	2	2	6	4	3	9	6	5	12	8	7	17	12	10	23	15	13						
	0,6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	5	3	3						
750 daN	0,3	2	2	2	4	3	2	6	4	3	8	5	4	12	8	7	15	10	9	23	15	13			
	0,6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	5	3	3			
1000 daN	0,3	2	2	2	3	2	2	4	3	3	6	4	3	9	6	5	12	8	7	17	12	10	23	15	13
	0,6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	5	3	3



© DOLEZYCH

Abb. 2-2: Zusammenhang zwischen Reibwert und Anzahl der zu verwendenden Zurrmittel /Dolezych/

Reibbeiwerte, deren Höhe maßgeblichen Einfluss auf die noch aufzubringenden Ladungssicherungsmaßnahmen hat, sind sehr stark abhängig von den Materialeigenschaften und dem Zustand der sich berührenden Flächen sowie von den dynamischen Belastungsprofilen des Fahrbetriebs (vgl. VDI 2700 Blatt 6 ff). Dies gilt umso mehr, als dass rutschhemmende Materialien in der Regel weiche, nachgiebige Oberflächen mit unterschiedlichen Oberflächenkonturen aufweisen. Darüber hinaus verändern gummiartige Werkstoffe ihre reibungsrelevanten Eigenschaften sehr stark in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtigkeit.

Aufgrund sicherheits-, aber auch kostenrelevanter Aspekte sind für die Ladungssicherung gerade die für eine anforderungsgerecht optimierte Auslegung geeigneter Mittel relevanten Faktoren detailliert zu beachten. Eine solche detaillierte Betrachtung muss sich auf die Wirkmechanismen konzentrieren, die in dem Kontaktbereich der beteiligten Reibungspartner relevant sind.

Umfangreiche Untersuchungen bestätigen somit, dass die Reibung bzw. der Reibungskoeffizient eine Funktion vieler Variabler ist:

$$\mu = f(x_1, x_2, x_3, ..., x_n). \qquad \text{(Gl. 2-6)}$$

Zu diesen Variablen zählen beispielsweise:

- die Oberflächenrauhigkeiten von Ladegut und Ladefläche,
- die Welligkeit bzw. Profilierung der Oberflächen von Ladegut- und Ladefläche,
- die Festigkeit der jeweiligen Materialien,
- das Verhältnis zwischen den vertikal wirkenden Kräften und den Kontaktflächen von Ladegut und Ladefläche,
- die Größe und Art vorhandener Verschiebe- bzw. Bewegungskräfte,
- die Größe und Art von dynamischen Stößen und Schwingungen in horizontaler und vertikaler Richtung,
- das Vorhandensein von gleitfördernden Mitteln,
- die Temperatur im Laderaum
- etc.

Diese Komplexität der Einflussfaktoren auf den Reibbeiwert findet in der veröffentlichten Literatur bis heute keine adäquate Entsprechung. Somit ist festzuhalten, dass derzeit keine geeigneten Informationen für den praktischen Anwendungsfall von rutschhem-

menden Materialien zu finden sind. Untersuchungen der Forschungsstelle zu Reibbeiwerten (vgl. AiF-FV-Nr.: 12292 N „Reibbeiwerte für die Ladungssicherung“ /AIF12292/) haben deutlich gezeigt, dass die Eigenschaften verschiedener Reibpaarungen durchaus sehr stark schwanken und von den jeweiligen Versuchsbedingungen beeinflusst werden. So haben z. B. die Verarbeitung von Rutschhemmenden Materialien, deren Verschmutzung oder der Grad der Abnutzung einen erheblichen Einfluss auf den Reibbeiwert. Es existieren große Schwankungsbreiten bei den Eigenschaften der Materialien. Es ergeben sich beispielsweise sehr deutliche Unterschiede, ob die Reibungspartner feucht, staubig, verölt, abgenutzt oder frisch gesägt sind etc. Somit müssen also die Oberflächenstruktur und der Oberflächenzustand der betrachteten Reibungspartner Ladefläche / Unterlage – rutschhemmende Zwischenlage – Ladegut / Prüfkörper mit in die Untersuchungen eingeschlossen werden.

Aber auch dynamische Faktoren (z. B. Schwingungsbelastungen auf der Ladefläche) und Materialeigenschaften, wie z. B. Oberflächenstruktur, Oberflächenbeschaffenheit, Temperatur oder Flächenpressung, haben einen erheblichen Einfluss auf den Reibbeiwert von rutschhemmenden Materialien. Um die Dynamik von Transportvorgängen praxisgerecht zu erfassen, wird bei der Beurteilung der Ladungssicherung nicht die Haftreibung, sondern die Gleitreibung berücksichtigt (vgl. VDI 2700 /VDI2700/). Vertikal wirkende Massenkräfte während des Transports, hervorgerufen durch z. B. Unebenheiten der Fahrbahn, können z. B. die durch das Gewicht der Ladung wirkende Normalkraft (Anpresskraft) beeinflussen. Es hat sich gezeigt, dass die vertikale Anpresskraft und somit auch die wirksame Reibung ohne zusätzliche Sicherungsmaßnahmen kurzzeitig gegen Null gehen kann. Auch aus diesem Grund ist eine Ladungssicherung ausschließlich über Reibung nicht ausreichend. Es müssen daher immer zusätzliche Maßnahmen (z. B. zusätzlicher Kraftschluss oder Formschluss) zur Ladungssicherung getroffen werden, um den Kontakt der Reibungspartner (Ladung/Ladefläche) in jeder Fahrsituation aufrecht zu halten.

Um die Dynamik von Transportvorgängen praxisgerecht zu erfassen, wird gemäß der Richtlinie VDI 2700 ff. für die Ladungssicherung nicht der Haft-Reibbeiwert sondern der Gleit-Reibbeiwert eingesetzt. Im Zweifelsfall ist hiernach für den Gleit-Reibbeiwert μ der niedrigste angegebene Wert einzusetzen, soweit nicht für den Einzelfall ermittelte und nachgewiesene Reibwerte für bestimmte Werkstoffpaarungen vorliegen. Durch Versuche ermittelte Reibwerte müssen reproduzierbar sein. Die Übertragbarkeit der ermittelten Werte auf die tatsächlichen Verladesituationen muss gewährleistet sein.

Nach Möglichkeit sind die Versuche an und mit den originalen Ladegütern durchzuführen.

3. Rutschhemmende Materialien für die Ladungssicherung

3.1. Klassifizierung gängiger Antirutschmatten

Rutschhemmende Materialien für die Sicherung in Transportmitteln bestehen in der Regel einerseits aus fest mit dem Transportmittel verbundenen Beschichtungen und andererseits aus separaten, nicht mit der Ladungsfläche verbundenen Sicherungsmitteln, die bei Bedarf unter das jeweilige Ladegut gelegt werden (vgl. Abb. 3-1).

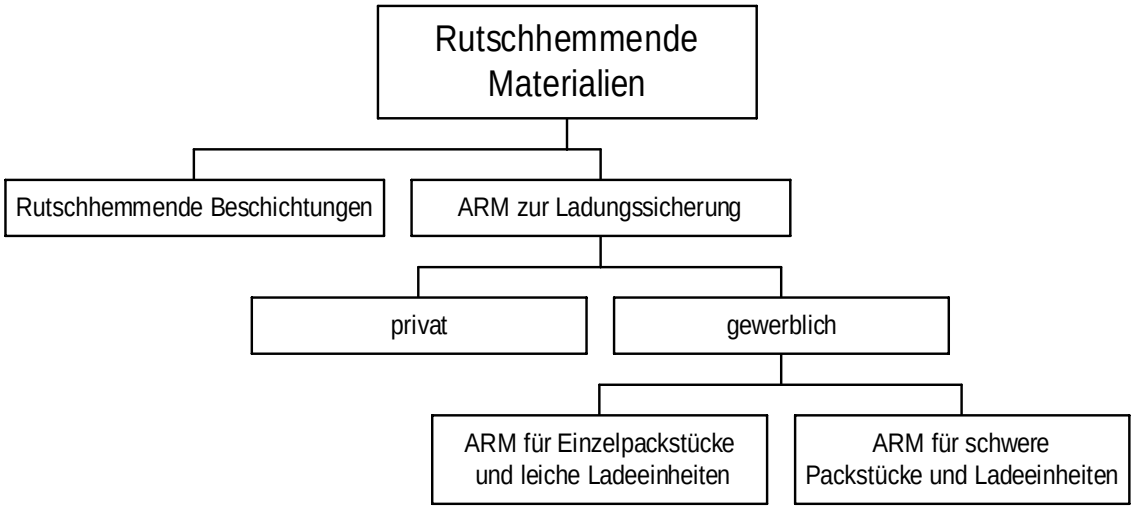


Abb. 3-1: Systematik von rutschhemmenden Materialien

Im Folgenden werden verbreitete rutschhemmende Materialien vorgestellt, wobei der Fokus auf Antirutschmatten für den gewerblichen Einsatz liegt.

3.1.1. Antirutschmatten aus Gummigranulat

Die Gummigranulat-ARM bestehen im Wesentlichen aus Polyurethan-Kautschuk (z. B. Styrol-Butadien-Rubber (SBR), Natural Rubber (NR)), der in der Regel aus Granulat mit einer Polyurethan-(PUR)-Bindung hergestellt wird. Dafür werden u. a. Altreifen und Gummischläuche geschreddert und von Fremdkörpern (z. B. Reste der Karkasse) gereinigt. Dieses Altgummigranulat wird unter Zugabe von Polyurethan vermischt und unter Druck zu Ballen verpresst. Von diesen Ballen wird nach einem Aushärtungsprozess entsprechend der gewünschten Materialdicke die Antirutschmattenbahn abgeschält und nach Bedarf konfektioniert. Zuschnitte werden in Streifen oder Rollen kundengerecht konfektioniert.

Die Farben dieser Antirutschmatten ergeben sich aus den verwendeten Gummigranulaten und reicht von einfarbig-schwarz bis zu bunt-gesprenkelt (vgl. Abb. 3-2).

Abb. 3-2: Beispiele für Gummigranulat-ARM

Abb. 3-3: Gefügestruktur mit Hohlraumanteilen einer Gummigranulat-ARM

Herstellungsbedingt zeichnen sich diese Antirutschmatten durch eine grob- bis feinkörnige, offenporige Struktur aus (vgl. Abb. 3-3), die durch ungeordnete, laminare Gummipartikel eine überdurchschnittliche Feinheit und Zugfestigkeit erreichen können.

3.1.2. Antirutschmatten aus Vollgummi

Neben den Gummigranulat-ARM werden auch solche ARM verwendet, die massiv aus vulkanisiertem Gummi hergestellt werden. Diese Vollgummi-ARM werden aus Neu-Gummi durch Untermischen von Reifengranulaten aus SBR oder NR hergestellt und anschließend in beheizten Pressen vulkanisiert.
ARM aus Vollmaterial werden üblicherweise im Guss- oder Extrusionsverfahren weitgehend ohne Hohlraum-Anteil hergestellt (vgl. Abb. 3-4). Sie können zur Erhöhung der Festigkeitswerte mit innenliegender Gewebe- oder Lochblecharmierung ausgestattet sein.

Abb. 3-4: Beispiel einer Vollgummi-ARM

Die Oberfläche dieser Matten sollte leicht strukturiert sein (z. B. Noppen, Rillen.), um Schmutzpartikel und Feuchtigkeit aufnehmen zu können.

3.1.3. Antirutschmatten aus Polyurethan

Eine zweite Variante der Vollgummi-ARM wird aus Polyurethan (PUR) mit Gewebe- oder Lochblecharmierung (vgl. Abb. 3-5), jedoch ohne Füllmaterialien hergestellt. Polyurethan-Produkte werden aus 2-komponentigen Polyurethan-Rohstoffen hergestellt, die miteinander vermischt und bis zum Aushärten in Handformen gegossen werden.

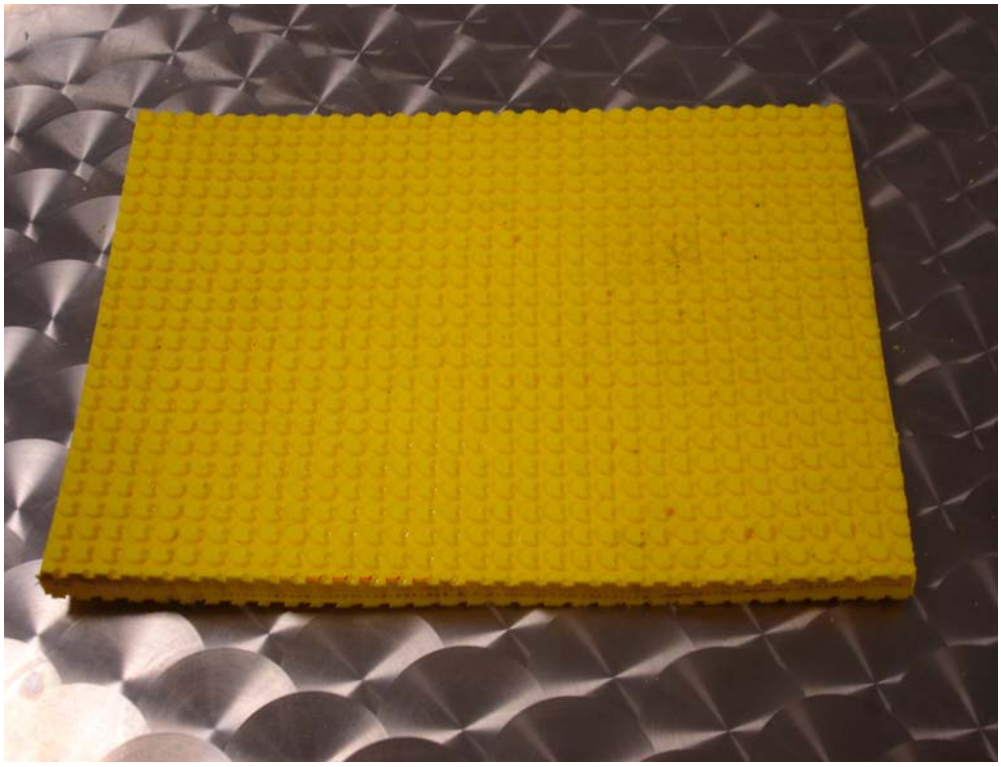


Abb. 3-5: Beispiel einer ARM aus gegossenem Polyurethan

Auch hierbei sollte die Oberfläche dieser Matten leicht strukturiert sein (z. B. Noppen, Rillen.), um Schmutzpartikel und Feuchtigkeit aufnehmen zu können.

3.1.4. Schaumstoffbeschichtete Gewebe-Antirutschmatten

Das Trägermaterial der schaumstoffbeschichteten Gewebe-ARM wird bei der Herstellung aus Kett- und Schussfäden aus hochreißfesten Polyamid- und Polyesterfasern (PA und PE) zu einem Gewirk verknüpft. Dies wird anschließend in die Beschichtungsanlage eingeführt, in der das Trägermaterial durch ein Tauchverfahren gleichmäßig aufgebracht wird. Dieses Gewebe ist somit mit einer Schicht aus Polyvinylchlorid (PVC)-Schaumstoff ummantelt (vgl. Abb. 3-6 und 3-7).

