

Kässbohrer
Driven by professionals®



Grundlagenforschung Ladungssicherung

(PKW- und LKW-Transporte)

**Ermittlung von Reibbeiwerten
von Reifen auf Fahrbahnelementen
von Fahrzeugtransporten**

TÜV SÜD Auto Service GmbH

Kässbohrer Transport Technik GmbH

München, Eugendorf, im Juni 2016

Das Forschungsvorhaben „*Ladungssicherung (PKW- und LKW-Transporte): Ermittlung von Reibbeiwerten von Reifen auf Fahrbahnelementen von Fahrzeugtransportern*“ wurde 2015 von der TÜV SÜD Auto Service GmbH in Kooperation mit der Kässbohrer Transport Technik GmbH initiiert und durchgeführt. Diese Maßnahme wurde zu 100% eigenfinanziert. Dieser Ergebnisbericht beschreibt den Anlass, die Eckdaten und die empirisch gewonnenen Erkenntnisse.

Für Detailanfragen und eigene Versuche auf der Basis dieser Maßnahme steht Ihnen der Herausgeber dieses Ergebnisberichtes als Ansprechpartner zur Verfügung.

Alle Texte und Illustrationen (soweit nicht anders angegeben) © Kässbohrer Transport Technik GmbH, TÜV SÜD Auto Service GmbH, 2016.

Übersetzung, Nachdruck und Vervielfältigung sowie die Verwertung oder Verarbeitung in elektronischen Systemen bedarf der ausdrücklichen, schriftlichen Genehmigung des Herausgebers.

Die Informationen in dieser Broschüre sind sorgfältig erhoben und geprüft worden. Dennoch kann keine Garantie für die Richtigkeit übernommen werden. Eine Haftung der Autoren bzw. des Herausgebers und seiner Beauftragten für Personen-, Sach- und Vermögensschäden ist ausgeschlossen.

Ausgabe 1 vom 30. Juni 2016

Impressum

Kässbohrer Transport Technik GmbH
Gewerbestraße 30
5301 Eugendorf
Austria

Tel. +43 (0)6225 28 100-0
Fax: +43 (0)6225 28 100-378

www.kaessbohrer.at
office@kaessbohrer.at



TÜV SÜD Auto Service GmbH
Westendstraße 199
80686 München
Deutschland

Tel. +49 (0)89 5791 2046
Fax +49 (0)89 5155 1788

www.tuev-sued.de
info@tuev-sued.de



Inhaltsverzeichnis

Tabellen- und Diagramm-Verzeichnis.....	2
Formelverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis.....	4
1. Anlass und Ziel der Untersuchung	7
2. Projektgesellschaften.....	8
3. Grundlagen.....	9
3.1. Definition der Fachterminologien	9
3.1.1. Zurrverfahren allgemein.....	9
3.1.2. Ladungssicherung auf PKW- / LKW - Transportern	10
3.1.3. Reibungsarten	12
3.1.4. Allgemeine physikalische Grundlagen	14
3.1.5. Grundlagen der Ladungssicherung.....	18
3.2. Praktische Tests	20
4. Voruntersuchung	21
4.1. Abrutschtest eines Fahrzeuges im November 2014.....	21
4.1.1. Prüfaufbau.....	22
4.1.2. Details	23
4.1.3. Fazit	25
5. Hauptuntersuchung	26
5.1. Empirische Ermittlung von Reibbeiwerten im Herbst 2015.....	26
5.1.1. Untersuchungsumfang und Ziel	26
5.1.2. Auswahl der Versuchs – Objekte.....	26
5.1.3. Prüfschritt: Vorbereitung	31
5.1.4. Prüfschritt: Durchführung	32
5.1.5. Definition der Reifen – Prüfkriterien	34
5.1.6. Prüfschritt Auswertung.....	38
5.1.7. Übersichtsexzerpt der wichtigsten Ergebnisse aus der Evaluierungsphase zu den GRW-Beiwerten.....	41
6. Analyse und nächste Schritte	43
7. Literaturverzeichnis.....	44
Danksagung	45

Tabellen- und Diagramm-Verzeichnis

<i>Tabelle / Diagramm 1: Gewichtskraft kg und N.....</i>	19
<i>Tabelle / Diagramm 2: Neigungswinkel und Reibbeiwerte im Abrutschtest.....</i>	21
<i>Tabelle / Diagramm 3: Neigungswinkel für Rutschbeginn.....</i>	23
<i>Tabelle / Diagramm 4: Datenblatt der Auswertung – 1 Messung.....</i>	38
<i>Tabelle / Diagramm 5: Empirische Testergebnisse.....</i>	41
<i>Tabelle / Diagramm 6: Auswertung einer Messung mit 3 Hüben</i>	42

Formelverzeichnis

Größe		Einheit	
Name	Formelzeichen	Name	Zeichen
Beschleunigung / Verzögerung	a	Meter/Sekunde ²	m/s ²
Bremskraft	F_{Brems}	Newton	N
Erdbeschleunigung	g	Meter/Sekunde ²	m/s ²
Geschwindigkeit	v	Meter/Sekunde	m/s
Gewichtskraft	F_G	Newton	N
Gleit-Reib-Widerstandsbeiwert	μ_{GRW}	(dimensionslos)	1
Haftreibungswinkel	ϱ	Grad	°
Kraft	F	Newton	N
Masse	m	Kilogramm	kg
Massenkraft (Trägheitskraft)	F_M	Newton	N
Normalkraft	F_N	Newton	N
Radius	r	Meter	m
Reibbeiwert	μ	(dimensionslos)	1
Reibkraft	F_R	Newton	N
Resultierende Kraft	F_{res}	Newton	N
Sicherungskraft	$F_{Sicherung}$	Newton	N
Tangentialkraft	F_T	Newton	N
Winkel	α	Grad	°
Winkelgeschwindigkeit	ω	radius/Sekunde	s ⁻¹
Zentrifugalkraft	F_{ZF}	Newton	N

Formel 1: Reibungskraft	12
Formel 2: Gewichtskraft.....	14
Formel 3: Normalkraft, Tangentialkraft	15
Formel 3: Haltekraft.....	15
Formel 4: Massenkraft.....	16
Formel 5: Zentrifugalkraft	16
Formel 6: Tangentialkraft.....	17
Formel 7: Resultierende Kraft.....	17
Formel 8: Sicherungskraft	19
Formel 9: Reibungszahl.....	20
Formel 10: Herleitung Zahlenäquivalent.....	36

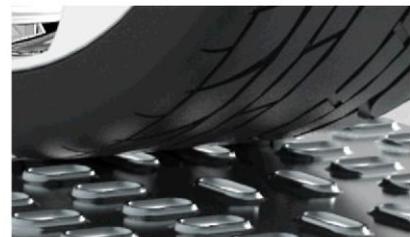
Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kraftschluss.....	9
Abbildung 2: Formschluss durch geprüften Aufbau gemäß EN 12642 / durch Kopflashing.....	9
Abbildung 3: Kombinierte Sicherung (Formschluss und Kraftschluss).....	9
Abbildung 4: Zulässige 3-Punkt-Sicherung.....	11
Abbildung 5: Zulässige 4-Punkt-Sicherung.....	11
Abbildung 6: Zulässige 3-Punkt-Sicherung in Mulde.....	11
Abbildung 7: Unzulässige Schlingensicherung.....	11
Abbildung 8: Unzulässige Schlaufensicherung.....	11
Abbildung 9: Kontaktbereich glatt / Kontaktbereich rau / Kontaktbereich Reifen - Fahrbahnblech.....	12
Abbildung 10: Kräftesystem.....	14
Abbildung 11: Gewichtskraft F_G	14
Abbildung 12: Haltekraft F	15
Abbildung 13: Massenkraft F_M	16
Abbildung 14: Zentrifugalkraft F_{ZF}	16
Abbildung 15: Tangentialkraft F_T	17
Abbildung 16: Gewichtskräfte im Fahrbetrieb.....	18
Abbildung 17: Sicherungsbedarf im Fahrbetrieb.....	19
Abbildung 18: Freigemachter Prüfkörper.....	20
Abbildung 19: Kraftteck.....	20
Abbildung 20: Ermittlung der Haftreibung.....	20
Abbildung 21: Prüfanordnung mit Fahrzeug.....	22
Abbildung 22: Winkelposition.....	24
Abbildung 23: „Kässbohrer - Urblech“.....	27
Abbildung 24: Beispiel: Fahrbahnblech.....	27
Abbildung 25: Prüfstand.....	28
Abbildung 26: Hydraulikaggregat #1; Hydraulikaggregat #2.....	29
Abbildung 27: Steuereinheit; Reifengabel.....	29
Abbildung 28: Aufbau des Prüfstandes.....	30
Abbildung 29: Messkomponenten Zylinder vertikal.....	33
Abbildung 30: Messkomponenten Zylinder horizontal.....	33
Abbildung 31: Messkomponenten horizontaler Weg.....	34
Abbildung 32: Zahlenäquivalent.....	36

Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen

AUVA	Allgemeine Unfallversicherungsanstalt Österreich
CEN	Comité Européen de Normalisation / Europäisches Komitee für Standardisierung
DEKRA	Deutscher Kraftfahrzeug-Überwachungs-Verein
EN	Europäische Norm
LKW	Lastkraftwagen
PKW	Personenkraftwagen
NFZ	Nutzfahrzeug
TÜV	Technischer Überwachungsverein e.V.
VDI	Verband Deutscher Ingenieure

Wer kennt den Reibbeiwert?



1. Anlass und Ziel der Untersuchung

Die Bestimmungen zur Ladungssicherung sind allgemein in der EN 12195-1 (CEN – Comité Européen de Normalisation / Europäisches Komitee für Standardisierung) definiert.

Diese definiert ausschließlich Reibbeiwerte für Objekte auf ebenen Oberflächen, z.B. für Gummi auf Stahl. Diese Annahmen und Kalkulationen sind für die Reibbeiwerte, die beim Transport von Fahrzeugen mit Profilreifen auf geprägten Fahrbahnschienen auftreten, nicht anwendbar.

Vor dem genannten Hintergrund sind alle bis dato ausgeführten rechnerischen Auslegungen in Frage zu stellen!

Die VDI – Richtlinie 2700 (Blatt 8.1) (Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2009) präzisiert die Sicherung von PKW und leichten Nutzfahrzeugen auf Fahrzeugtransportern wie sie von Kässbohrer Transport Technik GmbH in Verkehr gebracht werden. Sie beschreibt die Art und Anzahl der Sicherungsmittel für die typischen Beladesituationen auf Fahrzeugtransportern und bezieht sich für die rechnerische Herleitung dieser Vorschriften auf Abschnitt 1 und 2 der Richtlinie. Diese Abschnitte kennen aber ebenso wie die EN 12195-1: 2010 / AC: 2014 nicht den spezifischen Reibbeiwert zwischen Profilreifen und geprägten Fahrbahnschienen.

Dasselbe Problem liegt bei Blatt 8.2 der VDI – Richtlinie 2700 (Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2010) vor, welches sich auf den Transport von LKW-Fahrgestellen, Sattelzugmaschinen und Traktoren bezieht.

Die Forschungs- und Entwicklungs-Abteilung der Kässbohrer Transport Technik GmbH und die Fachgruppe „Ladungssicherung“ der TÜV SÜD Auto Service GmbH sind davon ausgegangen, dass die Annahmen der genannten Regelwerke so deutlich von den eigenen Erfahrungswerten abweichen, das durch eine eigene Untersuchung praxisgerechte Reibbeiwerte und Kenntnisse ermittelt und öffentlich zur Diskussion gestellt werden sollten.

Nach Evaluation und Veröffentlichung in der Fachpresse sollen die Untersuchungsergebnisse in die offiziellen Richtlinien aufgenommen werden.

2. Projektgesellschaften

TÜV SÜD Auto Service GmbH, München, vertreten durch Herrn Dipl.-Ing. (FH) Markus Otremba (Leiter der „Fachgruppe Ladungssicherung“).

Kässbohrer Transport Technik GmbH, Eugendorf (Österreich), vertreten durch Geschäftsführer Dipl.-Ing. Günther Percht.

Projektteam (von links nach rechts)

Verantwortlich für Teststand und praktische Durchführung der Versuche: Kässbohrer Transport Technik GmbH, Stefan Meixner, Leiter Sonderfahrzeugbau.

Neutrale Überwachung und Begleitung der Versuche: TÜV SÜD Auto Service GmbH, München, vertreten durch Herrn Dipl.-Ing. (FH) Markus Otremba, Leiter der „Fachgruppe Ladungssicherung“

Leitung und Koordination des Projektes am Standort Eugendorf (Österreich): Kässbohrer Transport Technik GmbH, Ing. Michael Schnäller, Leiter Homologation.



3. Grundlagen

3.1. Definition der Fachterminologien

3.1.1. Zurrverfahren allgemein

Kraftschluss: Niederzurren eines Körpers auf eine Unterlage, um den Reibbeiwert zu erhöhen.

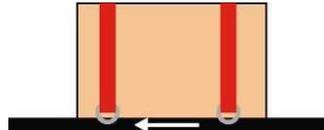


Abbildung 1: Kraftschluss

Formschluss: Bündiges Anordnen eines Körpers auf einer Unterlage, deren Stabilität und Design ein Verrutschen zwischen Körper und Unterlage verhindert.



Abbildung 2: Formschluss durch geprüften Aufbau gemäß EN 12642 / durch Kopflashing

Kombinierte Sicherung: Von einer „kombinierten Sicherung“ spricht man wenn beide Verfahren in Kombination angewendet werden.

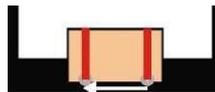


Abbildung 3: Kombinierte Sicherung (Formschluss und Kraftschluss)

3.1.2. Ladungssicherung auf PKW- / LKW - Transportern

Definition Ladungssicherung:

- **Niederzurren** und / oder formschlüssiges Sichern von **ungefederten** Massen (Räder) von PKW und LKW. Diese Art der Ladungssicherung ist Gegenstand dieser Untersuchung.
- Die Sicherung von **gefederten** Massen (dazu müssen Zurrpunkte an der gefederten Masse vorhanden sein, z.B.: an der Karosserie) ist nicht Gegenstand dieses Projektes.

Nicht geeignet Praxisbeispiele:

Häufig werden Fahrzeuge beim Transport an den Abschleppösen gesichert. Abschleppösen sind aber nur zum Abschleppen mit gerader Zugwirkung ausgelegt. Diese können den **aufretenden Querkräften** während eines Transportes bei einer Diagonalverzerrung nicht sicher standhalten. Ein geladenes Fahrzeug bewegt sich beim Transport durch die eigene Federung ständig leicht auf und ab. Erfolgt nun die Sicherung über die Abschleppösen, werden diese durch das Schwingen der Fahrzeuge zusätzlich auf Biegung mit Schwellenbelastung strapaziert. Es genügt auch nicht, die Räder irgendwie am Transportfahrzeug festzuzurren, zum Beispiel durch Umschlingen der Felgenspeiche. In einschlägigen Katalogen am Markt sind leider viele nicht geeignete Zurrmittel dafür erhältlich.

Werden Fahrzeuge zum Beispiel über Direktzurrung an den Felgen gesichert, hat das Federn der Fahrzeugmasse keinen Einfluss mehr auf die Ladungssicherung. Die Räder bleiben festgezurt auf der Ladefläche. Doch durch eine Vorspannung des Spanngurts und durch Fahrbewegungen kann es zu einem Drehmoment am Rad kommen. Dadurch besteht die Gefahr einer **Schlaffgurtbildung** und dann wäre das Fahrzeug gänzlich ungesichert.

Auch ist eine Krafteinleitung über die Felgen kritisch zu sehen, da eventuell Druckstellen im Radlager entstehen können, oder es kann die Schraubenverbindung in Mitleidenschaft gezogen werden. Außerdem sind die Felgen selbst von den Felgenherstellern für solch eine Anwendung gar **nicht freigegeben**. Bei dem einen oder anderen Fahrzeughersteller ist ein derartiges Verfahren aufgrund der genannten Folgeschäden bereits verboten.

Auch die **häufig anzutreffenden Schlaufengurte** über den Reifen müssen kritisch hinterfragt werden, denn nur zwei diagonal angeordnete Gurte funktionieren rein technisch nicht einwandfrei. Wenn überhaupt, kann es nur mit vier Gurten funktionieren. Aber die Gefahr, einen ABS-Sensor oder einen Bremsschlauch zu beschädigen, ist groß. Auch hierzu haben mehrere Hersteller bereits Transportverbote erteilt.

Die letztlich **zulässige Variante** der Ladungssicherung von Fahrzeugen ist die kombinierte Sicherung von Niederzurrung mittels Dreipunktgurten mit variablen Gurtcontrollern und Formschluss mit entsprechenden Radvorlegern. Hier werden spezielle Zurrgurte mit Gurtcontrollern sowie entsprechend geprüfte Zurrleisten oder Fahrspurbleche mit Radvorlegern oder Mulden am Transportfahrzeug benötigt. Bei allen Zurrvarianten ist grundsätzlich darauf zu achten, dass die Zurrhaken nicht auf der Spitze, sondern nur im Hakengrund oder auf der geraden Schenkelfläche belastet werden, sofern die Zurrmittelhersteller diese Anwendung / Belastung so freigegeben haben.

Ladungssicherung von Fahrzeugen – zulässige und unzulässige Radverzurrung

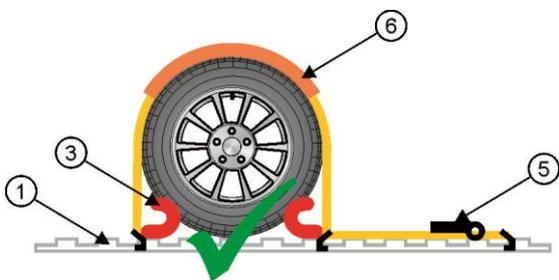


Abbildung 4: Zulässige 3-Punkt-Sicherung

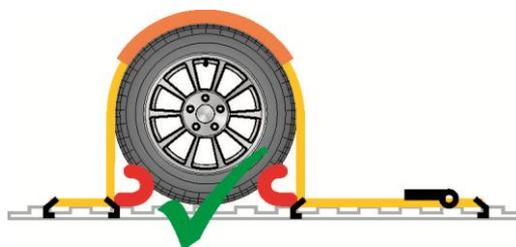


Abbildung 5: Zulässige 4-Punkt-Sicherung



Abbildung 6: Zulässige 3-Punkt-Sicherung in Mulde

- ① = Durchgehendes Fahrbahnblech
- ② = Fahrbahnblech mit Muldenfeld
- ③ = Radvorleger
- ④ = Muldenbalken
- ⑤ = Zurrgurt mit Ratsche
- ⑥ = Gurtcontroller



Abbildung 7: Unzulässige Schlingensicherung

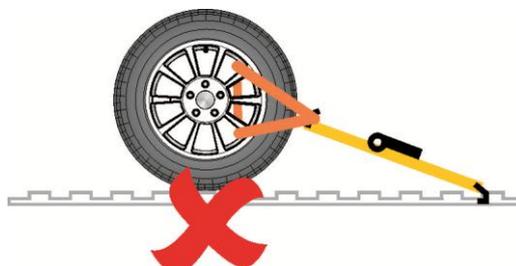


Abbildung 8: Unzulässige Schlaufensicherung

3.1.3. Reibungsarten

Reibung: Hemmung einer Bewegung, die zwischen sich berührenden Festkörpern oder Teilchen auftritt. Diese Untersuchung hat ausschließlich die äußere Reibung zwischen den sich berührenden Grenzflächen von Profilreifen und geprägten Fahrbahnschienen zum Gegenstand.

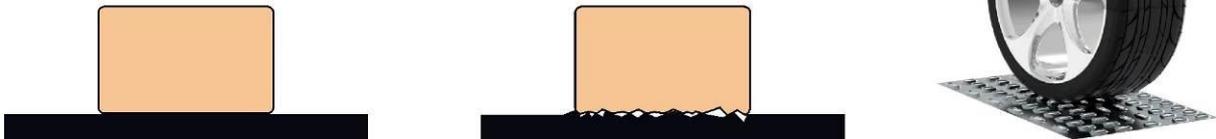


Abbildung 9: Kontaktbereich glatt / Kontaktbereich rau / Kontaktbereich Reifen - Fahrbahnblech

Haftreibung: Zustand der Ruhe zwischen den sich berührenden Grenzflächen. In diesem Zustand ist die senkrecht wirkende Gewichtskraft (Normalkraft) des oberen Objekts (hier: Reifen, Fahrzeug) höher als die parallel zur Kontaktfläche auf das Objekt einwirkenden Kräfte.

Gleitreibung: Zustand der Bewegung zwischen zwei sich berührenden Grenzflächen. Sie ist abhängig von den auf die Objekte wirkenden Kräften, insbesondere von der Kraft die aus dem Neigungswinkel des unteren Objekts resultiert. Gleitreibung ist immer so gerichtet, dass sie die Bewegung des Körpers (z.B.: Reifen) relativ zum anderen Körper (Unterlage/ z.B.: Fahrbahnblech) hemmt. Bewegen sich die Körper aufeinander, so „verhaken“ sich die Unebenheiten der Kontaktflächen, damit wird die Bewegung gehemmt.