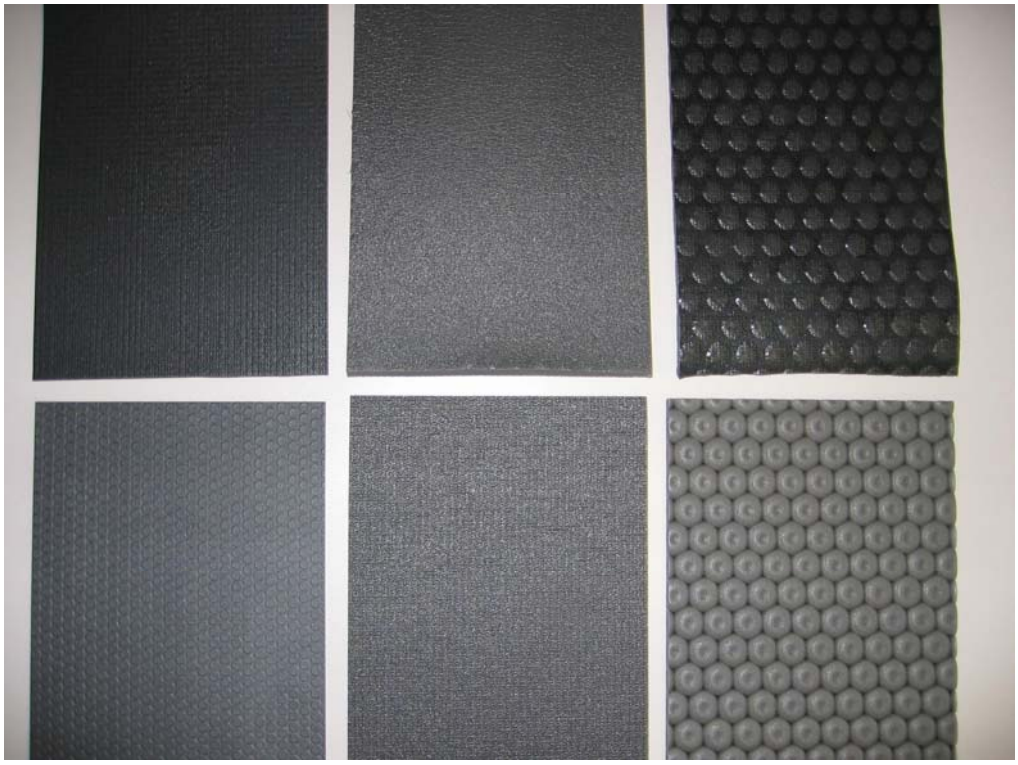


Abb. 3-6: Beispiele für schaumstoffbeschichtete Gewebe-ARM mit geschlossener Oberfläche

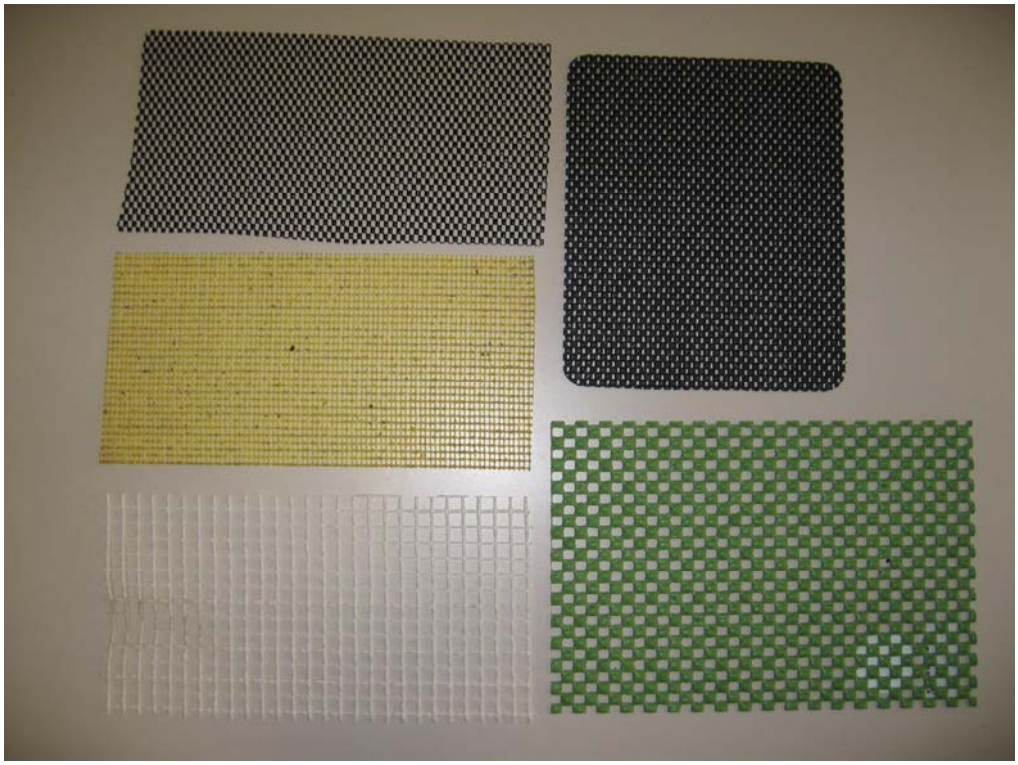


Abb. 3-7: Beispiele für schaumstoffbeschichtete Gewebe-ARM mit gelochter Oberfläche

Im Anschluss wird das Produkt ausgehärtet und getrocknet. Es werden schaumstoffbeschichtete Gewebe-ARM mit geschlossener und mit gelochter Oberfläche hergestellt.

3.1.5. Klebstoffbeschichtete beschichtete Gewebe-Antirutschmatten

Als Grundmaterial des Gewebes dient reine Baumwolle, die mit einer festgelegten Garnstärke und Fadenzahl in Kette und Schuss zu einer engmaschigen Gitterstruktur gewoben wird. Anschließend wird dieses Gewebe mit einer haftenden, homogenen Ummantelung zur Reduzierung der Gleitwirkung, einer adhäsiven (klebrigen) Spezialoberflächenbeschichtung, versehen (vgl. Abb. 3-8), die in der Regel lebensmittelrechtlich unbedenklich ist.

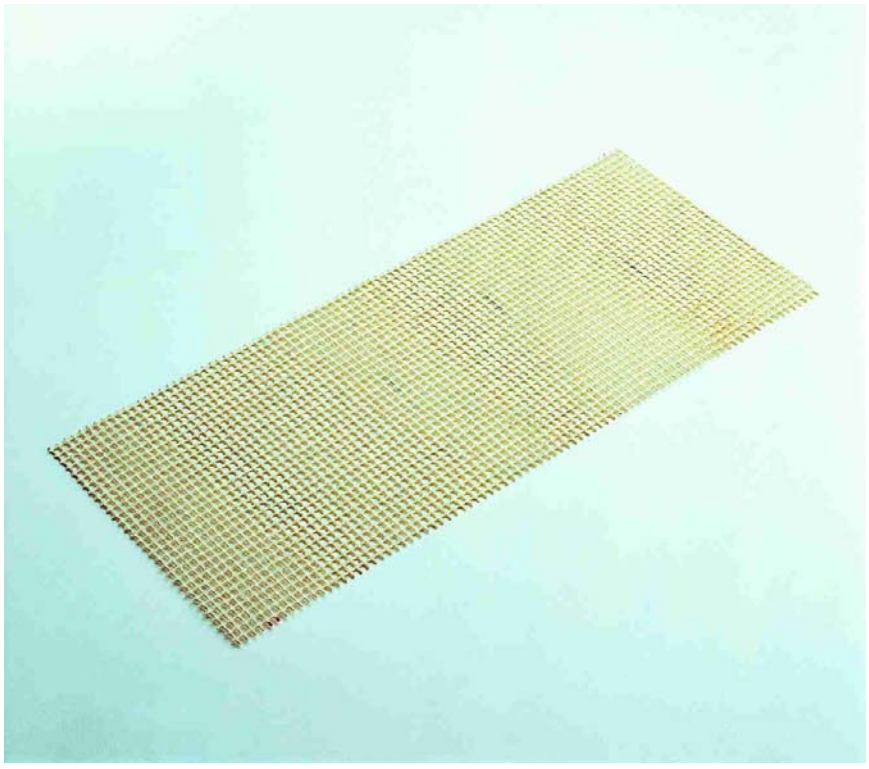


Abb. 3-8: Beispiel für eine klebstoffbeschichtete Gewebe-ARM

3.1.6. Klebstoffbeschichtete und -getränkte Faser-Antirutschmatten (Filz-ARM)

Ausgangsrohstoffe für rutschhemmende Filze sind natürliche und synthetische Fasern in Verbindung mit Klebefasern. Aus diesen Fasern wird durch Vernadeln und Verkleben ein textiler Träger (Filzmatte) hergestellt, dessen Fasern innig vermischt sind. Der

textile Träger wird anschließend (z. B. durch einen Laminierungsprozess) mit einer Polymerschicht versehen oder mit einer Dispersion getränkt (vgl. Abb. 3-9).

Abb. 3-9: Beispiel für eine klebstoffbeschichtete und -getränkte Filz-ARM

3.1.7. Rutschhemmend beschichtete Vollpappen und Papiere

Vollpappen und Papiere bestehen nahezu vollständig aus Zellstoff (vorzugsweise Altpapier) und sind biologisch abbaubar. Sie können nach Gebrauch – je nach Verschmutzungsgrad – der Reststoffverwertung oder Entsorgung zugeführt werden. Für die Herstellung verwendet die Zellstoffindustrie nahezu 100% Altpapier. Die Vollpappe kann vor der Beschichtung bedruckt werden.

Die Außenseiten werden dabei ein- oder beidseitig mit einer gummierten Beschichtung versehen, die ein Verblocken verhindert (vgl. Abb. 3.10).

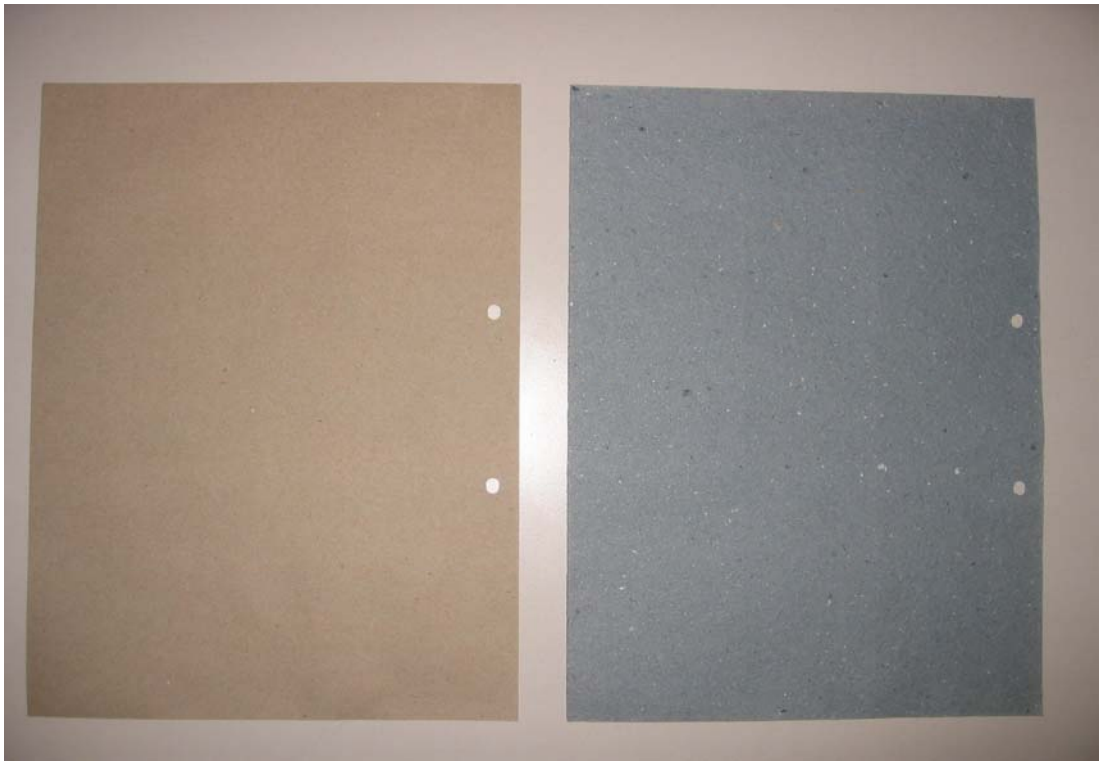


Abb. 3-10: Beispiel für eine rutschhemmend beschichtete Vollpappe

3.1.8. Rutschhemmend beschichtete Wellpappe und Pappe mit innenliegendem Trägermaterial aus Kunststoffen

Wellpappe ist ein Werkstoff, der aus einer oder mehreren Lagen eines gewellten Papiers, das zwischen mehrere Lagen eines anderen Papiers oder Kartons geklebt ist, besteht (vgl. /DIN55468-1/). Die Struktur von Wellpappe wird maßgeblich durch die Wellengeometrie, die Anzahl und Anordnung der kombinierten Lagen und durch Qualität der Papiere bestimmt. Reine Wellpappe besteht ausschließlich aus Zellstoff (vorzugsweise Altpapier) und ist biologisch abbaubar. Sie kann nach Gebrauch – je nach Verschmutzungsgrad – der Reststoffverwertung oder Entsorgung zugeführt werden. Für ARM werden die Außenseiten mit einer gummierten Beschichtung versehen.

3.1.9. Rutschhemmend beschichtete Bodenbeläge

Rutschhemmend beschichtet Gumminoppen-Bodenbeläge

Als rutschhemmender Bodenbelag wird üblicherweise ein Gumminoppenbelag mit einer Dicke von ca. 4 mm eingesetzt, dessen Noppen einen Durchmesser von ca. 25 mm und eine Höhe von ca. 1,0 mm aufweisen. Diese Beläge werden überwiegend in schwarzer Färbung hergestellt; es sind jedoch auch andere Farbgebungen möglich. Ausgangsrohstoffe für rutschhemmende Bodenbeläge sind NR und synthetischer SBR Als Füllstoffe werden Ruß, Kaolin und Quarz verwendet. Der Kautschuk wird hierfür in einem Innenmischer mit den Füll- sowie weiteren Zuschlagstoffen vermischt und in einem Kalander zu einer maßgenauen Kautschukplatte ausgeformt. Die Formgebung und Vernetzung erfolgt in einer Vulkanisierpresse bei 150°C bis 180°C.

Rutschhemmend beschichtete Quarzsand-Bodenbeläge

Für spezielle Anwendungen – z. B. für Kühl- und Lebensmitteltransporte – werden u. a. geeignete Sonderlösungen wie rutschhemmend beschichtete Böden oder Metallböden aus Tränenblechen angeboten. Die rutschhemmende Beschichtung besteht hierbei aus einem Verbund mit einem Kunststoffgemisch, in das Sand oder Korund mit unterschiedlicher Körnung eingestreut wird.

3.2. Rohstoffe zur Herstellung von Antirutschmatten

Für die Wirksamkeit und Haltbarkeit von ARM ist es von wesentlicher Bedeutung, welche Eigenschaften bzw. Qualität die verwendeten Rohstoffe haben.

3.2.1. Kunststoff

Als Kunststoffe bezeichnet man Stoffe, deren Grundbestandteil synthetisch oder halbsynthetisch erzeugte Polymere sind. Durch die Auswahl des Ausgangsmaterials, das Herstellungsverfahren und die Beimischung von Additiven lassen sich technische Eigenschaften von Kunststoffen wie Formbarkeit, Härte, Elastizität, Bruchfestigkeit, Temperatur- und chemische Beständigkeit in weiten Grenzen variieren.

Duroplaste sind Kunststoffe, die bei der Verarbeitung räumlich eng vernetzen. Sobald ein derartiges Material vernetzt ist, kann es nur noch mechanisch bearbeitet werden. Duroplaste sind meistens hart und spröde. Bei Hitzeeinwirkung werden Duroplaste nicht weich. Duroplaste haben für RHM keine wesentliche Bedeutung.

Elastomere sind formfeste, aber elastisch verformbare Kunststoffe. In der Regel handelt es sich bei Elastomeren um Polymere oder Polyaddukte. Die Makromoleküle von Elastomeren sind nur an einigen Stellen miteinander verbunden und bilden ein weitmaschiges räumliches Netz. Diese Vernetzung der einzelnen Polymerketten (Vulkanisation) führt zu den gummielastischen Eigenschaften dieser Werkstoffe. Im allgemeinen Sprachgebrauch bezeichnet man Elastomere daher auch als Gummi. Die Kunststoffe können sich bei Zug- und Druckbelastung verformen, finden aber danach wieder in ihre Ausgangsform zurück.

Natur- und Synthesekautschuke sind keine Werkstoffe im allgemein üblichen Sinn, sondern nur Grundstoffe, denen vor der Vulkanisation eine Vielzahl von Mischungsbestandteilen zugesetzt werden müssen. Neben dem Grundmaterial Kautschuk enthalten alle Elastomere zahlreiche Zusätze wie Füllstoffe (z. B. Russ für Autoreifen), Weichmacher, Verarbeitungshilfsmittel, Alterungsschutzmittel, Vulkanisiermittel, Vulkanisationsbeschleuniger, Aktivatoren, Vulkanisationsverzögerer, Pigmente usw. Im Durchschnitt besteht eine Elastomermischung aus 10 bis 20 Komponenten. Die Gesamtheit aller dieser Komponenten bezeichnet man als Elastomermischung oder Elastomercompound.

Zu den Elastomeren gehören alle Arten von vernetztem Kautschuk. Die Vernetzung erfolgt beispielsweise durch Vulkanisation mit Schwefel, mittels Peroxiden, Metalloxiden oder Bestrahlung. Elastomere werden beim Erwärmen nicht weich und sind in den meisten Lösemitteln nicht löslich.

Beispiele für Elastomere sind Naturkautschuk (NR), Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR), Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR), Chloropren-Kautschuk (CR), Butadien-Kautschuk (BR) und Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM).

Thermoplaste sind Kunststoffe, die aus langen, linearen Molekülen bestehen. Durch Energiezufuhr werden diese Materialien formbar bis flüssig und können mit verschiedenen Verfahren bearbeitet werden. Nachdem das jeweilige Werkstück wieder abgekühlt ist, behält es seine Form. Dieser Prozess ist reversibel (wiederholbar). Die meisten der

heute verwendeten Kunststoffe fallen unter diese Gruppe, z.B. Polypropylen (PP), Polyethylen (PE), Polyethylen-terephthalat (PET) und Polystyrol (PS). Technische Teile (z.B. Träger-material von gewebten Matten) werden meist aus Polyacetal (POM), Polyamid (PA), Polybutylen-therephtalat (PBT), Polyethersulfon (PES), Polycarbonat (PC), Poly-phenylensulfid (PPS), Polyether-etherketon (PEEK) oder Polyimid (PI) hergestellt.

3.2.2. Kautschuk

Es wird zwischen dem aus Pflanzen gewonnenem Naturkautschuk sowie den zahlreichen synthetischen Kautschukarten unterschieden, die über eine Polymerisation von diversen Monomerbausteinen in Wasser bzw. org. Lösemittel erhalten werden. Kautschuk stellt die wichtigste Rohstoffkomponente für die Herstellung von Gummiartikeln dar. Eine auf den Anwendungsbereich zugeschnittene Auswahl ist entscheidend für die spätere Eignung des fertigen Elastomerproduktes. Bei besonderen Anforderungen (z. B. Resistenz gegen Öl, Chemikalien) können die Eigenschaften beim Hersteller erfragt werden.