Reibbeiwert μ (auch: Reibungskoeffizient): Maß für die Reibungskraft im Verhältnis zur Anpresskraft zwischen zwei Körpern. Je kleiner dieser Wert ist (geht gegen Null) desto weniger Reibung existiert; je größer der Wert ist (geht gegen 1), umso mehr Reibung existiert.

Reibungskraft F_R (auch: Reibungswiderstand): Die Kraft welche durch Reibung hervorgerufen wird und welche die Bewegung eines Körpers hemmt. Sie errechnet sich aus der Normalkraft F_G , multipliziert mit dem Reibbeiwert μ :

$$F_R = F_G \times \mu$$

Formel 1: Reibungskraft

F_R	F_G	μ
N	N	1

Einführung eines neuen Begriffes

Da für die Ladungssicherung ausschließlich die bereits erwähnten Reibungsarten von Bedeutung sind, aber bei den meisten Reibungsarten die dynamischen Einwirkungen des Fahrprozesses nicht ausreichend berücksichtigt sind, hat sich der VDI im Jahre 2009 erstmalig mit dem Thema „Reibbeiwert“ beschäftigt (VDI 2700, Blatt 14).

Aus diesem Papier geht eindeutig hervor, dass ausschließlich die Gleitreibbeiwerte zur Ladungssicherungs – Berechnung herangezogen werden müssen. Die Richtlinie beschreibt weiter, dass die jeweiligen Betriebszustände nicht exakt erfasst werden können (Zustand der Ladefläche feucht, nass, besenrein, trocken, usw.). Deshalb fordert sie einen Sicherheitsabschlag auf die gemessenen Reibbeiwerte. Genau aus diesen erwähnten Gründen ergibt sich ein neuer Stand der Technik in Punkto „sich berührende Grenzflächen“ wie profilierte Fahrzeugreifen auf einem geprägten Fahrbahnblech auf einem Fahrzeugtransporter.

Auf Grund dieser Tatsache ist es zwingend erforderlich einen neuen Begriff zu definieren, welcher die konkreten Eigenschaften aus dem Fahrzeugtransport beschreibt.

3.1.4. Allgemeine physikalische Grundlagen

Gleit-Reib-Widerstandsbeiwert (Abkürzung: GRW-Beiwert, Formelzeichen μ_{GRW}): Dieser neu einzuführende Fachbegriff beschreibt ausschließlich den Widerstand zwischen einem PKW-, LKW- oder Traktor-Reifen und einem geprägten Fahrzeugtransporter – Fahrbahnblech. Dieser Widerstand ist eine Kombination aus Gleitreibung und mechanischer Verzahnung zwischen Profilreifen und Fahrbahnprägungen.

Trägheit: Bewegung eines Körpers. Man unterscheidet die ruhende Bewegung, die gleichmäßige Bewegung und die positive oder negative Beschleunigung aufgrund seiner eigenen Masse und aufgrund der Kräfte, die auf ihn wirken.

Kräfteystem: Es beschreibt alle Kräfte, welche auf einen Körper einwirken. Jede einzelne Kraft kann durch eine Wirklinie (Vektoren: x-, y-, z-Achsen) quantifiziert werden.



x	horizontal in Fahrtrichtung ±
y	horizontal quer zur Fahrtrichtung ±
z	vertikal

Abbildung 10: Kräfteystem

Gewichtskraft F_G : Die Kraft eines Körpers, welche auf seine Auflagefläche wirkt. Die Gewichtskraft F_G errechnet sich aus der Multiplikation seiner Fahrzeug-Leermasse m mit der (vertikalen) Erdbeschleunigung g :

$$F_G = m \times g$$

Formel 2: Gewichtskraft

F_G	m	g
N	kg	9,81 m/s ²

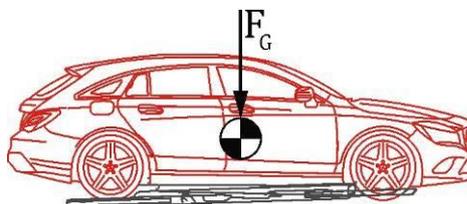


Abbildung 11: Gewichtskraft F_G

Normalkraft F_N : Jede auf eine Fläche einwirkende Kraft kann in die Komponenten „Normalkraft“ und „Tangentialkraft“ zerlegt werden. Die senkrecht zur Auflagefläche (also in Richtung des Normalenvektors) wirkende Normalkraft erzeugt Druckkraft. Die parallel zur Fläche wirkende Tangentialkraft erzeugt die Hangabtriebskraft.

Elementare Betrachtungen zur Normalkraft erfolgen anhand der Hangabtriebskraft.

In der technischen Mechanik und Kontinuumsmechanik wird die auf eine Flächeneinheit bezogene Kraft als Flächenlast bezeichnet.

Die Formel zur Berechnung der Normalkraft F_N ergibt sich aus dem Kosinus von α multipliziert mit der Gewichtskraft F_G der Masse m . Entsprechend ergibt sich die Tangentialkraft F_T aus dem Sinus von α multipliziert mit F_G .

$$F_T = F_G \times \sin \alpha$$

$$F_N = F_G \times \cos \alpha$$

F_N	F_G	α	μ
N	N	°	1

Formel 3: Normalkraft, Tangentialkraft

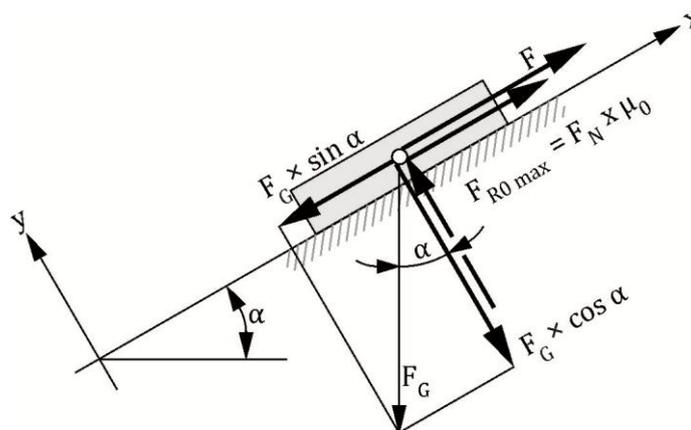


Abbildung 12: Haltekraft F

$$F = F_G \times (\sin \alpha - \mu_0 \times \cos \alpha)$$

Formel 4: Haltekraft

F	F_G	α	μ
N	N	°	1

Haltekraft F und Haftreibungskraft F_{R0max} wirken parallel zur schiefen Eben nach rechts oben. Damit erhält man die spezielle Gleichung für den Fall dass die Haltekraft F parallel zur schiefen Eben wirkt (Böge & Böge, 2015, Seite 107).

Massenkraft F_M (bei geradliniger Beschleunigung / Verzögerung, in der klassischen Mechanik als „Trägheitskraft“ bezeichnet): Sie errechnet sich aus der Masse m des Körpers (hier: geladenes Fahrzeug) und der aktuellen geradlinigen Beschleunigung / Verzögerung a (positiv oder negativ) der Unterlage (hier: Fahrzeugtransporter), auf der der Körper fixiert ist:

$$F_M = m \times a$$

Formel 5: Massenkraft

F_M	m	a
N	kg	m/s ²

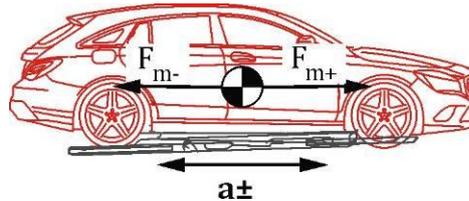


Abbildung 13: Massenkraft F_M

Zentrifugalkraft F_{ZF} bei nicht geradliniger Bewegung: Bewegt sich ein beladener Fahrzeugtransporter in einer Kurve, so errechnet sich die Zentrifugalkraft F_{ZF} aus der Masse m der Ladung, der Geschwindigkeit v und dem Kurvenradius r :

$$F_{ZF} = \frac{m \times v^2}{r}$$

$$F_{ZF} = m \times \omega^2 \times r$$

Formel 6: Zentrifugalkraft

F_{ZF}	m	v	ω	r
N	kg	m/s	s ⁻¹	m

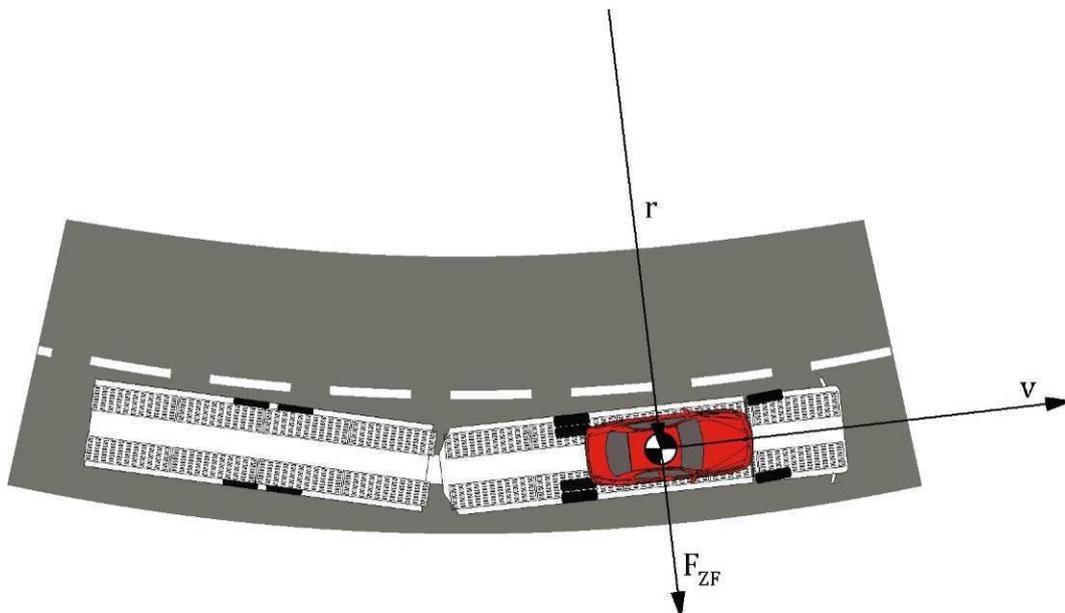


Abbildung 14: Zentrifugalkraft F_{ZF}

Tangentiale Kraft F_T : Die Kraft eines Körpers, welche tangential zu seiner Bahnkurve wirkt. Bei gleichzeitiger Wirkung von Beschleunigungen (und damit Trägheitskräften) in Fahrtrichtung und senkrecht dazu (beim Fahren von Kurven) addieren sich die Beschleunigungen vektoriell zur Gesamtbeschleunigung und damit die Trägheitskräfte zur Gesamtträgheitskraft.