Kautschuk ist das unvernetzte Ausgangsprodukt bei der Herstellung von Elastomeren (Gummi).

3.2.3. Gummi

Gummi bzw. der gebrauchsfertige Gummiartikel entsteht durch Vulkanisation von Kautschukmischungen. Gummiprodukte zeichnen sich neben ihrem elastischen Rückstellverhalten auch durch hohe statische und dynamische Festigkeitswerte aus.

Unter Vulkanisation versteht man die chemisch-physikalische Umwandlung, bei welcher der vorwiegend plastische Kautschuk in den gummielastischen Zustand übergeht. Diesen Vorgang, der durch Verknüpfung von Makromolekülen an ihren reaktionsfähigen Stellen erfolgt, nennt man auch Vernetzung. Zur Vulkanisation benötigt man ein Vulkanisationsmittel. Das älteste und gebräuchlichste Vulkanisationsmittel (Vernetzer) ist Schwefel.

Während der Kautschuk meist in Form einer zähen Masse vorliegt, sind die Weichmacher in der Regel flüssig und andere Bestandteile oft pulverförmig. Die Eigenschaften der Elastomere sind nicht nur von der Mischungszusammensetzung abhängig, sondern

auch von der Dispersion (Verteilung) der Einzelbestandteile im Kautschuk, d. h. von der Mischungsherstellung. Aufgrund dessen ist es wichtig, dass nach einer entsprechenden Mischvorschrift, die u. a. die Reihenfolge der Zugabe der Einzelbestandteile und die Mischzeiten vorgibt, gearbeitet wird. Die Mischungsbestandteile werden gewogen oder volumetrisch dosiert und dem Innenmischer-Kneter zugeführt. Nach dem Mischvorgang im Kneter wird der Kautschuk auf einem Walzwerk fertig gemischt und homogenisiert. Nach der Beendigung des Mischvorgangs wird die Mischung in Form von Fellen vom Walzwerk abgezogen, mit Trennmitteln im Flüssigkeitsbad benetzt und anschließend mit Luft getrocknet.

Der verwendetet Kautschuk bestimmt die Grundeigenschaften des Vulkanisats, vor allem die Alterungsbeständigkeit und Kälteflexibilität sowie das Verhalten gegenüber verschiedenen Medien wir Ölen, Treibstoffen, Wasser und Lösungsmitteln. Das Niveau der mechanischen Eigenschaften wie Elastizität und Festigkeit hängt ebenfalls von der Polymerbasis, aber auch von der Füllung mit sogenannten verstärkenden Rußen oder hellen Füllstoffen ab. Mit Hilfe von Zusatzstoffen lassen sich bestimmte Eigenschaften variieren (z.B. die Härte) und verbessern (Kälteflexibilität, Stoßelastizität, Druckverformungsrest, Hitze- und Quellbeständigkeit). Die nachstehend aufgeführten Eigenschaften der verschiedenen Elastomertypen können daher nur Anhaltspunkte sein.

3.3. Ladungssicherungsrelevanten Eigenschaften von Antirutschmatten

3.3.1. Reibungskennwerte (Haft- und Gleitreibbeiwert)

Die unstreitig wichtigste Eigenschaft von Antirutschmatten ist ihre rutschhemmende Wirkung. Aus diesem Grund erhalten die diesbezüglichen Kennwerte

- **Haftreibbeiwert** und
- **Gleitreibbeiwert**

sowie die Angabe der damit eng verbundenen Reibungspartner

- **Unterlage,**
- **Rutschhemmendes Material** und
- **Ladegut bzw. Prüfkörper**

sowie weitere Prüfparameter (z. B. Zuggeschwindigkeit, Prüftemperatur, spezifische Flächenpressung) eine erstrangige Bedeutung.

Vor dem Hintergrund, dass Ladungssicherungsmaßnahmen überwiegend in dynamischen Systemen wirksam sein müssen, wird derzeit in der Richtlinie VDI 2700 ff /VDI2700/ gefordert, dass ausschließlich der kleinste gemessene Gleit-Reibbeiwert der jeweiligen Reibungspartner für Ladungssicherungsmaßnahmen herangezogen werden darf.

3.3.2. Kennwerte einer ziehenden Beanspruchung

Festigkeit ist im Allgemein die Höchstzugkraft-Dehnung, d. h. die Widerstandskraft, die Werkstoffe einer Zug- oder Scherbeanspruchung entgegensetzen, bis sie reißen. Dabei wird die erforderliche Zugkraft bzw. die Zugspannung und die jeweilige Dehnung im Zugversuch nach unterschiedlichen Prüfvorschriften gemessen (vgl. /DIN 53455-E/, /DIN 53504/, /DIN EN ISO 527/).

Reine Zugbeanspruchungen von rutschhemmenden Materialien unter Last sind in der Ladungssicherungspraxis jedoch eher selten zu verzeichnen; vielmehr treten Scherbeanspruchungen beim Verschieben von Ladegut auf einer rutschhemmenden Matte auf.

Der Zugversuch wird jedoch als für unterschiedliche Anwendungsfälle normiertes Prüfverfahren weitgehend anerkannt und wird vor diesem Hintergrund auch zur vergleichenden Bewertung von rutschhemmenden Materialien herangezogen.

Die Zugfestigkeit σ_M (tensile strength) ist die maximale Spannung, die der Prüfkörper während einer Zugbelastung trägt. Sie ist somit eine Kennzahl zur Beurteilung der mechanischen Belastbarkeit von Werkstoffen. Für eine Antirutschmatte ist die Zugfestigkeit dann eine wichtige Beurteilungsgröße, sobald eine durch das abgestellte Ladegut belastete ARM einer ziehenden Last ausgesetzt ist, deren Zugachse in der Längsachse der ARM liegt.

Die Reißfestigkeit σ_B (tensile strength at break) ist die Spannung, die der Prüfkörper im Moment des Reißens bzw. des Bruchs während einer Zugbelastung trägt.

Die Bruchdehnung ε_B (tensile strain at break) ist die Dehnung eines Prüfkörper im Moment des Reißens bzw. des Bruchs während einer Zugbelastung.

3.3.3. Kennwerte einer scherenden Beanspruchung

Das Scherverhalten von Werkstoffen ist in der Literatur nicht einheitlich definiert. In der Regel werden folgende Schervorgänge unterschieden:

- das mechanische Abschälen einer Bahn von einem zylindrischen Prüfkörper,
- das interlaminare Abscheren von untereinander verklebten Schichten unter einer Biegebeanspruchung und
- das Abscheren, bei dem das Werkstoffgefüge zwischen ungleich bewegten Werkstoffoberflächen zerstört wird.

Die Scherfestigkeit (shear strength) gibt an, welche Scher- oder Schubkraft erforderlich ist, um ein Werkstück mit einer bestimmten Querschnittsfläche abzuscheren. Die Scherkräfte wirken parallel zur bzw. zu den Haftflächen. Die Scherfestigkeit drückt die Belastungsfähigkeit eines Werkstoffs auf Abscheren aus. Sie ist der Widerstand, den ein Körper (horizontalen) Scherkräften entgegensetzt. Es handelt sich dabei um die zusammenhaltenden Kräfte im Gegensatz zu Reibungskräften, die auf Oberflächen wirken. Scherende Beanspruchungen sind für rutschhemmende Materialien als typisch zu bezeichnen. Sie treten immer dann im rutschhemmenden Material auf, wenn Ladegut auf seiner Unterlage verrutscht oder verschoben wird. Diese Beanspruchungen können entweder zum Reißen des rutschhemmenden Materials oder zum Herausbrechen einzelner Partikel/Abrieb führen. Da jedoch kein auf die Ladungssicherungs-bedingungen anwendbares Prüfverfahren verfügbar ist, werden in der Regel die Kennwerte aus Zugversuchen und Verschleißprüfungen für die Bewertung von rutsch-hemmenden Materialien herangezogen.

3.3.4. Kennwerte einer drückenden Beanspruchung

Unter Last werden rutschhemmende Materialien derart beansprucht, dass sich diese Materialien entweder durchbiegen können oder im Bereich der Lasteinwirkung durch „Näpfchenbildung“ verformen können.

Als Härte eines Werkstoffes wird der Widerstand, den ein Werkstoff dem Eindringen eines Fremdkörpers entgegensetzt, bezeichnet. Dabei stehen verschiedene Methoden der Härteprüfung bereit. Bei Elastomeren wird die Shorehärte mittels Prüfspitze oder

Prüfkegel ermittelt. Das Maß für die Härte ist die Eindringtiefe, wobei die Kraft durch eine geeichte Feder aufgebracht wird.

Elastizität ist die Fähigkeit eines Werkstoffes, die durch äußere Kräfte bewirkte Verformung rückgängig zu machen, sobald die Lasteinwirkung aufhört. Ihr Kennwert ist das Elastizitätsmodul, das aus dem Verhältnis von Spannung und Dehnung innerhalb des elastischen Bereiches eines Werkstoffs (vgl. Hookesches Gesetz) errechnet wird.

Die Biegesteifigkeit eines Kunststoffteiles ist das Verhältnis zwischen anliegender Last und der daraus resultierenden Durchbiegung. Die Steifigkeit wird hauptsächlich durch das E-Modul gekennzeichnet, das sich aus der Spannungs-Dehnungs-Kurve ableiten lässt. Die Biegefestigkeit ist die zum Bruch eines Prüfkörpers führende Beanspruchung auf Biegung. Das Biegeverhalten von rutschhemmenden Materialien ist wichtig zur Bewertung der Gebrauchseigenschaften bei der Sicherung von Ladegütern mit gerundeten Auflageflächen sowie beim Verstauen nach einer Nutzung.

3.3.5. Verschleiß- /Abriebsverhalten

Das mechanische Verschleißverhalten wird durch die Abriebfestigkeit, d. h. durch den Materialwiderstand der Oberfläche im Hinblick auf Verschleiß durch Reibung, bestimmt.

3.3.6. Alterungsverhalten

Bei der Alterung von polymeren Kunststoffen spalten sich die langen, miteinander verbundenen Molekülketten, die dem Elastomer seine Festigkeit geben, auf. Dieses Verkürzen der Makromoleküle führt zur stetigen Versprödung des Werkstoffes, so dass sich seine mechanische Festigkeit vermindert (vgl. /DIN 50035-E/). Alterung ist somit die Veränderung der dimensionalen und physikalischen Struktur eines Kunststoffs durch die kombinierte Einwirkung von Wärme, Licht, Gas, Strahlung, Feuchtigkeit etc.

Die Temperaturbeständigkeit ist in starkem Maße von den in der Anwendung auftretenden Belastungsarten sowie -größen und der Dauer der Einwirkung abhängig. Zu unterscheiden ist zwischen kurzzeitiger (Sekunden bis Minuten) und dauernder (Stunden bis Jahre) Belastung. Der Reibwert von Kautschuk ist temperaturabhängig. Polymere Kunststoffe bestehen aus langen, miteinander verbundenen Molekülketten. Werden elastische Kunststoffe einem dauerhaften Wärmeeinfluss ausgesetzt, spalten

sich die langen, dem Elastomer seine Festigkeit gebenden Polymerketten auf. Dieses Verkürzen der Makromoleküle führt zur stetigen Versprödung des Werkstoffes, so dass sich seine mechanische Festigkeit vermindert.

Mit UV-Beständigkeit wird der Widerstand gegen die Alterung aufgrund der unmittelbaren Einwirkung von UV-Strahlung des Sonnenlichts bezeichnet, die zu Schwund, Zerbröckeln, Einreißen, Haarrissbildung und Versprödung führen kann (vgl. /DIN 53387/, /DIN EN ISO4892-3-E/, /DIN EN ISO 11507/).

Für die Ladungssicherung ist die Beständigkeit von ARM gegenüber Betriebsstoffen ein wichtiges Bewertungskriterium. Die Beständigkeit gilt als Maß einer Dimensionsstabilität, d. h. gegen dimensionale Veränderungen infolge von Zersetzungsvorgängen aufgrund chemischer Reaktionen. Bei vielen Anwendungen müssen ARM-Werkstoffe gegen chemische Einflüsse, z. B. Lösungsmittel, Öle, Säuren, Laugen oder auch Weichmacher, beständig sein.

4. Reibungstheorie für elastisch nachgiebige und dynamische Reibungssysteme

4.1. Reibungstheorie der Festkörperreibung

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

Reibung auf einer horizontalen Fläche

Ein starrer Körper der Masse m soll auf einer horizontalen Fläche durch eine horizontal wirkende Zugkraft F, die die Wirkung der Massekraft simuliert, bewegt werden (vgl. Abb. 4-1).

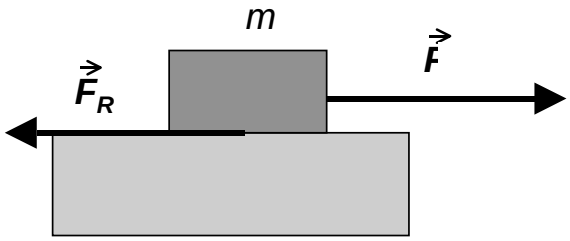


Abb. 4-1: Kräftesystem in der horizontalen Ebene

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 Reibungskraft 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 einen 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 Haftreibungskoeffizient μ_0 bzw. μ_H genannt und es gilt:

$$\mu_H = \mu_0 = F_0 / F_G \qquad \text{(Gl. 4-1)}$$

Weiterhin gilt in dieser Situation:

$$F_R = F_0. \qquad \text{(Gl. 4-2)}$$

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

$$F <= F_0 = \mu_0 \times F_G \text{ (Coulomb'sches Haftreibungsgesetz).} \qquad \text{(Gl. 4-3)}$$

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.

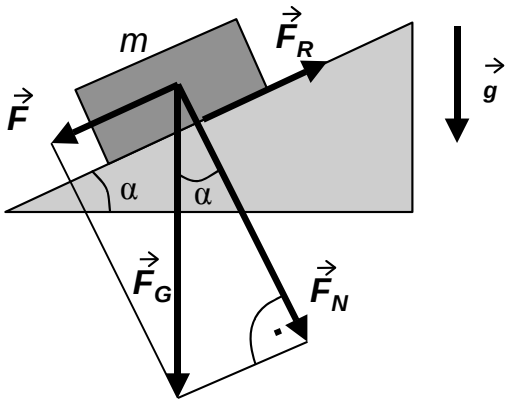


Abb. 4-2: Kräftesystem in der geneigten Ebene

$$F_N = F_G \times \cos \alpha \qquad \text{(Gl. 4-4)}$$

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:

$$\tan \alpha_0 = F_0 / F_N, \qquad \text{(Gl. 4-5)}$$

und

$$\tan \alpha_0 = \mu_0. \qquad \text{(Gl. 4-6)}$$

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.

Aber auch die oftmals geäußerte Begrenzung des Reibungsbeiwertes auf $0 <= \mu <= 1$ ist nicht zulässig. Der Tangens des (Neigungs-)Winkels kann grundsätzlich Werte zwischen $-\infty$ und $+\infty$ annehmen, wobei unter Zugrundelegung des Energieerhaltungs-satzes physikalisch nur der positive Bereich zu betrachten ist. Somit stehen für den Reibbeiwert der Bereich $0<= \mu <= +\infty$ zur Verfügung, ohne dass aus physikalischen Gründen eine Begrenzung erkennbar ist.

Das Coulomb'sche Haftreibungsgesetz gilt somit unter den Rahmenbedingungen der Mechanik starrer Körper. Die betrachtet jedoch 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 Kräftegleich-gewichten 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.

4.2. Reibungstheorie für elastisch nachgiebige Reibungssysteme

Für die Ladungssicherung können jedoch die Erkenntnisse der Festkörpermechanik (vgl. Coulomb'sches Haftreibungsgesetz) mit ihren idealisierten Annahmen (z. B. starre, nicht verformbare Körper) nur eingeschränkt angewendet werden. Hier werden in der Regel Ladeflächen und Ladungsträger als Reibpartner eingesetzt, die den idealen Vorgaben nicht entsprechen. Insbesondere die weit verbreiteten Flachpaletten werden aus preiswertem Weichholz in sägerauher Struktur und mit ausgeprägter Maserung hergestellt.

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 Rauhigkeitsprofil des Prüfkörpers auf dem Rauhigkeitsprofil der Auflagefläche liegt (vgl. Abb. 4-3).

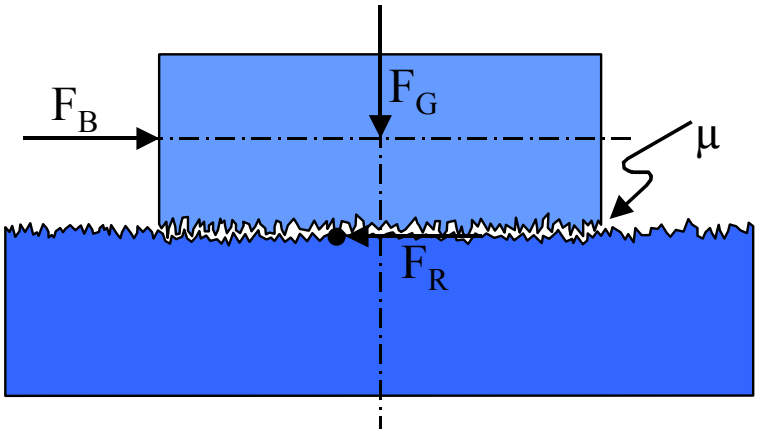


Abb. 4-3: Kontaktfläche zwischen zwei Körpern im Reibungskräftesystem

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 Rauhigkeitsprofile 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. Abb. 4-4) abgebildet, bei dem ein Holzkörper auf einer hölzernen Unterlage mit einer konstanten Zuggeschwindigkeit bewegt worden ist. 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 Rück-

gang 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).