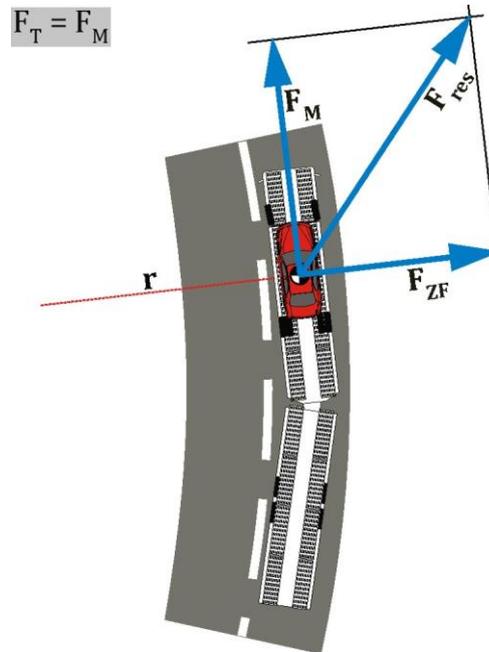


Abbildung 15: Tangentialkraft F_T

$$F_T = m \times a$$

$$F_{ZF} = m \times \frac{v^2}{r}$$

$$F_{res} = \vec{F}_T + \vec{F}_{ZF} = \sqrt{F_T^2 + F_{ZF}^2}$$

Formel 7: Tangentialkraft

F_T	F_M	m	v	ω	r	F_{ZF}	F_{res}	a
N	N	kg	m/s	s ⁻¹	m	N	N	m/s ²

Anmerkung:

$$F_{res} = m \times \sqrt{a_{max}^2 + \left(\frac{v^2}{r}\right)^2}$$

Formel 8: Resultierende Kraft

3.1.5. Grundlagen der Ladungssicherung

Physikalische Grundlagen (AUVA, 08/2014)

Die Ladung muss nach dem Beladen so verstaut und gesichert werden, dass sie während der Fahrt weder ganz noch teilweise verrutschen, verrollen, umfallen, kippen oder herabfallen kann. Bei der Ladungssicherung sind Vollbremsungen, Ausweichmanöver und unvorhergesehene schlechte Fahrbahnzustände zu berücksichtigen. Diese Aktionen werden gemäß Kraftfahrzeuggesetz als normaler Fahrbetrieb bezeichnet.

Auftretende Kräfte im Fahrbetrieb

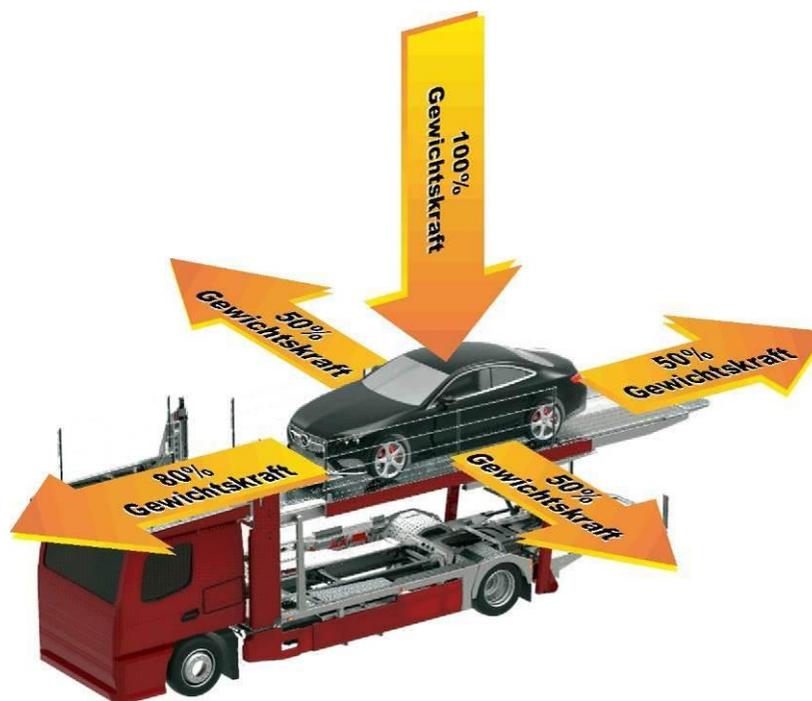


Abbildung 16: Gewichtskräfte im Fahrbetrieb

Die obige Grafik zeigt, welche Kräfte auf Grund physikalischer Zusammenhänge (Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Fliehkräfte) auf die Ladung wirken und welcher Sicherungsbedarf sich daraus ergibt. Diese Werte sind in der EN-12195-1 als Maximalwerte für die Berechnung von Zurrkräften angegeben.

Die Kräfte können beim Kurven- und beim Anfahren 50 % der Gewichtskraft betragen. Durch fahrbahnbedingte Erschütterungen oder auf holpriger Fahrbahn geht die Reibung zwischen Ladung und Ladefläche verloren. Dadurch kann die Ladung von der Ladefläche/Palette abheben und verrutschen. Die größten Kräfte, 80 % der Gewichtskraft, treten aber beim Bremsen auf!

Bei der Ladungssicherung haben wir es mit Kräften (N) zu tun, obwohl Ladung „nur wiegt“, d.h. eigentlich nur Masse (kg) ist (BG Bau, 2016).

Gedanklich müssen wir die Masse der Ladung von Kilogramm (kg) in die Gewichtskraft Newton (N) umsetzen (das Kilogramm / Newton – Umrechnungsverhältnis von 1 : 10 ist gängige Praxis):

Gewichtskraft	1 kg entspricht	10 N	10 N ist gleich	1 daN
	100 kg entspricht	100 daN	4000 N ist gleich	400 daN

Tabelle / Diagramm 1: Gewichtskraft kg und N

Bei der Ladungssicherung sind die Kräfteangaben in der Einheit daN üblich. Die Bezeichnung daN wird im Weiteren mit der kg-Angabe zum besseren Verständnis 1 : 1 gleichgesetzt.

Die auftretenden Beschleunigungs-, Flieh- und Verzögerungskräfte müssen durch Sicherungsmaßnahmen aufgenommen und sicher über das Fahrzeug in den Untergrund eingeleitet werden.

Erklärung zur Nicht-SI-Einheit „daN“

Eine Ladung mit 10.000 kg wird in der Praxis mit 10 multipliziert und ergibt eine Gewichtskraft von 100.000 Newton. 100.000 Newton entsprechen 10.000 Dekanewton (daN). Dekanewton ist in Verbindung mit Zahlen ein griechischer Begriff und bedeutet 10.

1 kg entspricht somit ~ 1 daN.

Die Sicherungskraft $F_{Sicherung}$

Sicherungsbedarf am Beispiel Fahrtrichtung Autotransporter: Der Sicherungsbedarf berechnet sich, indem man die Reibung von den Beschleunigungskräften abzieht.

$$F_R + F_{Sicherung} \cong F_{Brems}$$

$$F_{Sicherung} = F_M - F_R$$

Formel 9: Sicherungskraft

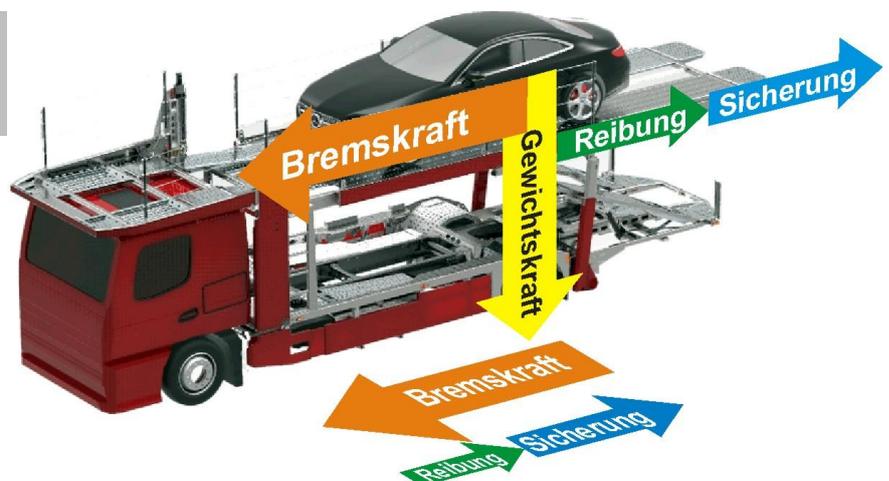


Abbildung 17: Sicherungsbedarf im Fahrbetrieb

3.2. Praktische Tests

Ermittlung der Haftreibung (Böge & Böge, 2015, Seiten 93,94)

Zur Ermittlung der Reibungszahlen benutzt man eine „Schiefe Ebene“.

Der Prüfkörper bleibt bei zunehmender Neigung der Ebene so lange in Ruhe bis der Neigungswinkel α gleich dem Haftreibungswinkel ϱ_0 ist.