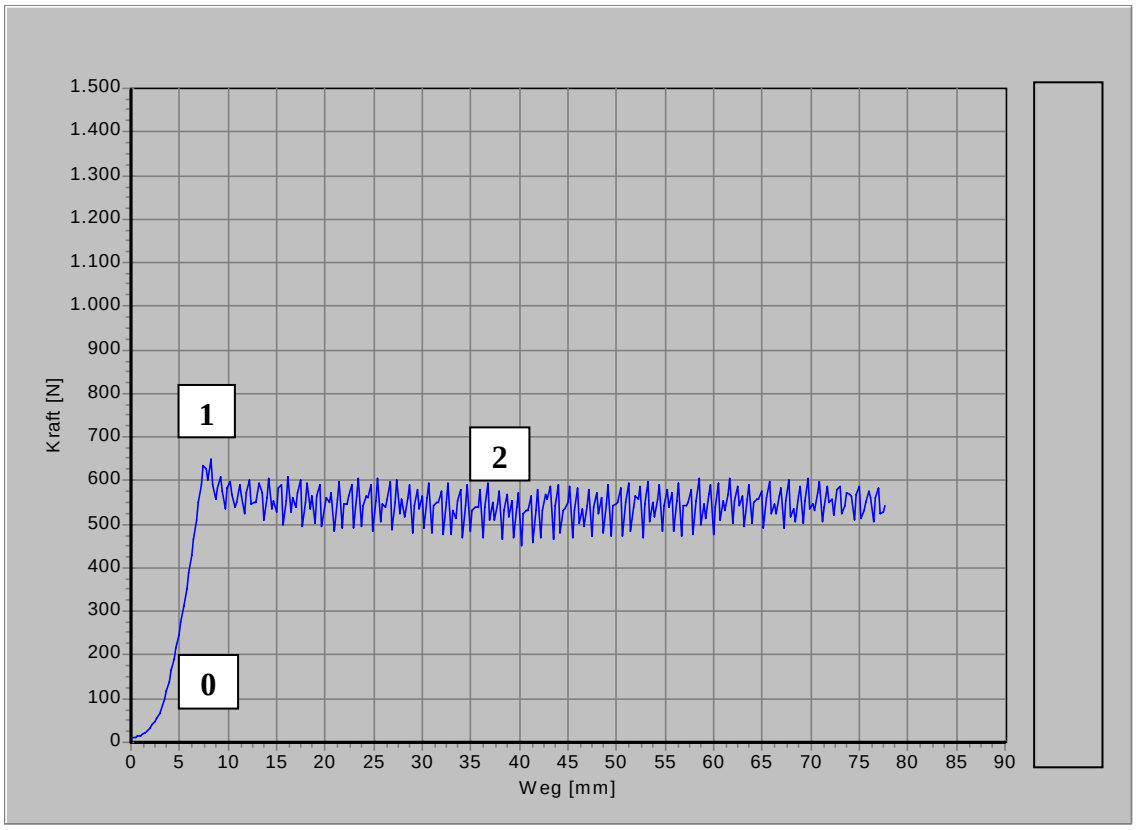


Abb. 4-4: Zugkraftverlauf (Kraft-Weg-Diagramm)

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 schließlich 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 der Körper zueinander aufgebracht werden müssen. Anders als beispielsweise bei tribologischen Untersuchungen, bei denen die Rauhigkeiten 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 Rauhigkeitswerte 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 Rauhigkeiten im tribologischen Sinne bis hin zu formschlüssigen Verbindungen im maschinenbaulichen Sinne besteht.

4.3. Reibungstheorie für dynamische Systeme

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 dynamischen Reibungssystemen 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 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.

5. Empirische Ermittlung von Qualitätsmerkmalen

5.1. Ermittlung von Reibbeiwerten

Der Prüfaufbau erfolgte gemäß des für die derzeit in Ausarbeitung befindlichen Richtlinie VDI 2700 Bl. 14 vereinbarten Prüfverfahrens. Die Prüfeinrichtung bestand aus einer Zug-Druck-Prüfmaschine mit Kraftmessdose und einer steifen Kraftübertragung mittels Zurrgurt. Die Steuerung und Auswertung erfolgte mittels PC-Programm. In Anlehnung an DIN 53.375 „Prüfung von Kunststoff-Folien – Bestimmung des Reibungsverhaltens“ wurde der prinzipielle Aufbau der Kraftumlenkung übernommen. Die zu prüfenden Reibungspartner wurden unter einem starren Probenkörper (15 kg) fixiert (verschraubt) und auf der Unterlage kontinuierlich horizontal gezogen. Die Prüfungen erfolgten im trockenen Zustand der Kontaktflächen. Die Auflast betrug 50 kg. Die Messungen wurden mit einer Zuggeschwindigkeit von 100 mm/min durchgeführt.

Die durchgeführten Messungen zur Ermittlung von Reibbeiwerten für die Ladungssicherung (vgl. Abb. 5-1 bis 5-9) zeigen, dass die Messschriebe erwartungsgemäß sehr unterschiedliche Reibungskraft- bzw. Reibbeiwertverläufe aufweisen. Vor dem Hintergrund, dass u. a. die Prüfparameter

- Art und Zustand der Unterlage / Ladefläche,
- Art und Zustand der ARM,
- Art und Zustand des Prüfkörpers / Ladeguts sowie
- Größe der Zuladung / spezifische Flächenpressung

einen wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse haben, werden hier lediglich ausgewählte Beispiele vorgestellt. In jedem Fall gilt, dass die ermittelten Messergebnisse für die Gleitreibbeiwerte nur für die jeweils vorliegenden Prüfbedingungen gelten und nicht als allgemeingültig angesehen werden dürfen.

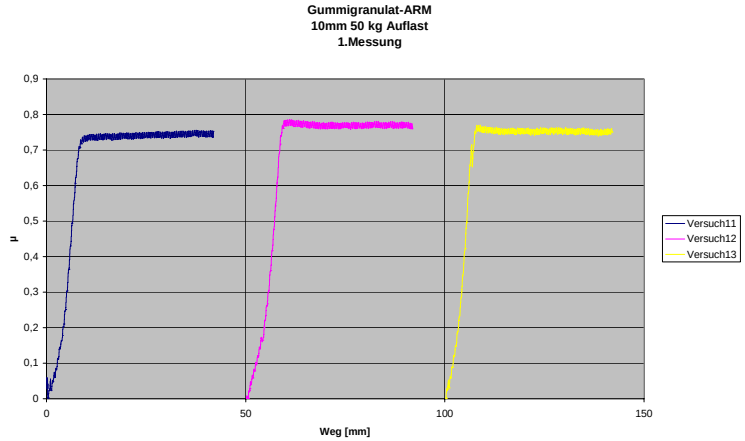


Abb. 5-1: 1. Messung zur Ermittlung von Reibbeiwerten einer Gummigranulat-ARM

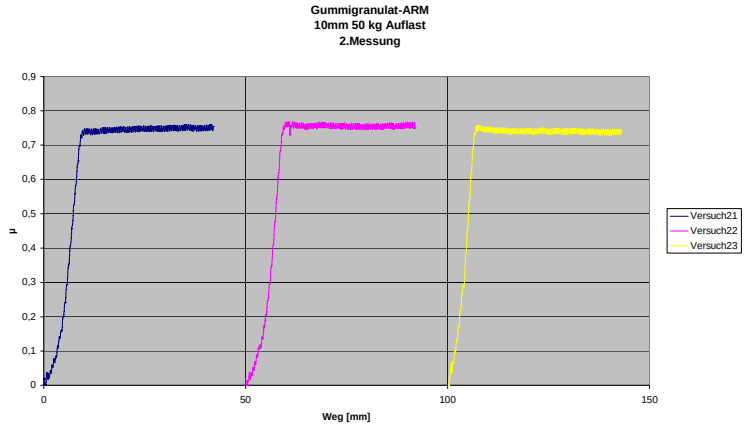


Abb. 5-2: 2. Messung zur Ermittlung von Reibbeiwerten einer Gummigranulat-ARM

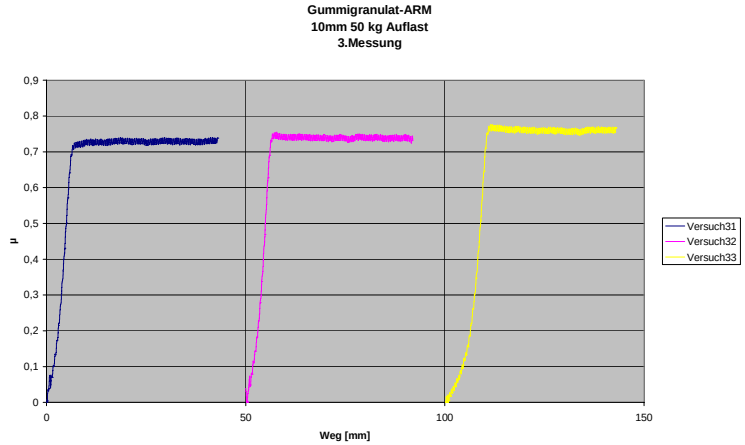


Abb. 5-3: 3. Messung zur Ermittlung von Reibbeiwerten einer Gummigranulat-ARM

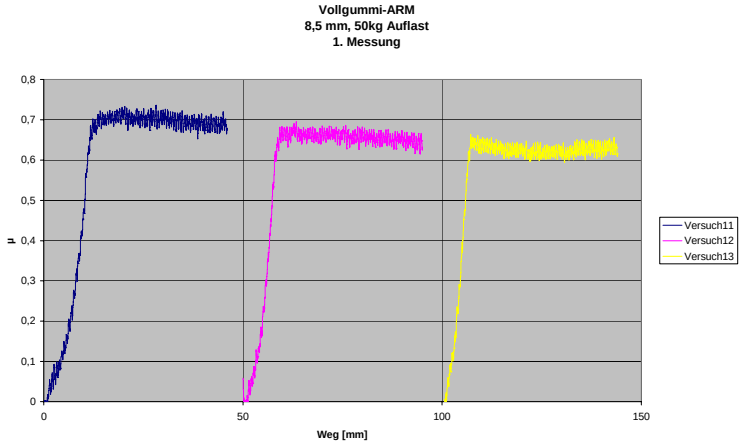


Abb. 5-4: 1. Messung zur Ermittlung von Reibbeiwerten einer Vollgummi-ARM

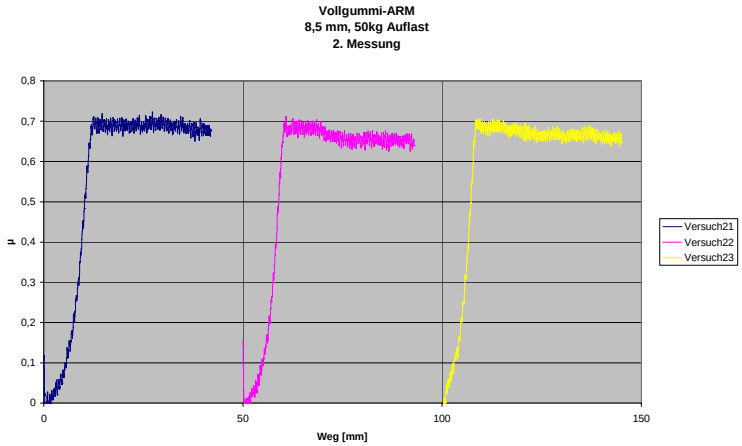


Abb. 5-5: 2. Messung zur Ermittlung von Reibbeiwerten einer Vollgummi-ARM

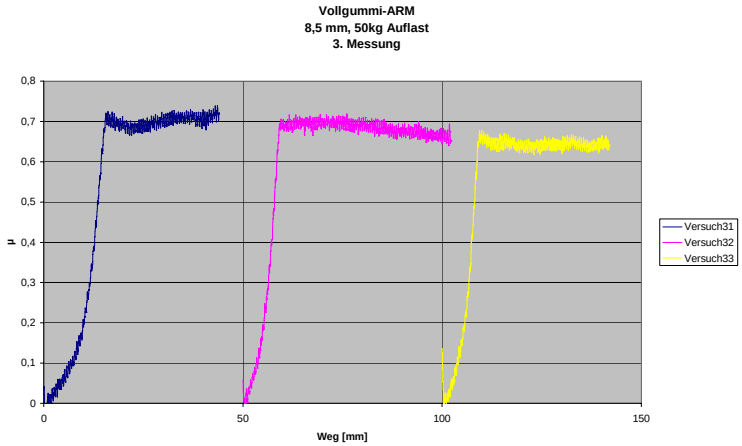


Abb. 5-6: 3. Messung zur Ermittlung von Reibbeiwerten einer Vollgummi-ARM

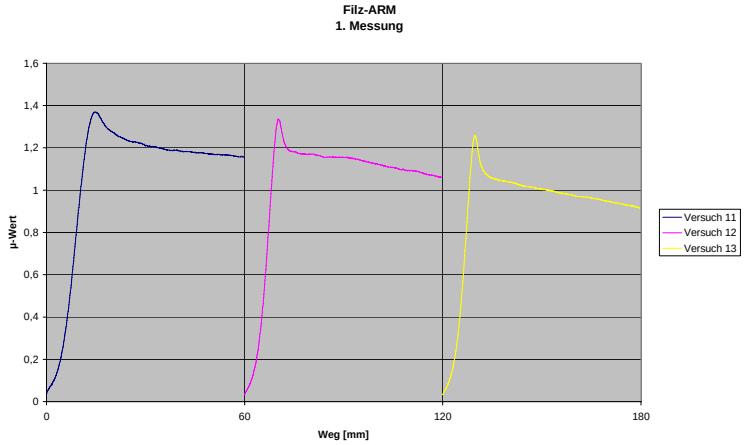


Abb. 5-7: 1. Messung zur Ermittlung von Reibbeiwerten einer Filz-ARM

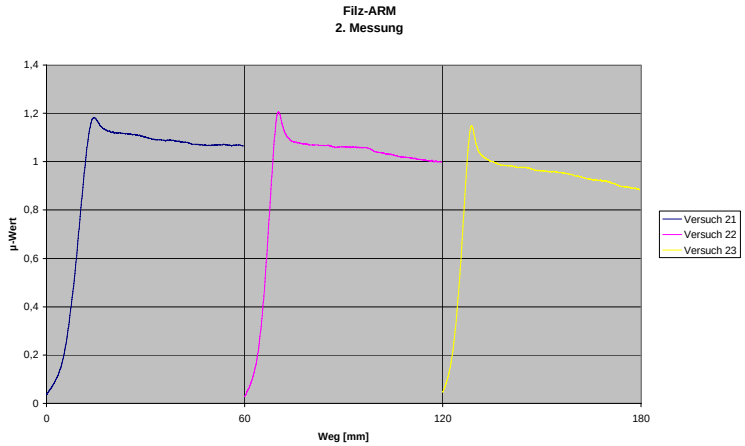


Abb. 5-8: 2. Messung zur Ermittlung von Reibbeiwerten einer Filz-ARM

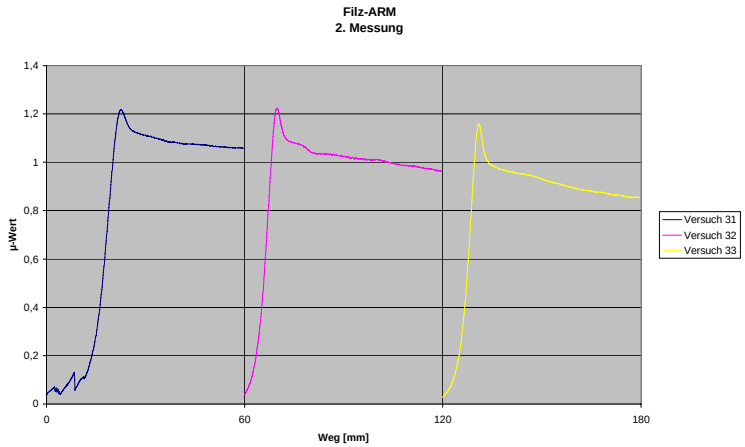


Abb. 5-9: 3. Messung zur Ermittlung von Reibbeiwerten einer Filz-ARM

5.2. Ermittlung flächenpressungsspezifischer Reibbeiwerte

Der Prüfaufbau erfolgte gemäß des für die derzeit in Ausarbeitung befindlichen Richtlinie VDI 2700 Bl. 14 vereinbarten Prüfverfahrens. Die Prüfeinrichtung bestand aus einer Zug-Druck-Prüfmaschine mit Kraftmessdose und einer steifen Kraftübertragung mittels Zurrgurt. Die Steuerung und Auswertung erfolgte mittels PC-Programm. Die Prüfungen erfolgten im trockenen Zustand der Kontaktflächen. Die Auflast wurde bzw. wird in mehreren Schritten beispielsweise von 0 kg bis 1500 kg erhöht. Die Messungen wurden mit einer Zuggeschwindigkeit von 100 mm/min durchgeführt. Die Reibungspartner wurden mit zwischengelegten Antirutschmatten gemessen. Nach Durchführung der gesamten Prüfreihe erfolgt die Auswertung hinsichtlich der Abhängigkeit des Reibbeiwertes von unterschiedlichen Flächenpressungen.

Diese Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss der spezifischen Flächenpressung auf die Reibbeiwerte bei ARM mit einer vergleichsweise harten Oberfläche (vgl. Abb. 5-10) geringer als bei ARM mit einer weichen Oberfläche (vgl. Abb. 5-11) ist.

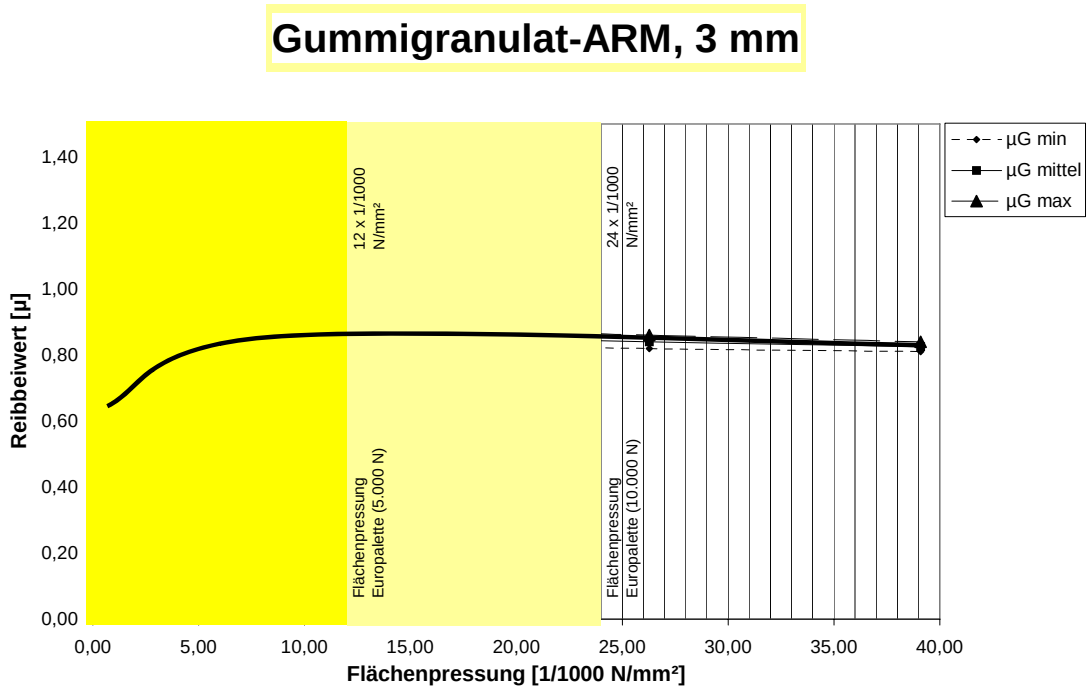


Abb. 5-10: Flächenpressungsspezifischer Verlauf von Gleitreibbeiwerten einer Gummigranulat-ARM

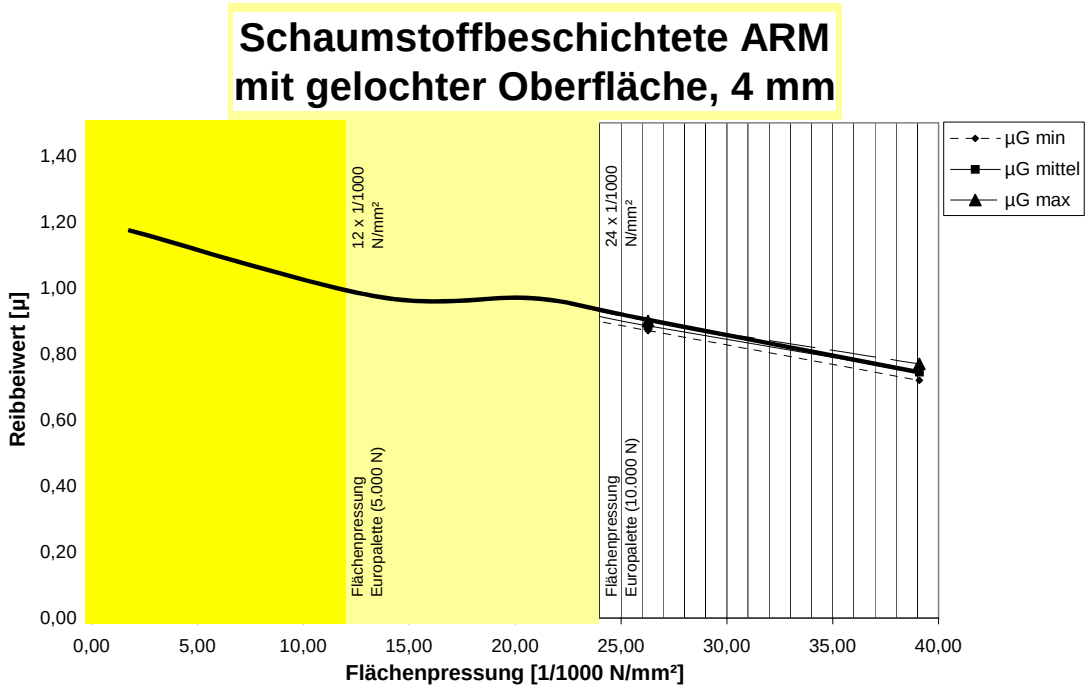


Abb. 5-11: Flächenpressungsspezifischer Verlauf von Gleitreibbeiwerten einer schaumstoffbeschichteten ARM mit gelochter Oberfläche

5.3. Bestimmung der Temperaturabhängigkeit von Reibbeiwerten

Der Prüfaufbau erfolgte gemäß des für die derzeit in Ausarbeitung befindlichen Richtlinie VDI 2700 Bl. 14 vereinbarten Prüfverfahrens. Die Prüfeinrichtung bestand wie zuvor aus einer Zug-Druck-Prüfmaschine mit Kraftmessdose und einer steifen Kraftübertragung mittels Zurrgurt. Die Steuerung und Auswertung erfolgte mittels PC-Programm. Die Prüfungen erfolgten im trockenen Zustand der Kontaktflächen. Die Messungen wurden und werden mit einer Zuggeschwindigkeit von 100 mm/min durchgeführt. Zum Vergleich mit den Reibbeiwerten bei Normalklima gemäß DIN EN ISO 2233 erfolgte diese Prüfung bei erhöhter Temperatur von 55 °C und 30 % rel. Luftfeuchtigkeit.

Für die hier ausgewählten Gummigranulat-ARM liegt der gemessene Gleitreibbeiwert bei einer Prüftemperatur von 55 °C bei ca. $\mu_{G\ 55°C} = 0{,}65$ und beträgt damit ca. 80 % des bei normalen Umgebungsbedingungen gemessenen Wertes (vgl. Abb. 5-12 und Abb. 5-13). Der Verlauf der Messkurve weist auf Reibpartner hin, von denen mindestens ein Reibpartner durch eine relativ weiche, verformbare Oberfläche gekennzeichnet ist.

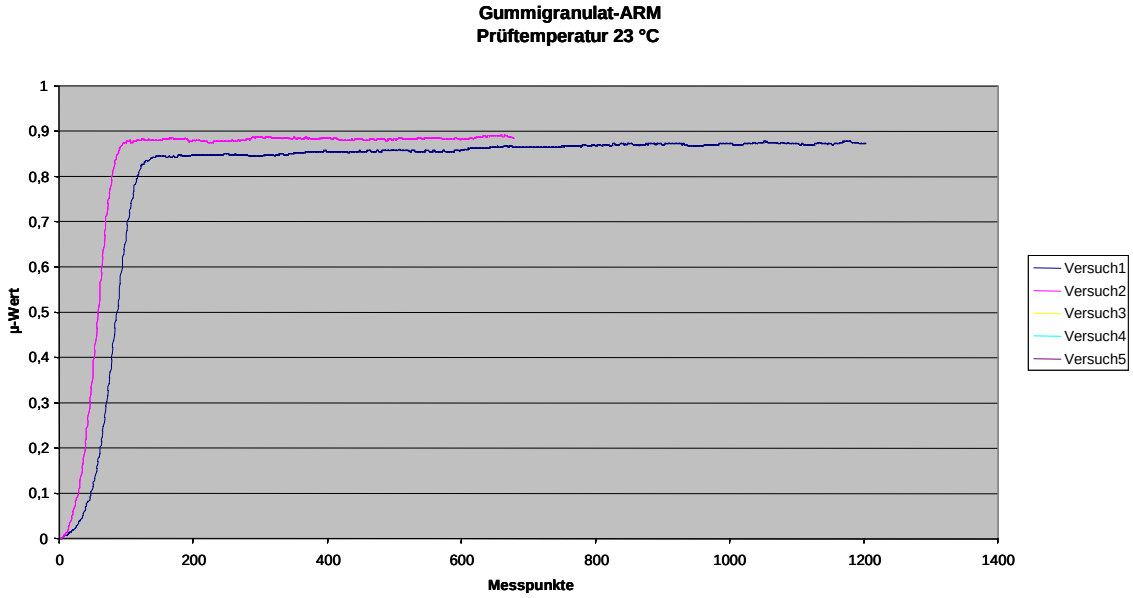


Abb. 5-12: Messschrieb der Reibbeiwerte einer Gummigranulat-ARM bei einer Prüftemperatur von 23 °C

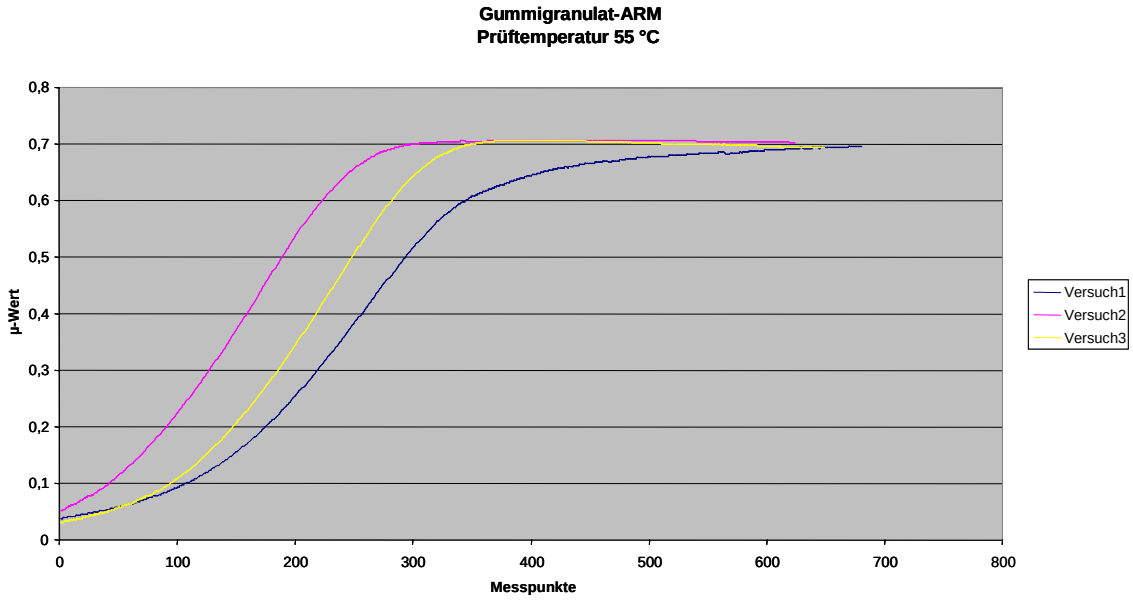


Abb. 5-13: Messschrieb der Reibbeiwerte einer Gummigranulat-ARM bei einer Prüftemperatur von 23 °C

5.4. Ermittlung von Zugfestigkeitskennwerten

Die Prüfung der Zugeigenschaften „Zugfestigkeit“, „Reißfestigkeit“ und „Reißdehung“ erfolgte für ARM ohne Gewebe nach DIN EN ISO 527 „Kunststoffe: Bestimmung der Zugeigenschaften“ bzw. der teilweise ersetzten DIN 53455. Als Prüfmaschine kam eine Frank-Universalprüfmaschine zum Einsatz. Die einzelnen Prüflinge wurden zunächst mit einem Schneidegerät abgetrennt. Dabei wurden für jede ARM 5 Prüfstreifen in Längs- und in Querrichtung zur ARM-Bahn entnommen. Für die Versuchsreihen wurden Probekörper des Typs 5 (gemäß DIN 53455) mit einer Breite von 15 mm und einer Länge von 170 mm eingesetzt und mit einer Einspannlänge von 100 mm eingespannt. Der Prüfling wurde mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min auseinander gezogen und so mit einer stetig steigenden Belastung bis zum Bruch des Probekörpers (zerstörendes Prüfverfahren) belastet. Dabei wurde die Zugkraft F bzw. die (einachsige) Zugspannung σ aufgebracht und erfasst. Diese äußere Zugbelastung bewirkte eine Dehnung ε des Prüflings. Versuchsparametrierung, Durchführung und Dokumentation erfolgten mit dem Prüfprogramm KB MatWin. Als Versuchsergebnis wurden für jeden ARM-Streifen ein normiertes Spannungs-Dehnungs-Diagramm ermittelt. Damit können Aussagen über das Material bzw. den Werkstoff getroffen werden. Die Prüfungen wurden sowohl in Längs- als auch in Querrichtung durchgeführt. Durch die Überlagerung der aufgenommenen Kurven wurde es möglich, Aussagen über die Qualität der ARM hinsichtlich ihres Zugverhaltens zu treffen.

Hinsichtlich der Zugfestigkeiten, der Reißfestigkeiten und der Reißdehnung bzw. der Zugeigenschaften unterscheiden sich die Antirutschmatten aus Gummigranulat und Vollgummi fundamental. Bei den Gummigranulatmatten ist keine ausgeprägte Abhängigkeit der Zugeigenschaften in Längs- oder Querrichtung der ARM festzustellen. Die Dicke der ARM, die Größe der Granulatkörner sowie die Bindung zwischen den Granulatpartikeln hat jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Zugeigenschaften.

Bei den Vollgummi-ARM mit textiler Armierung und bei den schaumstoffbeschichteten Gewebe-ARM ist eine ausgeprägte Abhängigkeit der Zugeigenschaften in Längs- und in Querrichtung festzustellen. Auch hierbei hat die Dicke der ARM einen wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse.

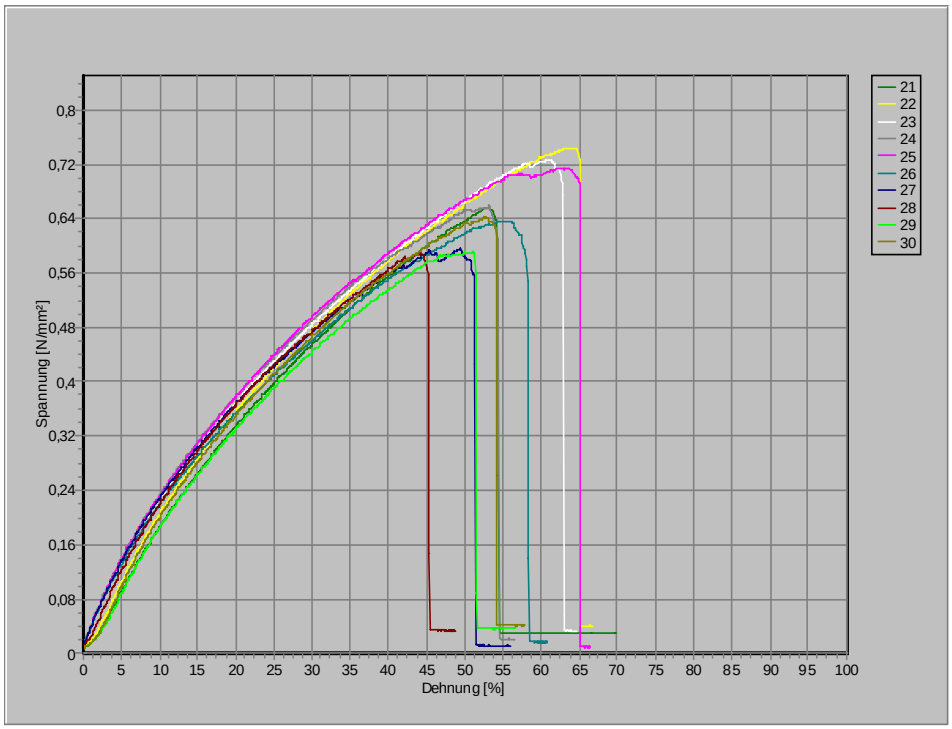


Abb. 5-14: Kraft-Weg-Diagramm einer Gummigranulat-ARM mit einer Dicke von 10 mm

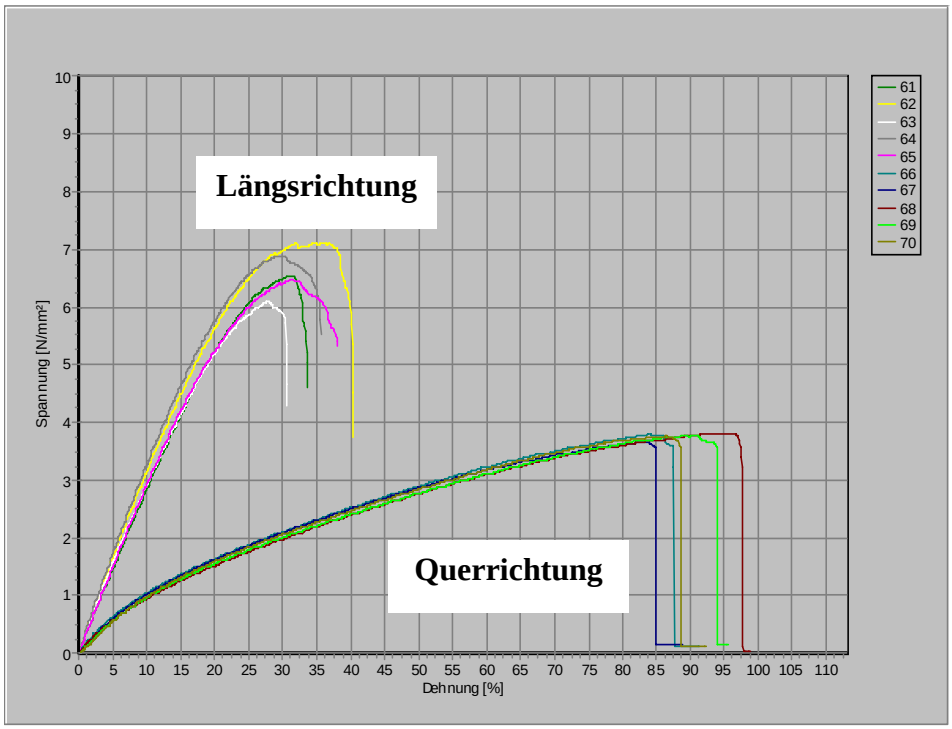


Abb. 5-15: Kraft-Weg-Diagramm einer Vollgummi-ARM mit Textilarmierung, Dicke 8,5mm