Man braucht beim Versuch also nur den Neigungswinkel der schiefen Ebene abzulesen. Seine Tangens-Funktion ist die Reibungszahl μ (oder μ_0).

$$\tan \varrho = \frac{F_R}{F_N} = \mu$$

$$\tan \varrho_0 = \frac{F_{R0max}}{F_N} = \mu$$

Formel 10: Reibungszahl

ϱ	F_R	F_N	μ
0°	N	N	1

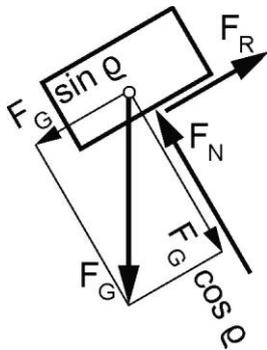


Abbildung 18: Freigemachter Prüfkörper

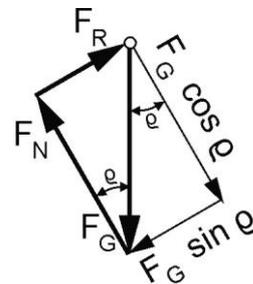


Abbildung 19: Kraftdreieck

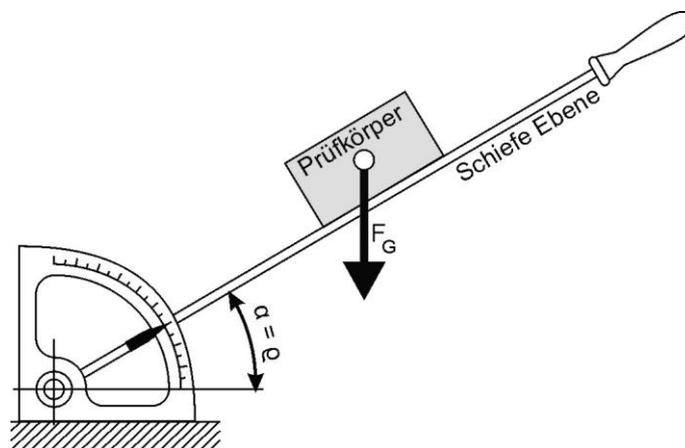


Abbildung 20: Ermittlung der Haftreibung

4. Voruntersuchung

4.1. Abrutschtest eines Fahrzeuges im November 2014

Gegenwärtig gelten folgende maximalen Neigungswinkel bzw. Reibbeiwerte für Fahrzeuge mit Gummireifen auf Stahlflächen (statische Betrachtung; aus „DEKRA Praxisratgeber Ladungssicherung“, 2007):

Oberfläche / Fahrbahn	Neigung maximal	Reibbeiwert μ
Stahlfläche trocken / besenrein	ca. 23°	0,40 – 0,45
Stahlfläche trocken / verschmutzt	ca. 17°	0,30
Stahlfläche nass / verschmutzt	ca. 6°-11°	0,10 – 0,20

Tabelle / Diagramm 2: Neigungswinkel und Reibbeiwerte im Abrutschtest

Der Betriebsalltag von Fahrzeugtransportern lässt vermuten, dass diese Werte viel zu restriktiv angesetzt sind. Im Sinne einer praxisnäheren Regelung soll untersucht werden, ob diese Werte zurecht vorgegeben sind oder ob die tatsächliche Haftreibung zwischen Fahrzeugen mit Profilreifen und Fahrbahnblechen wesentlich höher sein können.

4.1.1. Prüfaufbau

Ein Fahrzeug wird auf eine Plattform gestellt. Die Plattform wird an einem Ende so lange angehoben bis das Fahrzeug zu rutschen beginnt.



Abbildung 21: Prüfanordnung mit Fahrzeug

Fahrzeug: PKW mit Gesamtgewicht 1.090 kg (Vorderachse 670 kg, Hinterachse 420 kg), Sommerreifen; **Plattform:** Verzinktes Stahlblech mit Langloch-Perforierungen, Oberfläche sauber und trocken; **Hubwerkzeug:** Hallenkran; **Messwerkzeug:** Digitale Waage

4.1.2. Details

Das **Fahrzeug** wird mittig auf die gerade Plattform gestellt. Es wird mit der Feststellbremse und eingelegtem 1. Gang gesichert. Die Felgen der Vorder- und Hinterachse werden mit Spanngurten so verzurrt dass sich die Räder nicht drehen können. Zusätzlich wird das Fahrzeug mittels einer Kette so an der Plattform gesichert, dass es aus der ursprünglichen Position ein kurzes Stück abrutschen kann (maximal 20 cm).

Die **Plattform** wird an einem Ende an 2 Punkten am Hallenkran befestigt. Auf der Plattform wird bündig eine digitale Wasserwaage befestigt welche jederzeit den aktuellen Neigungswinkel der Plattform exakt anzeigt.

Veränderliche Parameter der Versuchsreihe:

Das Fahrzeug wurde abwechselnd vorwärts und rückwärts auf der Plattform platziert. Alle 4 Reifen wurden abwechselnd mit einem Druck von 0,5 bar, 1,0 bar, 1,5 bar und 2,0 bar gefüllt.

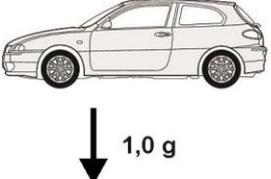
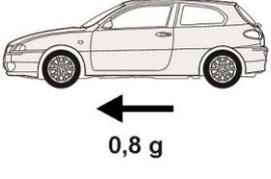
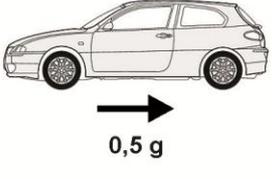
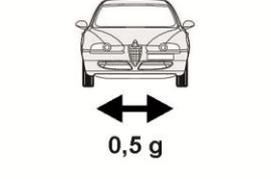
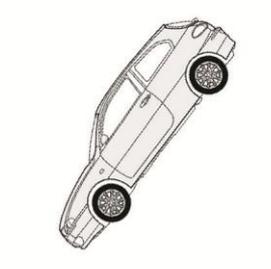
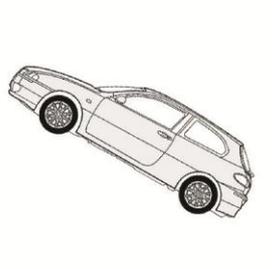
Das Anheben wurde sofort nach dem Abrutschen zur nächsten Fahrbahnprägung, nach dem Übrutschen dieser Prägung und dem Einkrallen an der folgenden Fahrbahnprägung und nach dem Abrutschen bis zur Spannung der Sicherungskette abgebrochen. Nach jedem Abbruch wurde der angezeigte Neigungswinkel notiert.

Ergebnistabelle: Neigungswinkel an welchem das Fahrzeug zu rutschen beginnt

Reifendruck	Vorwärts (Vorderachse unten)		Rückwärts (Vorderachse oben)	
	Winkel in Grad	μ - Wert	Winkel in Grad	μ - Wert
0,5 bar	36,0 °	0,73	44,4 °	0,98
1,0 bar	35,6 °	0,72	49,0 °	1,16
1,5 bar	38,6 °	0,80	48,8 °	1,15
2,0 bar	39,2 °	0,83	48,8 °	1,14
Mittelwerte	37,3 °	0,77	47,7 °	1,11

Tabelle / Diagramm 3: Neigungswinkel für Rutschbeginn

Zur besseren Darstellung der maximal auftretenden Beschleunigungen in Fahrtrichtung, zur Seite und nach hinten, wurde das Fahrzeug in eine entsprechende Winkelposition angekippt. Ist die Ladungssicherung ordnungsgemäß durchgeführt worden, darf das Fahrzeug beim Ankippen in die entsprechenden Winkel nicht ins Rutschen geraten. (d.h. bei einem Gefälle von 53° darf das Fahrzeug nicht nach vorne verrutschen!) (www.cgvector.com, 2003).

			
			
1,0 g entspricht 90° Neigung	max. Beschleunigung von 0,8 g in Fahrtrichtung entspricht 53° Neigung (Bremsverzögerung)	max. Beschleunigung von 0,5 g nach hinten entspricht 30° Neigung	max. Beschleunigung von 0,5 g zu den Seiten entspricht 30° Neigung

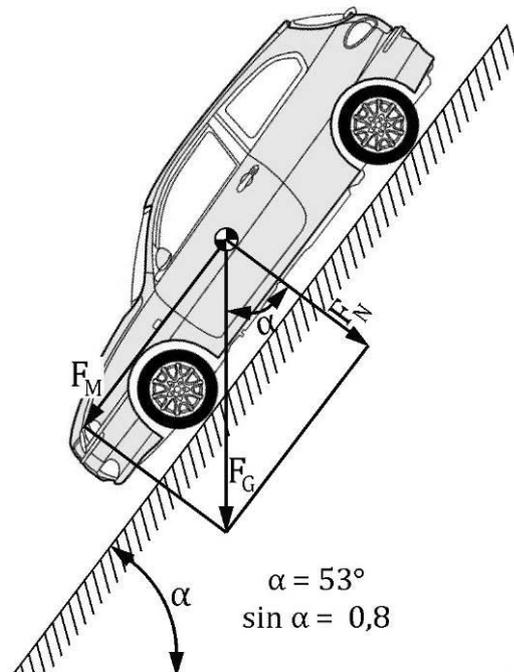


Abbildung 22: Winkelposition

4.1.3. Fazit

Sowohl die Position des Fahrzeuges (vorwärts / rückwärts) als auch der Reifenluftdruck hatten erheblichen Einfluss auf den erreichbaren Neigungswinkel. In allen Versuchen zeigten sich aber deutlich größere Haft-Reibbeiwerte μ / Schrägstellungen als in den offiziellen Richtlinien (z.B. Richtlinie: 23°, Versuchsergebnis: 47,7°). Die Ergebnisse stellen eine klare Rechtfertigung für einen großen Labortest dar, welcher zu einer Neufassung der Verzurr- und Sicherheitsvorschriften führen kann.

5. Hauptuntersuchung

5.1. Empirische Ermittlung von Reibbeiwerten im Herbst 2015

5.1.1. Untersuchungsumfang und Ziel

Ausgehend von einem idealisierten Versuchsaufbau sollen umfassende Messwerte ermittelt werden. Im Rahmen der Testreihe sollen die wesentlichen Einflußgrößen (Zug- und Druckkräfte, Typ des Fahrbahnblechs, Reifentyp, Umweltbedingungen) einzeln modifiziert werden, um Meßwerte für alle plausiblen Situationen zu erhalten.

Die Ergebnisse sollen entweder die aktuellen gesetzlichen Vorgaben für die Ladungssicherung auf PKW- und Nutzfahrzeug-Transportern bestätigen oder zur Anpassung dieser Vorgaben führen.

5.1.2. Auswahl der Versuchs – Objekte

Fahrzeug / Reifen

Grundsätzlich wird nicht ein ganzes Fahrzeug für die Prüfung verwendet, sondern nur ein einzelner Fahrzeugreifen auf Stahlfelge. Die Testergebnisse können auf ganze Fahrzeuge übertragen werden, da jeweils der schlechteste angenommene Fall überprüft/ untersucht wurde.

Grundsätzlich wurden alle handelsüblichen Reifendimensionen für PKW, Kleintransporter, LKW und Traktoren zur Auswahl herangezogen. In einem umfassenden Vortest wurden diejenige Reifengrößen für PKW und LKW ausgewählt, welche den kleinsten und somit schlechtesten Reibbeiwert lieferten, um so gültige Grenzwerte für alle zu betrachtenden Reifengrößen zu liefern. Hinsichtlich der Profilbeschaffenheit wurden Sommerreifen, Winterreifen und Offroad-Reifen betrachtet. Hinsichtlich des Lebenszyklus wurden Reifen mit 100% Profiltiefe, 50% und als abgefahren geltende Reifen betrachtet. Es wurde mit Reifendrücken von 0,5 bar bis 2,0 bar geprüft.

Außerdem wurde auch ein gekühlter Reifen auf angeeister Fläche überprüft. Während der Überprüfung fand ein Phasenübergang von „gefroren“ auf „flüssig“ statt.