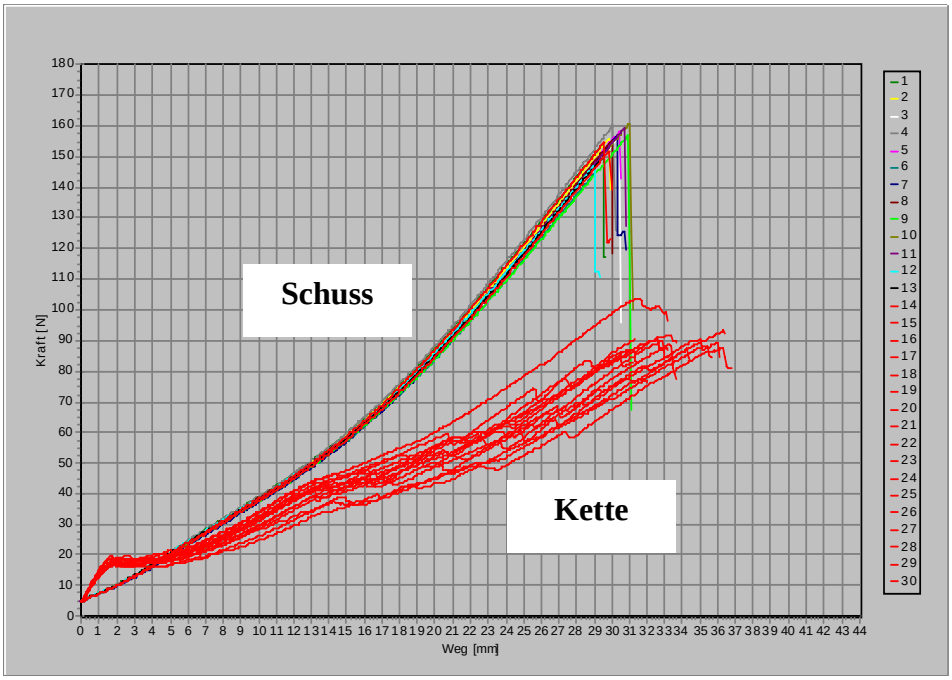


Abb. 5-16: Kraft-Weg-Diagramm einer Schaumstoffbeschichteten Gewebe-ARM mit gelochter Oberfläche, Dicke 4 mm

5.5. Ermittlung des Verschleiß-/Abriebsverhaltens

Der Prüfaufbau erfolgte gemäß des für die derzeit in Ausarbeitung befindlichen Richtlinie VDI 2700 Bl. 14 vereinbarten Prüfverfahrens. Die Prüfeinrichtung bestand wie zuvor aus einer Zug-Druck-Prüfmaschine mit Kraftmessdose und einer steifen Kraftübertragung mittels Zurrgurt. Die Steuerung und Auswertung erfolgte mittels PC-Programm. Die Prüfungen erfolgten im trockenen Zustand der Kontaktflächen. Die Messungen wurden mit einer Zuggeschwindigkeit von 100 mm/min durchgeführt. Damit das Verschleißverhalten bzw. die Abriebfestigkeit über eine längere Zeitdauer gemessen werden konnte, wurden gemäß der zuvor beschriebenen Vorgehensweise bis zu 100 Zug-Vorgänge wiederholt. Dabei wurden nach jedem Zug-Vorgang die Reibpartner angehoben, die ARM herausgenommen und von ggf. vorhandenen Abriebspartikel (deren Rollreibung würde die Messung verfälschen) gereinigt, die gereinigte ARM wieder zwischen Unterlage und Prüfkörper eingelegt und ein erneuter Zug-Vorgang gestartet.

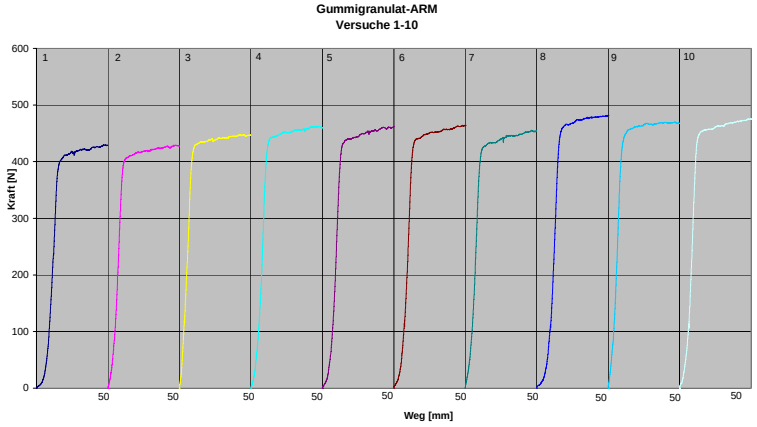


Abb. 5-17: Veränderung der Reibungskräfte einer Gummigranulat-ARM mit der Anzahl der Zugvorgänge (1-10 Zugvorgänge)

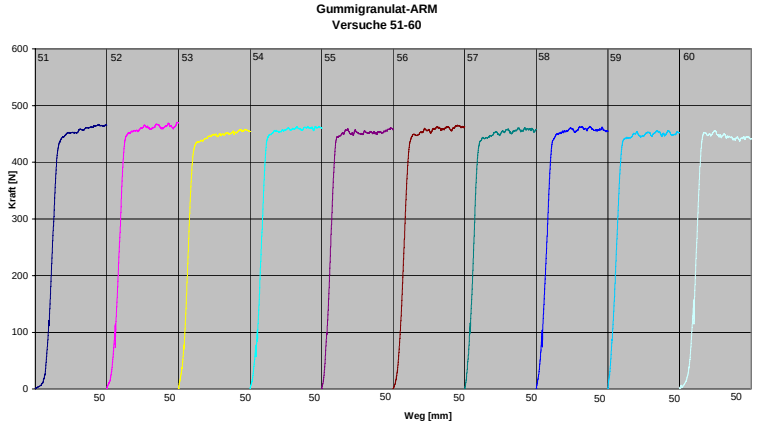


Abb. 5-18: Veränderung der Reibungskräfte einer Gummigranulat-ARM mit der Anzahl der Zugvorgänge (51-60 Zugvorgänge)

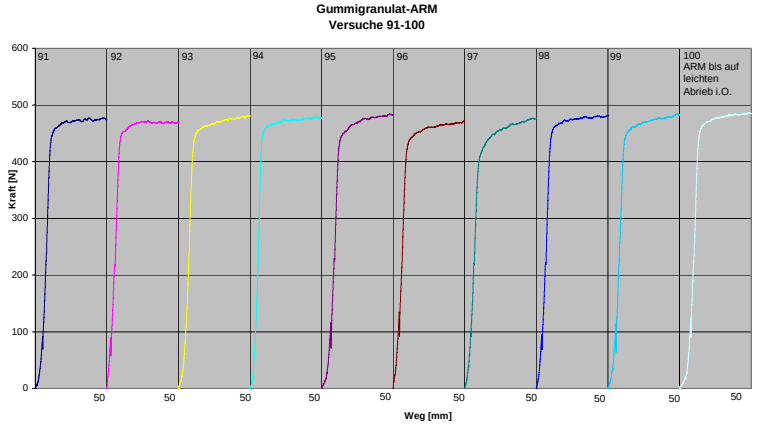


Abb. 5-19: Veränderung der Reibungskräfte einer Gummigranulat-ARM mit der Anzahl der Zugvorgänge (91-100 Zugvorgänge)

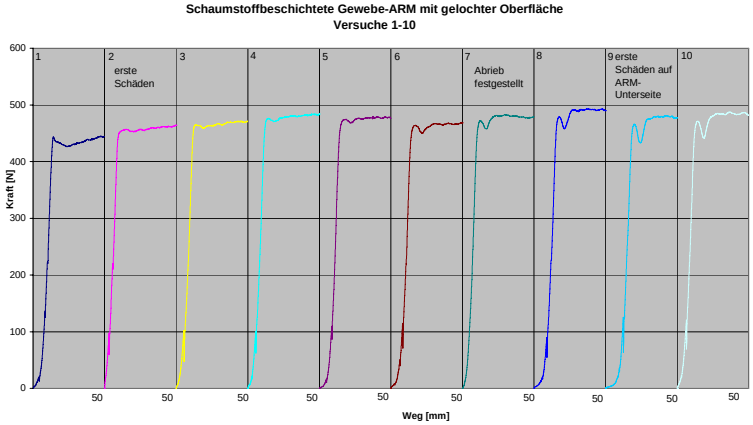


Abb. 5-20: Veränderung der Reibungskräfte einer schaumstoffbeschichteten Gewebe-ARM mit gelochter Oberfläche mit der Anzahl der Zugvorgänge (1-10 Zugvorgänge)

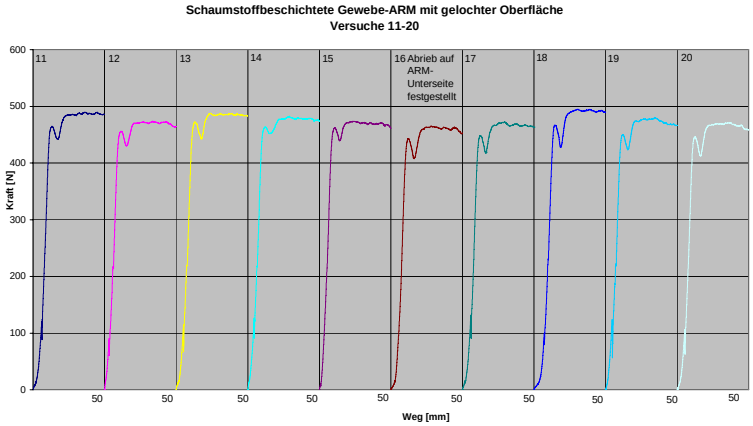


Abb. 5-21: Veränderung der Reibungskräfte einer schaumstoffbeschichteten Gewebe-ARM mit gelochter Oberfläche mit der Anzahl der Zugvorgänge (11-20 Zugvorgänge)

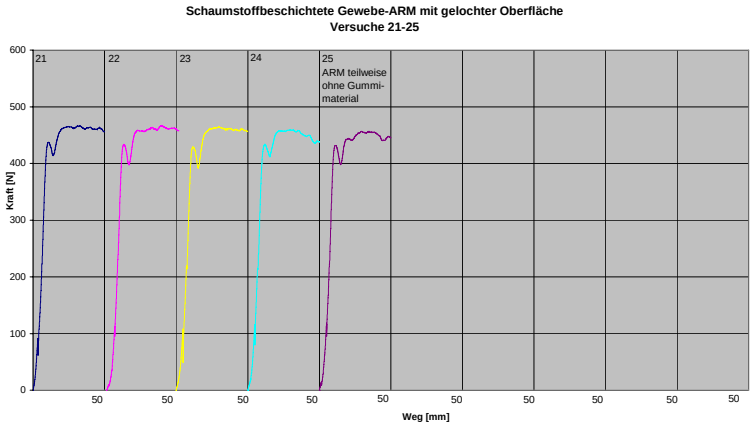


Abb. 5-22: Veränderung der Reibungskräfte einer schaumstoffbeschichteten Gewebe-ARM mit gelochter Oberfläche mit der Anzahl der Zugvorgänge (21-25 Zugvorgänge)

Sowohl die ausgewählten Gummigranulat-ARM (vgl. Abb. 5-17 bis Abb. 5-19) als auch die Vollgummi-ARM ließen nach 100 Zug-Vorgängen keine signifikanten Veränderungen der gemessenen Zugkräfte bzw. Reibungskräfte erkennen.

Die schaumstoffbeschichteten Gewebe-ARM zeigten jedoch schon nach 25 Zug-Vorgängen eindeutige Verschleißspuren, die jedoch keinen nachteiligen Einfluss auf die Reibbeiwerte hatten (vgl. Abb. 5-20 bis Abb. 5-22).

Sowohl bei den Gummigranulat-ARM als auch bei den schaumstoffbeschichteten Gewebe-ARM waren optische Verschleißerscheinungen wie beispielsweise heraus gebrochene Granulatpartikel oder Abriebspuren zu erkennen, die jedoch keinen merklichen Einfluss auf die Messergebnisse hatten. Als Grund hierfür ist festzuhalten, dass die wirksamen Gummibestandteile auch bei partiellem Abrieb in den Kontaktflächen wirksam sind. (Ein Verschleiß, der durch Abtragen der „Gummi-Oberfläche“ bis auf die textile Struktur gekennzeichnet ist, ist im Rahmen dieser Untersuchungen nicht erfolgt.)

5.6. Ermittlung von Kennwerten für die chemische Beständigkeit gegenüber ausgewählten Betriebsstoffen

In Anlehnung an vergleichbare Untersuchungen ist die Beständigkeit von ausgewählten ARM gegen Verunreinigung mit ausgewählten Betriebsstoffen ermittelt worden. Da frühere Untersuchungen aufgezeigt haben, dass aufgrund der Formänderung von runden Prüfmustern möglicherweise Messungenauigkeiten auftreten können, sind für die anstehenden Untersuchungen quadratische Prüfmuster in den Abmessungen 41 mm x 41 mm ausgeschnitten worden. Für jede Kombination ARM-Betriebsstoff sind 4 Prüfmuster gefertigt worden, so dass Messfehler aufgrund einzelner Fehlmessungen reduziert werden konnten. Als Betriebsstoffe, die durch ihre chemischen Reaktionen mit den Werkstoffen der o. a. ARM ggf. die Gebrauchseigenschaften der ARM nachteilig beeinflussen können, standen Folgende zur Verfügung:

- (F-54) Dieselkraftstoff,
- O-236 Schmieröl; Verbrennungsmotor; SAE 15W-40,
- O-1178 Schmieröl; Verbrennungsmotor; SAE 5W-30,
- H-542 Bremsflüssigkeit,

- H 515 Hydraulikflüssigkeit,
- G-421 Schmierfett, Wälzlagerfett,
- (S-738) Ethanol, denaturiert und
- Venno-Vet 1 super Desinfektionsmittel; 1%-Konzentration in Wasser.

Die 4 Prüfmuster der ARM wurden in die Betriebsflüssigkeiten, die in verschließbaren Glasgefäßen eingefüllt waren, eingelegt. Die Prüfmuster sind in vorgegebenen Zeitabständen den Betriebsstoffen entnommen, manuell gereinigt, deren Länge, Breite und Dicke gemessen, deren Biegeeigenschaften manuell festgestellt sowie der optische Eindruck dokumentiert worden. Als Messzeitpunkte sind zunächst 1-stündige und weiterhin 1-tägige Messintervalle gewählt worden. Dadurch konnte insbesondere das reale Belastungsspektrum einer Kontamination von ARM mit diesen Betriebsstoffen simuliert werden.

Die Abtastung der Längen und Breiten erfolgte mittels eines Messschiebers, dessen Ablesefehler und Messgenauigkeit durch die 4-fache Messung an jedem Prüfmuster reduziert worden sind. Die Messung der ARM-Dicke für jeweils 4 Prüfmuster erfolgte mittels eines digitalen Dickenmessgerätes.

Nach den Messungen sind die Prüfmuster manuell gebogen worden, wobei auf Schädigungen der Prüfmuster wie beispielsweise Anrisse oder Sprödbrüche geachtet worden ist.

Weiterhin sind die sichtbaren Veränderungen an den Prüfobjekten sowie den Betriebsstoffen erfasst worden.