Tatsächliches Prüfmuster PKW: Sommerreifen 185/70 R 14, neuwertig, 2 bar;

LKW: Sommerreifen 355/50 R22.5, neuwertig, 9 bar;

Traktor: 285/70 R20 AS, neuwertig, 2,5 bar.

Prüfbleche

Es wurden 2 Kässbohrer Fahrbahnbleche verwendet, Größe jeweils 748 x 748 mm, neuwertig, unverschmutzt (ölfrei, fettfrei, silikonfrei), 1x mit 3 Reihen Langloch-Fahrbahnprägungen quer und 2 Reihen längs zur Fahrtrichtung (= „Kässbohrer – Urblech“, Design seit mehr als 30 Jahren in Verwendung), 1x mit 5 Reihen Langloch-Fahrbahnprägungen quer zur Fahrtrichtung,

Grundsätzlich können alle Arten von Blechen (Material, Struktur, Temperatur, Gebrauchsspuren, Verschmutzung) getestet werden, welche auf dem Prüfstand befestigt werden können; somit ist der Prüfstand auch für Bleche anderer Hersteller geeignet.

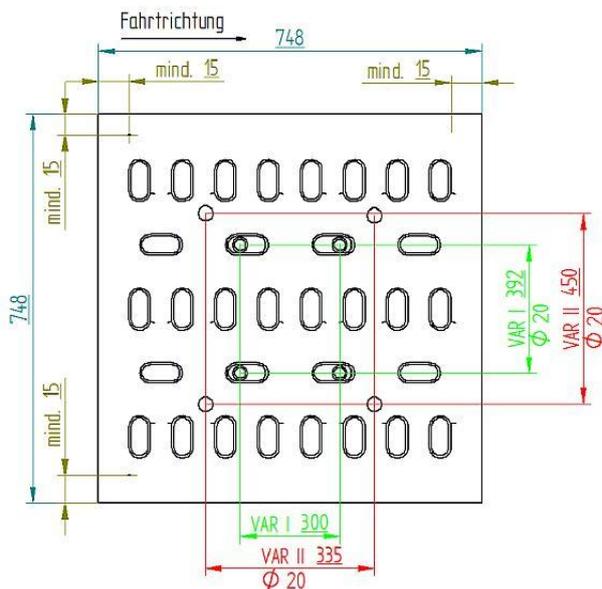


Abbildung 23: „Kässbohrer - Urblech“

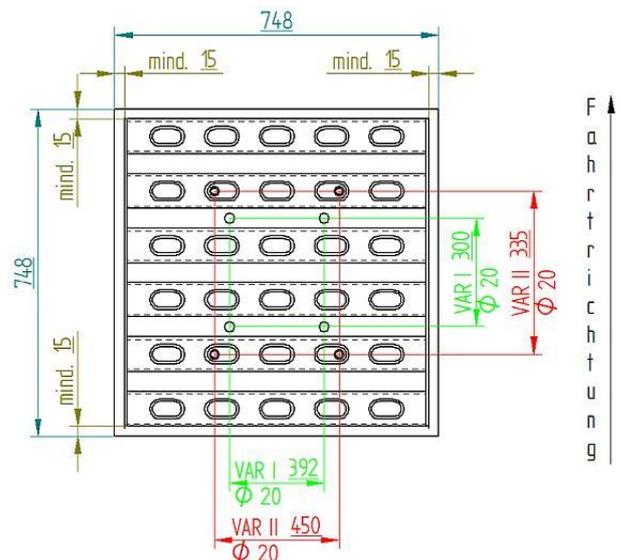


Abbildung 24: Beispiel: Fahrbahnblech

Prüfstand

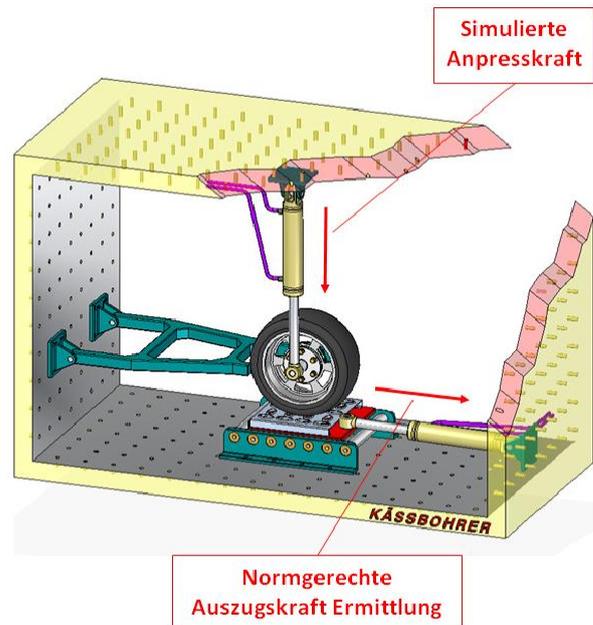


Abbildung 25: Prüfstand

- Gekapselter Raum (ca. 6 x 4 x 3 m) mit Schiebetür und Sichtfenster
- Horizontal beweglicher Grundrahmen mit Rollen zur Fixierung des Prüfblechs mit 4 Bolzen
- 2 Hydraulikaggregate mit Druckversorgung und Druckregulierung für den hydraulischen Abzugszylinder zur horizontalen Bewegung des Grundrahmens und den Hydraulikzylinder für vertikalen Anpressdruck auf den Prüfreifen
- Horizontale Haltegabel (siehe Abbildungen „Steuereinheit“ und „Reifengabel“ weiter hinten im Text) für den Prüfreifen mit Adapter für alle Felgenreößen und Schwenklagerung zur vertikalen Bewegung des Prüfreifens. Das Prüfblech bewegt sich in Rollrichtung des Reifens; der montierte Reifen kann sich nicht drehen.
- Horizontaler Haltebalken (hier nicht abgebildet) für den Prüfreifen mit Adapter für alle Felgenreößen und Schwenklagerung zur vertikalen Bewegung des Prüfreifens. Das Prüfblech bewegt sich quer zur Rollrichtung des Reifens; der montierte Reifen kann sich nicht drehen.
- Überwachungsinstrumente: Messdose für die Abzugskraft auf das Prüfblech, Messdose für den Anpressdruck auf den Reifen, Wegmessung horizontal, temperaturbeständiges Hochdruckventil, Datenlogger für Anpresskraft, Abzugskraft und Wegmessung.

Details zum Prüfstand



Abbildung 26: Hydraulikaggregat #1; Hydraulikaggregat #2



Abbildung 27: Steuereinheit; Reifengabel

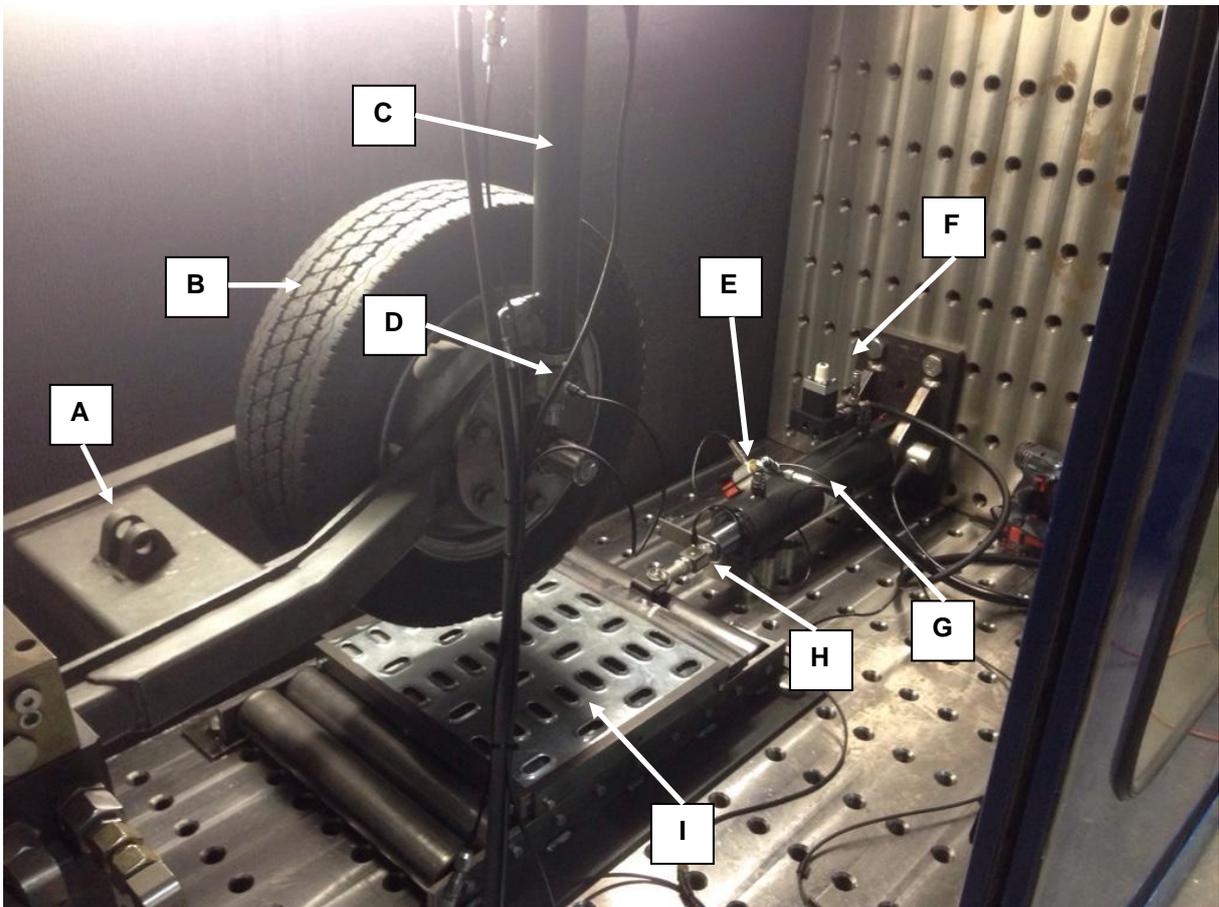


Abbildung 28: Aufbau des Prüfstandes

Komponenten

- A Reifenhalterung
- B Prüfreifen
- C Anpresszylinder
- D Messdose für den Anpressdruck
- E Wegmessung
- F Temperaturbeständiges Hochdruckventil
- G Abzugszylinder
- H Messdose für die Abzugskraft
- I Prüfblechhalterung

5.1.3. Prüfschritt: Vorbereitung

Die einwandfreie Funktionsfähigkeit des Prüfstandes muss sichergestellt werden:

- Sauberkeit aller Komponenten
- Stromversorgung dauerhaft hergestellt
- Hydraulikaggregat mit Druckversorgung und seinen Überwachungsinstrumenten einsatzbereit
- Alle Schutzeinrichtungen einsatzbereit
- Zugangsschutz für unbefugte Personen verfügbar
- Neutrale Umweltbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Wind, Beleuchtung)
- Das zu prüfende Fahrbahnblech muss ordnungsgemäß auf dem Halterahmen fixiert sein, mit dem Zugsylinder (noch drucklos) gekoppelt sein und sich in Ausgangsposition befinden
- Die Eigenschaften des zu prüfenden Reifen müssen bekannt sein (Profil, Reifenluftdruck, neuwertiger Abschnitt der Lauffläche hat Kontakt mit dem Fahrbahnblech – Reifen muss nach jedem Test um 36° weitergedreht werden; maximal 10 Tests möglich), ordnungsgemäß an die Halteeinrichtung montiert sein, ordnungsgemäß mit dem Druckzylinder (noch drucklos) gekoppelt sein.
- Der Datenlogger muss einsatzbereit sein: Alle Datenleitungen zum Hydraulikaggregat und zu den Messdosen verbunden, Aufzeichnungsprogramm verfügbar, Rahmendaten vorgegeben
- Prüfziel bzw. Prüfparameter müssen geklärt sein. Jede einzelne Prüfung wird durch einen individuellen Nummernschlüssel beschrieben, der alle relevanten Daten enthält (Blechtyp, Reifendimension, Reifenart, Prüfrichtung, Randbedingungen, Vorspannkraft, laufende Prüfnummer, Startpunkte, Dateiformat der Protokolldatei).

5.1.4. Prüfschritt: Durchführung

- Die Zeit- und Werteaufzeichnung wird gestartet.
- Der Reifen wird vertikal mit dem gewünschten Anpressdruck belastet (z.B. 250 kg). Dabei ist der Gewichtsdruck der Halteeinrichtung auf den Reifen berücksichtigt.
- Das Fahrbahnblech wird einer horizontalen Zugkraft ausgesetzt. Während des Versuchs werden alle existierenden Daten laufend aufgezeichnet. Die Vorspannkraft wird in Bezug zur Abzugskraft gesetzt, wodurch der Reibbeiwert in jedem Moment ermittelt und dokumentiert wird.
- Wenn das Prüfziel erreicht ist werden die Prüfung und die Werteaufzeichnung beendet (beide Hydraulikzylinder drucklos schalten).

Aufgrund der Oberflächenstrukturen des Fahrbahnblechs und des Reifenprofils ist kein exakt linearer Versuchsablauf zu erwarten, sondern vielmehr werden zwischendurch einzelne ruckartige Bewegungen stattfinden wenn der Reifen eine Fahrbahnprägung (= mechanischer Widerstand) überwindet.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde vom Projektteam bereits im Kapitel „Grundlagen“ der neue Begriff „**GRW-Beiwert**“ implementiert.

Messung der Anpresskraft

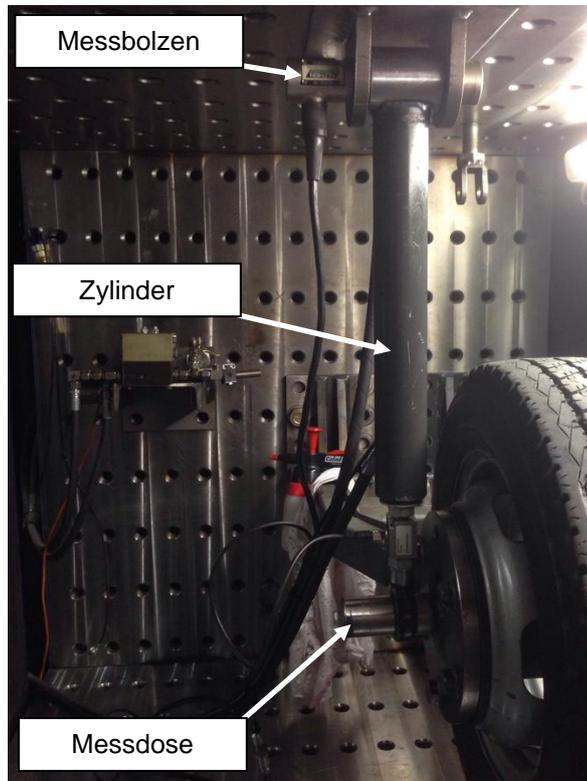


Abbildung 29: Messkomponenten Zylinder vertikal

Messung der Abzugskraft

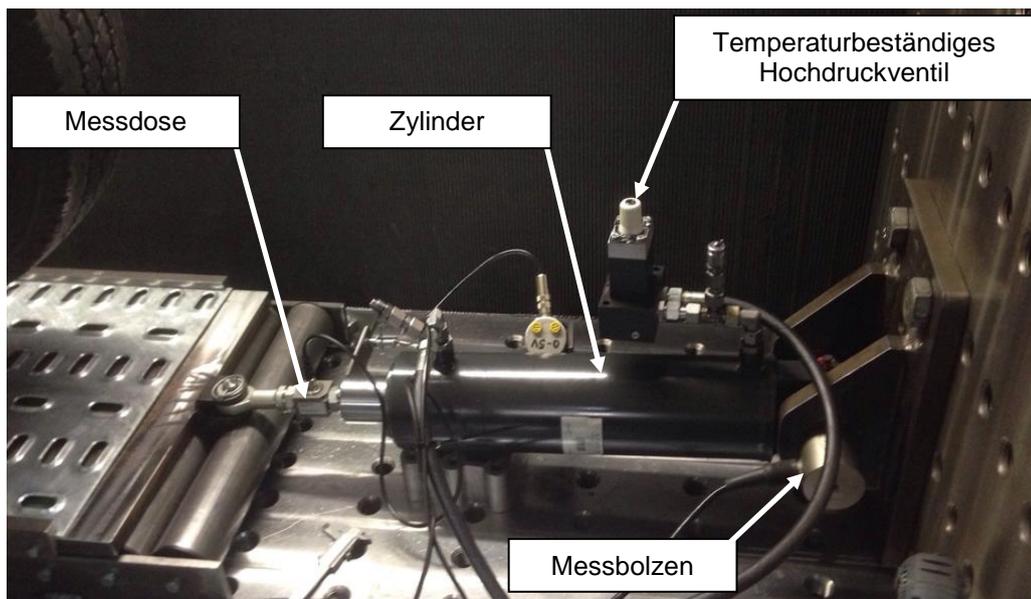


Abbildung 30: Messkomponenten Zylinder horizontal

Wegmess-System

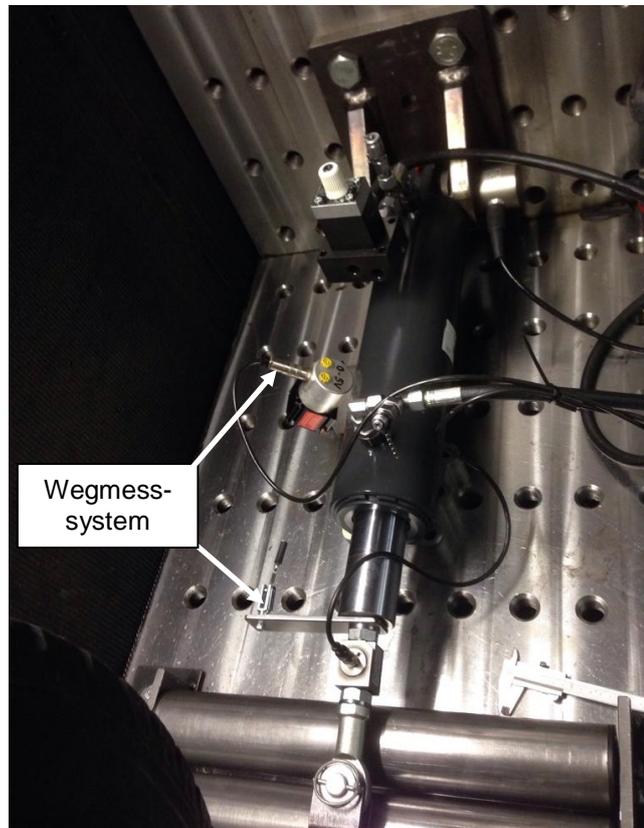


Abbildung 31: Messkomponenten horizontaler Weg

5.1.5. Definition der Reifen – Prüfkriterien

Am Markt werden die unterschiedlichsten Rad- /Reifenkombinationen angeboten. Je nach Verwendungszweck des Fahrzeuges werden von den Fahrzeugherstellern geeignete Räder ausgewählt und an den Fahrzeugen angebaut.

Neben den Profilvarianten wie z.B. Sommer-, Winter-, Ganzjahres- oder Offroad-Profilen werden die Räder auch über weitere Kenngrößen wie z.B. Bauart, Querschnittsverhältnis, Geschwindigkeit und Lastindex definiert.

All diese Kenngrößen sowie weitere Herstellerspezifische Parameter (wie z.B. Gummimischung) unterliegen den gesetzlich vorgeschriebenen Anforderungen nach den UN – ECE – Regelungen. Die hierfür maßgebenden Regelungen sind R30, R54, R64, R75, R106, R108, R109 und R117. Weiterführend befassen sich folgende Verordnungen der Europäischen Union mit dem Thema Reifen, Einbauten, Typengenehmigungen, Klassifizierung und deren Kennzeichnung:

(EU) Nr. 661 / 2009

(EU) Nr. 458 / 2011

(EU) Nr. 1235 / 2011 Durchführungsverordnung Amtsblatt C 86/3

(EU) Nr. 1235 / 2011

(EU) Nr. 1222 / 2009

Neben den Rad- /Reifenkombinationen beeinflussen auch die unterschiedlichsten Oberflächen und die Umgebungseinflüsse wie z.B. das Wetter (trocken, nass, kalt, warm, vereist, verölt) und eventuell die Radlast des Prüfreifens die gemessenen Ergebnisse.

Um unter all diesen Prüfkriterien den „worst-case“ – Testreifen und die dazu erforderlichen Parameter herauszufiltern wurde ein Drei-Stufen-Plan ausgearbeitet und angewandt:

Stufe 1: Evaluierung der erforderlichen Vorspannkräfte (Radlast – Simulation)

Stufe 2: Evaluierung der unterschiedlichen Reifendimensionen und Profilierung (LKW, PKW und Traktoren getrennt)

Stufe 3: Evaluierung der Umgebungseinflüsse.

Rein mathematisch gesehen hätte die Masse keinen Einfluss auf die Reibung, denn bei der Sicherung über Reibung gilt das sogenannte „Zahlenäquivalent“.