Bei der Auswertung der Diagramme, die die maßliche Veränderung der ARM-Prüfmuster infolge des Kontaktes mit dem jeweiligen Betriebsstoff darstellen, ist auf die nicht maßstabsgerechte Unterteilung der Zeitachse zu achten.

Es ist festzustellen, dass die Gummigranulat-ARM, 10 mm dick, schwarz-blau, sofort nach Einlegen in die Betriebsflüssigkeiten H-515-Hydraulikflüssigkeit und Dieselkraftstoff beginnt, aufzuquellen, bis nach ca. 24 Stunden ein nur noch geringfügig steigendes Niveau erreicht wird. Davon sind alle drei Dimensionen betroffen. Mit zunehmender Dauer der Verunreinigungsbelastung ist festzustellen, dass schon Biegungen der Prüfmuster von ca. 90° zu ersten Anrissen oder gar zu schnellen Sprödbrüchen führen.

Dabei zeigt sich, dass nahezu die gesamte Querschnittsfläche im Bruchbereich sichtbar durchfeuchtet ist.

Im Unterschied zu den Gummigranulat-ARM erweisen sich die Vollgummi-ARM als vergleichsweise beständig. Ihre maßliche Veränderung beginnt, sofern sie in einem erkennbaren Maß erfolgt, erst nach mehreren Stunden einer Belastung durch die Betriebsstoffe. Dabei scheint sich das „Gummi“ vergleichsweise unkritisch zu verhalten, vielmehr scheinen die in die Gummimasse eingebetteten textilen Fäden die Betriebsstoffe aufzunehmen. Dadurch erhalten die Vollgummi-ARM nach längerer Belastungsdauer eine höhere Steifigkeit; die Biegefähigkeit wird reduziert. Risse konnten bei den Biegeprüfungen nicht festgestellt werden. Auch das optische Erscheinungsbild der Vollgummi-ARM wurde in keinem Fall eindeutig verändert.

Die 1%-Lösung des Desinfektionsmittels Venno-Vet zeigte schon nach 1 Stunde eine wolkig-weiße Verfärbung bei allen ARM-Prüfmustern, wobei die Intensität bei den Gummigranulat-ARM stärker ausgeprägt war. Nach mehreren Tagen reduzierte sich die weißliche Verfärbung wieder; dafür schwebten schwarze Feinstpartikel in der Flüssigkeit. Weitere Veränderungen konnten nicht festgestellt werden.

Das Ethanol verfärbte sich durch das Gummigranulat sofort nach einer Stunde sichtlich, indem es eine zunächst hellbraune, später intensiv braune Färbung annahm.

Durch den Kontakt mit den Vollgummi-ARM verfärbte sich Ethanol gelblich, wobei die Intensität der Verfärbung gering war.

Die weiteren Betriebsstoffe zeigten lediglich geringfügige farbliche Veränderungen. Schleimbildung, Ausflockungen etc. wurden in keinem Fall beobachtet.

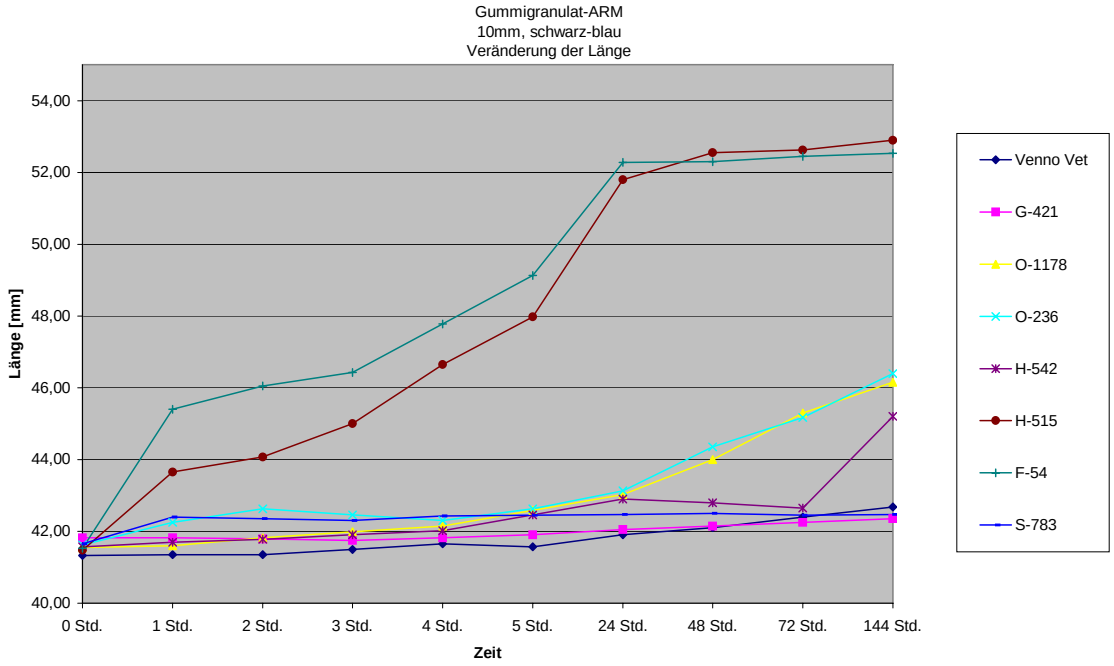


Abb. 5-23: Veränderung der Länge von Gummigranulat-ARM aufgrund der Belastung mit unterschiedlichen Betriebsstoffen

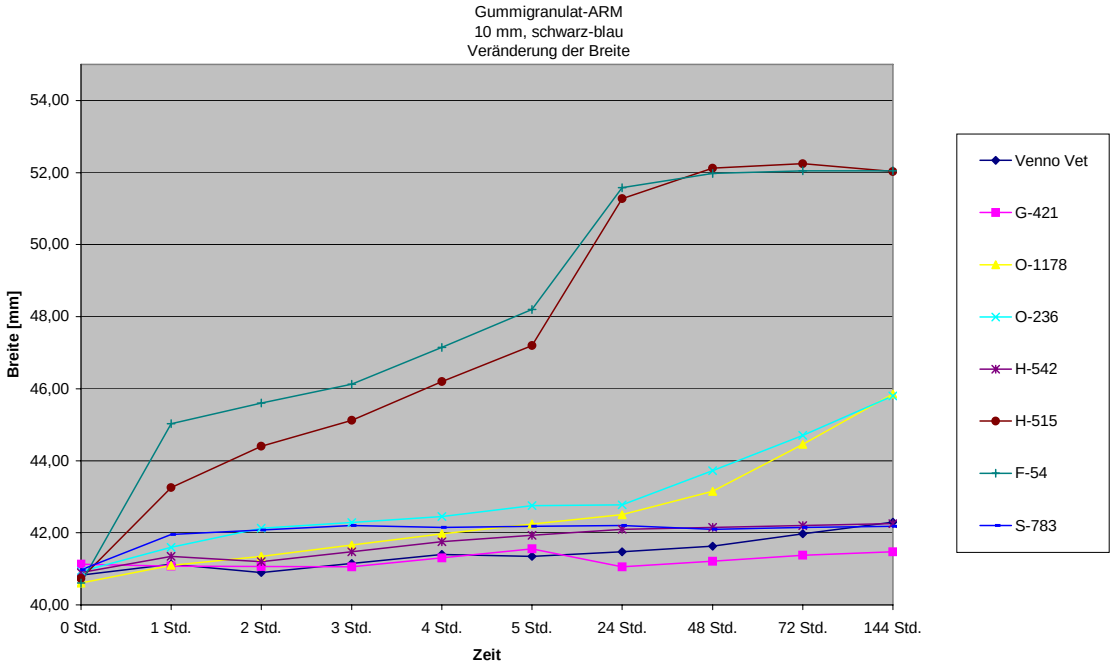


Abb. 5-24: Veränderung der Breite von Gummigranulat-ARM aufgrund der Belastung mit unterschiedlichen Betriebsstoffen

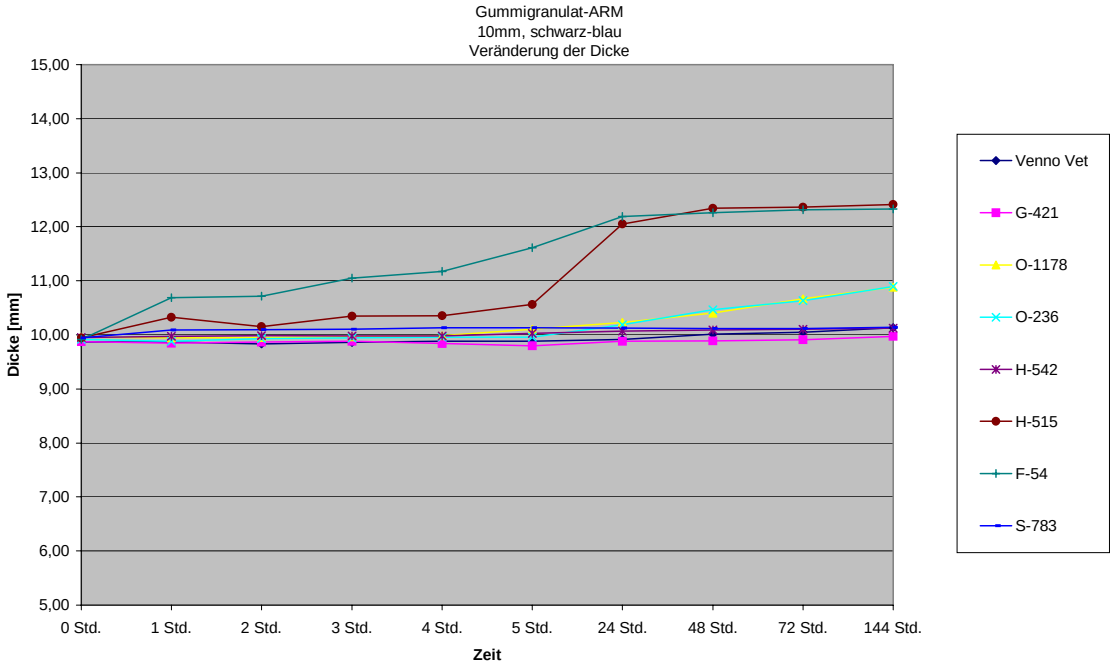


Abb. 5-25: Veränderung der Dicke von Gummigranulat-ARM aufgrund der Belastung mit unterschiedlichen Betriebsstoffen

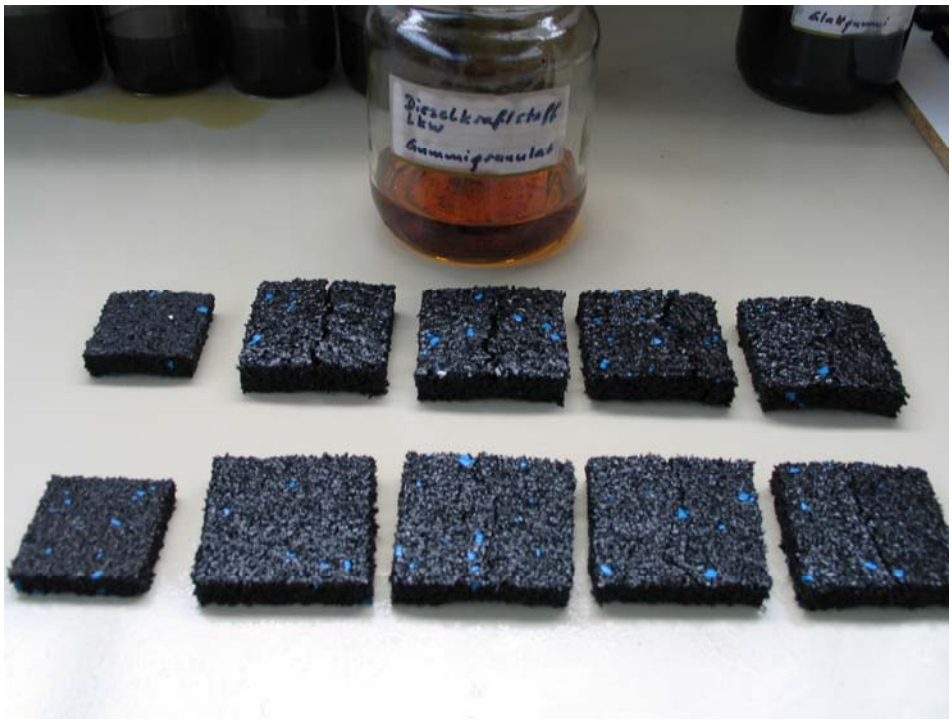


Abb. 5-26: Bruchschäden aufgrund einer Biegeprüfung nach einer Belastung mit unterschiedlichen Betriebsstoffen

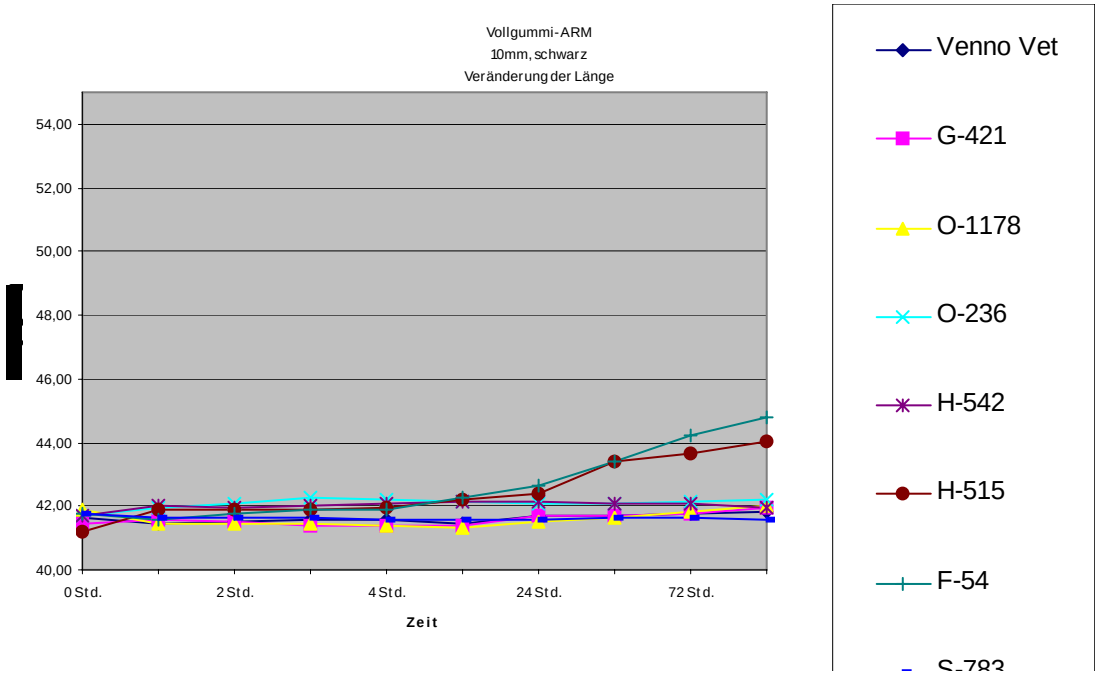


Abb. 5-27: Veränderung der Länge von Vollgummi-ARM aufgrund der Belastung mit unterschiedlichen Betriebsstoffen

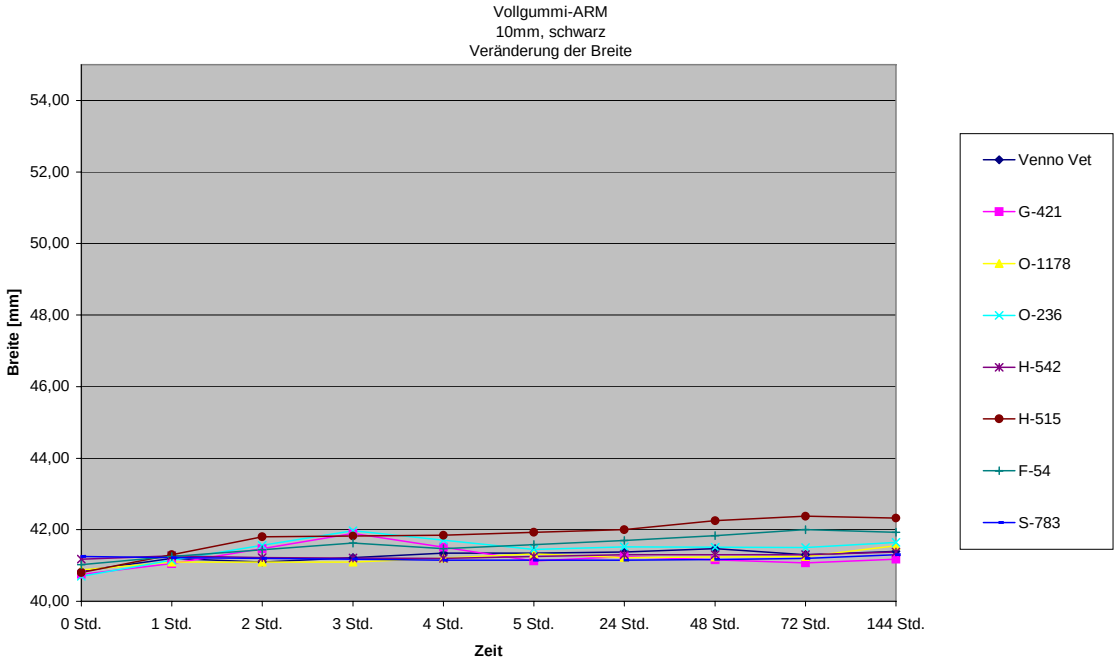


Abb. 5-28: Veränderung der Breite von Vollgummi-ARM aufgrund der Belastung mit unterschiedlichen Betriebsstoffen

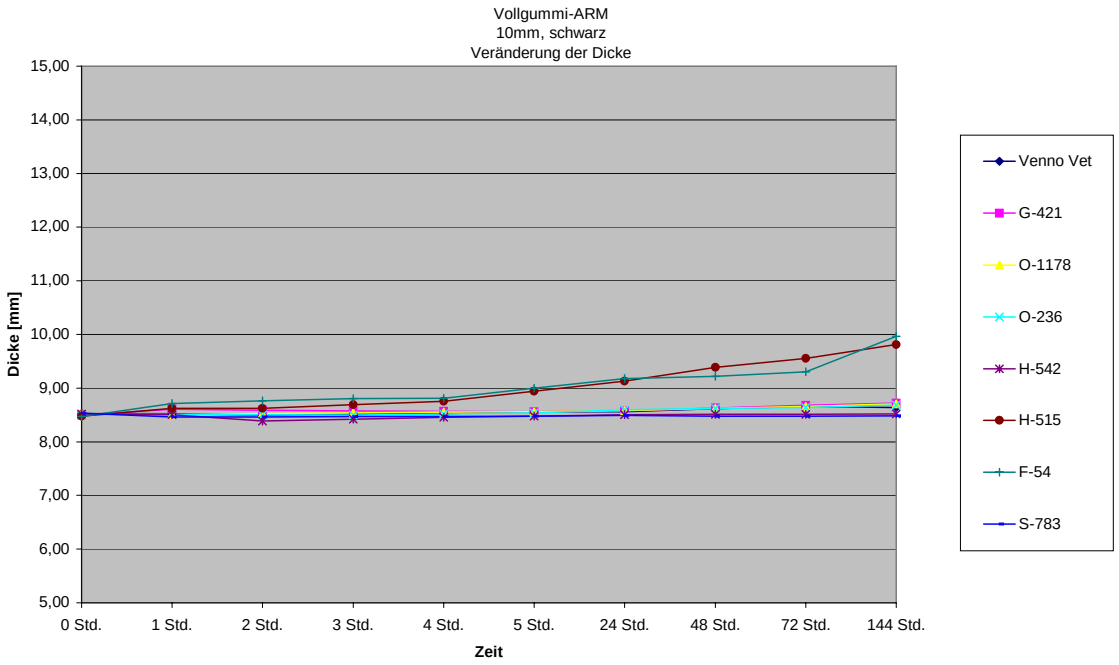


Abb. 5-29: Veränderung der Dicke von Vollgummi-ARM aufgrund der Belastung mit unterschiedlichen Betriebsstoffen

Abb. 5-30: Keine sichtbaren Bruchschäden aufgrund einer Biegeprüfung nach einer Belastung mit unterschiedlichen Betriebsstoffen

5.7. Ermittlung von Reibbeiwerten in dynamischen Systemen

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 4 dargestellten Reibungsvorgänge ist klar, dass insbesondere vertikal wirkende Kräfte aufgrund von Stößen oder Schwingungen die Reibungskräfte beeinflussen müssen.

Als Vergleichsbasis soll die Abbildung 5-31 den Reibbeiwert-Verlauf eines ruhenden Reibungssystems abbilden.

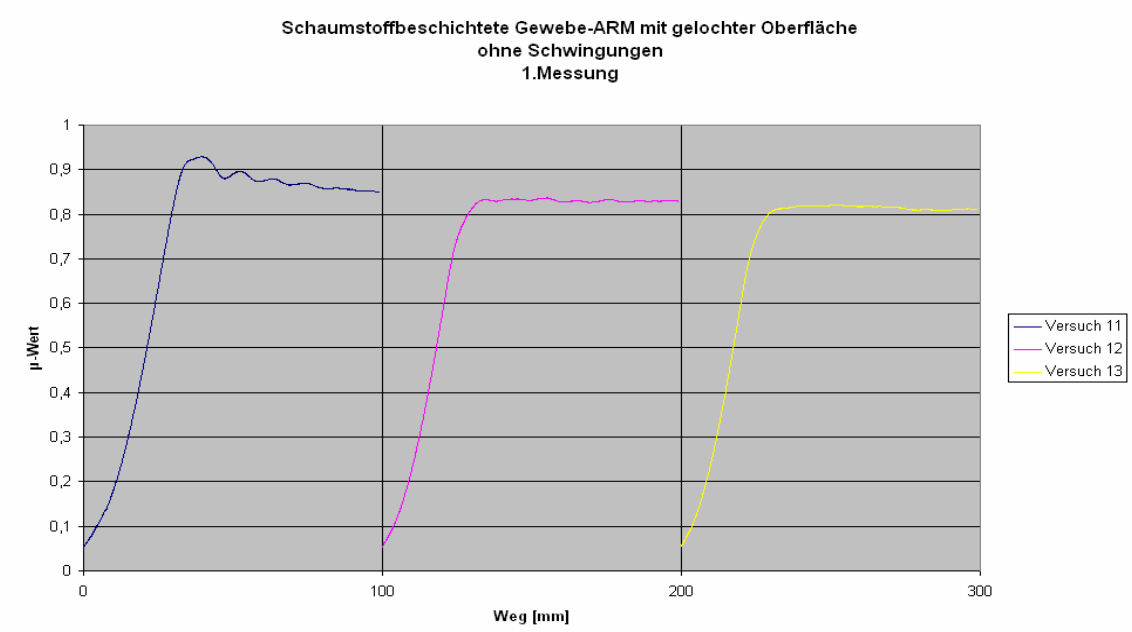


Abb. 5-31: Messschrieb der Reibbeiwerte in einem ruhenden System

Bei Anregung dieses Reibungssystems durch mehrere, mit größerem Zeitabstand aufeinander folgende Einzelstöße, die eine zwischenzeitliche Beruhigung des Systems ermöglichten, ist festzustellen, dass im Moment der vertikalen Stöße der Gleitreibbeiwert $\mu_{G\ Ruhe} = 0{,}75$ auf $\mu_{G\ Stoß} = 0{,}10$ reduziert wird. Mit zunehmender Stoßfrequenz gelangt das Reibungssystem nicht mehr in Ruhe und ist durch „stick-slip"-ähnliche Reibbeiwert-Verläufe auf niedrigem Niveau gekennzeichnet. Auffällig ist, dass bei aufwärtsgerichteter Stoßwirkung kein entsprechender Effekt bezüglich der Reibbeiwerte festzustellen ist.

In einem schwingenden Reibungssystem (Schwingungsprofil gemäß ASTM 4728 D) sind Reibbeiwert-Verläufe nach bekanntem „Muster" nicht messbar.

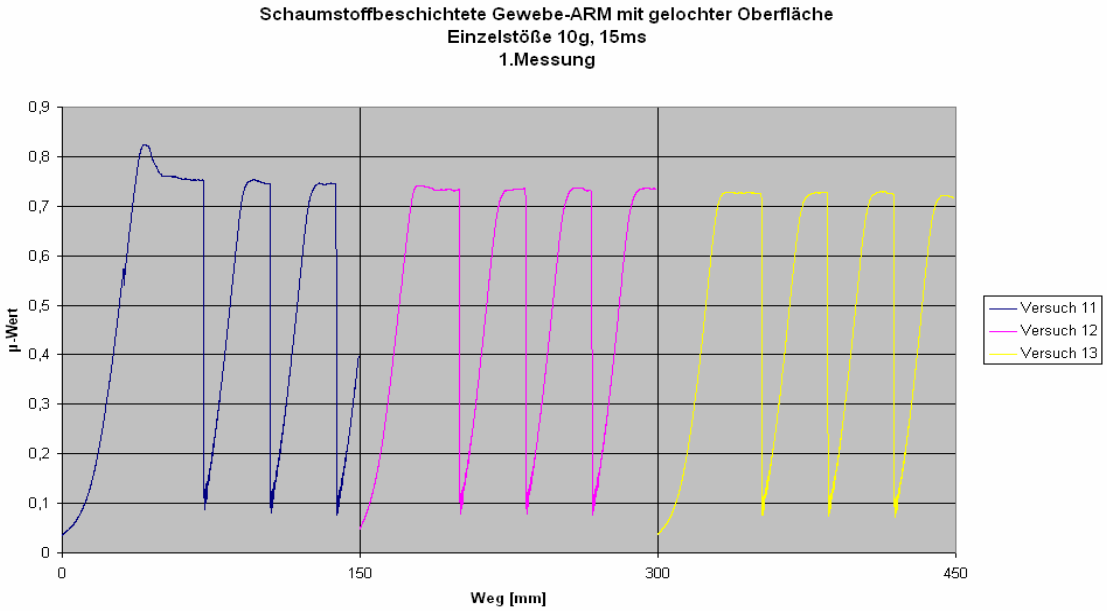


Abb. 5-32: Messschrieb der Reibbeiwerte bei einer Stoßanregung mit ruhenden Zwischenphasen

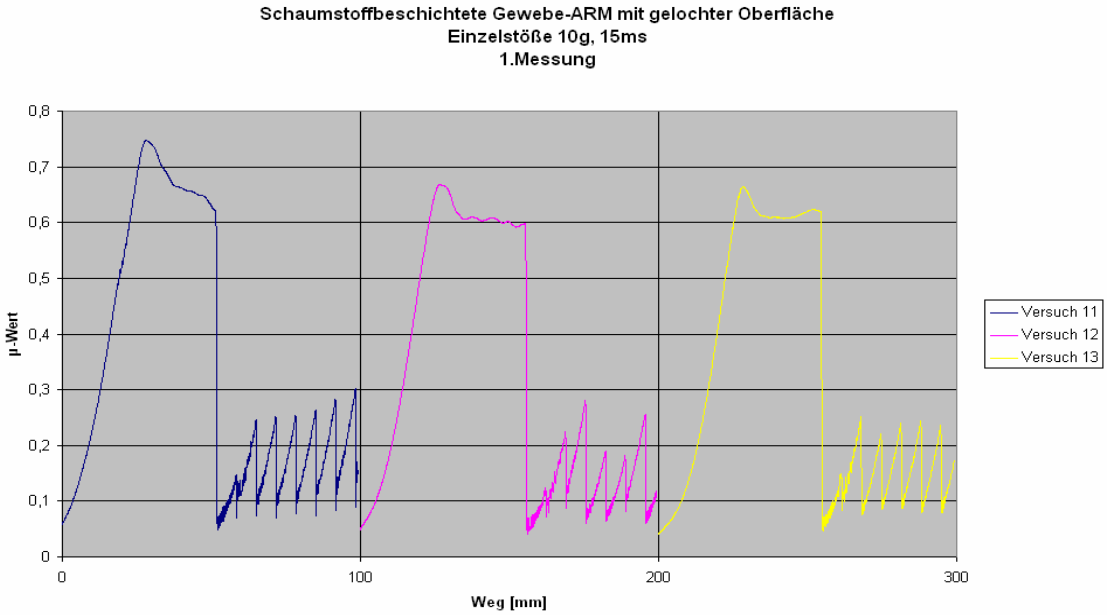


Abb. 5-33: Messschrieb der Reibbeiwerte bei einer Stoßanregung ohne ruhende Zwischenphasen

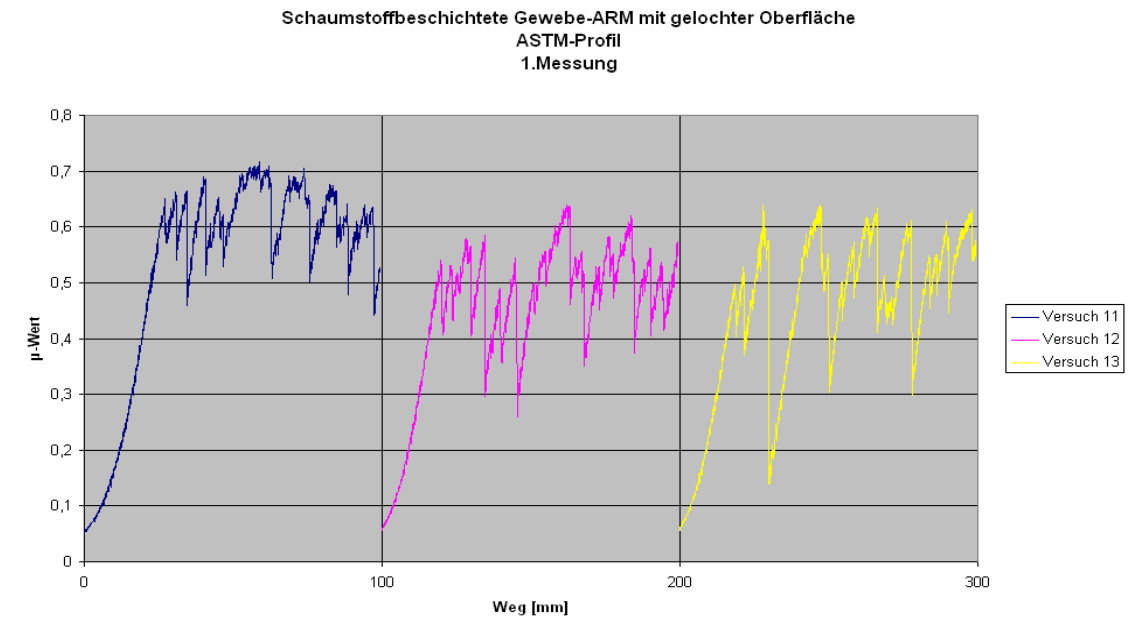


Abb. 5-34: Messschrieb der Reibbeiwerte bei einer andauernden Schwingungsanregung

6. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Sicherung von Ladegütern nehmen die Reibungskräfte eine entscheidende Rolle ein und tragen dazu bei, Güter auf dem Transportmittel zu fixieren. Ein Hilfsmittel zur Erhöhung der wirksamen Reibungskräfte sind rutschhemmende Materialien, insbesondere Antirutschmatten, die bevorzugt bei der Ladungssicherung eingesetzt werden. Es zeigt sich jedoch, dass gerade der Einsatz von ARM aufgrund vielfältiger Einflüsse nicht einfach ist.

So konnte mit dieser Forschungsarbeit nachgewiesen werden, dass der wichtigste Kennwert von ARM, der Gleitreibbeiwert, von vielen Umgebungsparametern beeinflusst wird und in keinem Fall als allgemeingültiger Kennwert angesehen werden darf.

Zu diesen umgebungsbedingten Einflussgrößen zählen beispielsweise:

- die Oberflächenrauhigkeiten von Ladegut, Antirutschmatte und Ladefläche,
- die Welligkeit bzw. Profilierung der Oberflächen von Ladegut und Ladefläche,
- die Festigkeit der jeweiligen Materialien,
- das Verhältnis zwischen den vertikal wirkenden Kräften und den Kontaktflächen von Ladegut, Antirutschmatte und Ladefläche,
- die Größe und Art vorhandener Verschiebe- bzw. Bewegungskräfte,
- die Größe und Art von dynamischen Stößen und Schwingungen in horizontaler und vertikaler Richtung,
- das Vorhandensein von gleit fördernden bzw. -hemmenden Mitteln sowie
- die Temperatur im Laderaum.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit fließen in das VDI-Richtlinienwerk – insbesondere die Richtlinie VDI 2700 Bl. 14 „Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen - Verfahren zur Ermittlung von Reibbeiwerten“ und VDI 2700 Bl. 15 „Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Rutschhemmende Materialien“ ein. Dadurch wird der Transfer der Forschungsergebnisse in eine breit gestreute industrielle Anwendung unterstützt.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Damit ist es Möglich, ARM als verlässliche Ladungssicherungshilfsmittel auszuweisen, ihre Eigenschaften zu kennzeichnen und sie berechenbar einzusetzen.

Die Forschungsarbeit hat jedoch nachdrücklich gezeigt, dass die Zugrundelegung einer Reibungstheorie, die ausschließlich quasistatische Reibungssysteme betrachtet sowie das Heranziehen von Prüfverfahren, bei denen im Wesentlichen Qualitätskriterien für ARM in quasistatischen Prüfungen ermittelt werden, nur sehr bedingt die tatsächlichen Reibungsmechanismen von Ladegütern im Transportprozess erklären können.

Lediglich die Vorsicht, ausschließlich die kleinsten gemessenen Gleitreibbeiwerte für die jeweiligen Reibungspartner für die Berechnung von Ladungssicherungskräften heranzuziehen und weiterhin eine wirksame Niederzurrung oder ergänzende Schutzmaßnahmen zu fordern, führt in Kombination damit, dass der dynamische Einfluss auf das Gleiten bzw. das Verrutschen von Ladegütern lediglich kurzzeitig wirksam ist, dazu ,dass der derzeitige Zustand tolerabel ist.

Vor dem Hintergrund einer zuverlässigen und optimierten Ladungssicherung ist es jedoch angebracht, die Beschreibung eines mathematischen Berechnungsalgorithmus zur Berechnung der momentan wirksamen Reibungskräfte in dynamischen Systemen in weitergehenden Untersuchungen anzugehen.

Weitergehende Informationen zu den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit können an der Forschungsstelle nachgefragt werden.