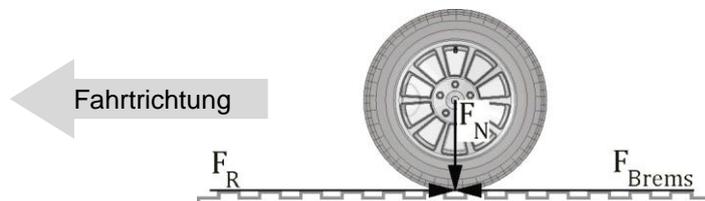


Abbildung 32: Zahlenäquivalent

$$F_G = m \times g$$

$$F_N = F_G$$

$$F_R = F_N \times \mu$$

$$F_{Brems} = m \times a$$

Formel 11: Herleitung Zahlenäquivalent

$$F_N \times \mu = m \times a$$

$$m \times g \times \mu = m \times a$$

$$\mu_{min} = \frac{m \times a}{m \times g}$$

$$\mu_{min} = \frac{a}{g}$$

(Zahlenäquivalent)

F	m	g	μ	a
N	kg	m/s ²	1	m/s ²

Um die eventuelle Auswirkung der Radlasten in Bezug auf den zu messenden GRW-Beiwert zu ermitteln, wurden mehr als 100 unterschiedliche Reibversuche durchgeführt.

Um etwa ein Fahrzeug in Fahrtrichtung gegen 0,8 g zu sichern, braucht man eine Reibung mit einem Reibbeiwert von $\mu = 0,8$ zwischen Reifen und Fahrbahnblech.

Ein Fahrzeug ist immer dann korrekt gesichert, wenn die Trägheitskraft (hier $F_{Brems} = m \times a$) durch die Reibungskraft F_R ausgeglichen wird. Gelingt dies nicht, so muss eine zusätzliche Sicherungskraft (in unserem konkreten Anwendungsfall eine kombinierte Sicherung aus Formschluss und Kraftschluss) eingesetzt werden.

Während der ersten Versuchsreihen zur Ermittlung des neuen GRW-Beiwertes zwischen einem PKW-, LKW- oder Traktorreifen und einem geprägten Fahrzeugtransporter – Fahrbahnblech stellt sich deutlich heraus dass der mathematische (theoretische) Ansatz hier erst ab einer definierten Mindest-Vorspannkraft wirksam wird.

Warum ist dies so?

Die Mindest-Vorspannkraft ist zwingend erforderlich um das Zusammenwirken der mechanischen Verzahnung der Reifenprofilierung und der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahnblech zu gewährleisten. Diese wurde mit 250 kg aus mehreren Versuchsreihen bestätigt.

Bei einer geringeren Vorspannkraft als 250 kg können keine reproduzierbaren Versuchsergebnisse erzielt werden. Aufgrund dieser Erkenntnis ist eine geringere Vorspannkraft auszuschließen.

Eine weitere Erkenntnis aus den Versuchsreihen ist, dass eine Erhöhung der Vorspannkraft über 250 kg keine Auswirkungen (weder positiv noch negativ) auf den neuen GRW-Beiwert hat.

Demzufolge konnte der theoretische Ansatz bestätigt werden. Unter der Prämisse, dass im realen Einsatz diese Verzahnung immer stattfindet, können deshalb die so ermittelten μ - Werte für theoretische Berechnungsmodelle herangezogen werden.

Im Ergebnis der Ausführung des Drei-Stufen-Planes wurden mehr als 800 Zugversuche durchgeführt.

Die Dimension des Test-Prüfreifens wurde unter Berücksichtigung der öffentlich zugänglichen Marktdaten der Reifenhersteller und aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse für PKW auf die Größe 165/70 R14 85T festgelegt. Für LKW wurde die Dimension 385/55 R22,5 158L festgelegt. Unter den getesteten Prüfreifen war auch ein Modell mit Produktionsdatum Ende 1990. Außerdem wurde für die Evaluierung eines der am längsten am Markt unverändert eingesetzten Fahrbahnbleche (ca. 30 Jahre) verwendet.

5.1.6. Prüfschritt Auswertung

Die aufgezeichneten Testwerte werden unter einem kodierten Dateinamen (Nummernschlüssel) gespeichert. Die Werte können als Wertetabelle und als Grafik dargestellt werden.

Grundlegende Erklärung der Auswertung mit Kommentaren

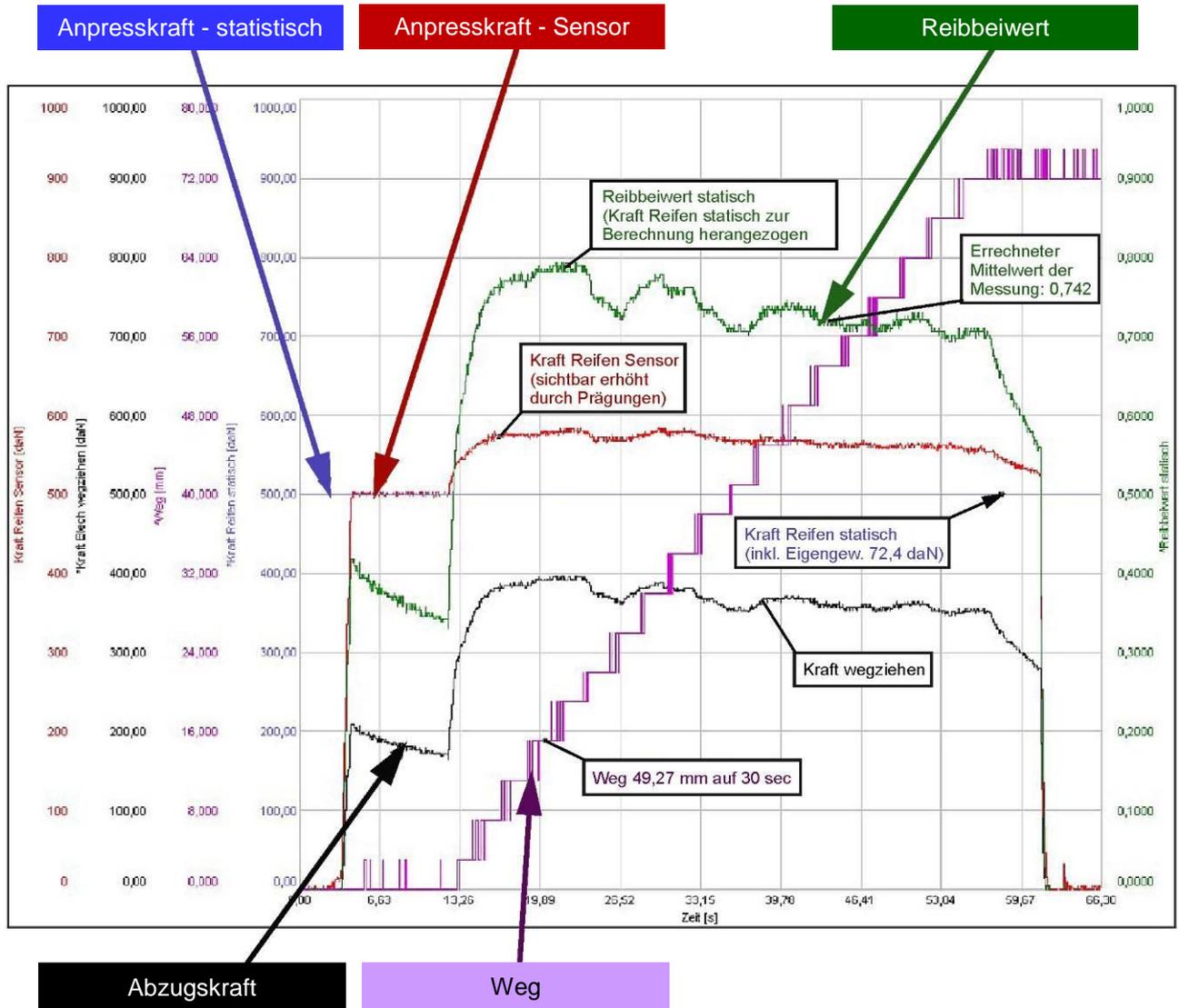


Tabelle / Diagramm 4: Datenblatt der Auswertung – 1 Messung

Verfahrensbeschreibung (VDI e.V., 2009)

Im Folgenden werden das Verfahren und die Prüfparameter beschrieben, die standardmäßig zugrunde gelegt werden.

Ziel der beschriebenen Vorgehensweise ist, eine Wiederholbarkeit und die Vergleichbarkeit der Messergebnisse unter festgelegten Rahmenbedingungen sicherzustellen.

Ausnahmen hiervon sind im Einzelfall (z.B. Kühltransporte) zulässig und eindeutig zu dokumentieren.

- Die Messung von Reibungskräften erfolgt im Zugversuch.
- Die Prüfgeschwindigkeit, mit der ein Prüfkörper gezogen wird, beträgt konstant 100 mm/min ± 3 %.
- Die Abtastrate beträgt mindestens 50 Hz.
- Als Prüfklima wird standardmäßig der Temperaturbereich von 15 °C bis 30 °C und ein Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % bis 85 % festgelegt.

Eine Messung erfolgt mit gleichartigen Prüfobjekten in einer Aufspannung, wobei drei Zugvorgänge (drei Hübe) mit einer zwischenzeitlichen Entlastung von mindestens 30 % durchgeführt werden. Die Aufzeichnung der Zugkräfte kann fortlaufend oder mit jeweils neuem Nullpunkt erfolgen.

- Eine Messreihe besteht aus drei Messungen zu je drei Hüben, wobei für jede Messung die Prüfobjekte ausgetauscht oder andere Bereiche (z.B. andere Bereiche der Ladefläche) genutzt werden. Es sind somit mindestens drei Prüfobjekte zu messen.
Der Antrieb für die Relativbewegung muss spiel- und schlupfarm sein und eine konstante Bewegungsgeschwindigkeit erzeugen.
- Das Zugkraft-Messsystem muss den Normen DIN EN 10002 und/oder DIN EN ISO 7500-1, Maschinenklasse 3 oder besser Maschinenklasse 2 entsprechen, dessen Messbereich nach Erfordernis ausgewählt wird und das nach Herstellerangaben jährlich kalibriert wird.
- Die Messung beginnt mit dem Starten der Zugbewegung und erfolgt so lange, bis ein eindeutiges Gleiten bzw. eine eindeutige Bewegung des Prüfkörpers auf seiner Unterlage mit einem Gleitweg von mindestens 50 mm erfasst worden ist. Dann erfolgt ein Stopp dieser Bewegung mit einer Reduzierung der Vorspannkraft um mindestens 30% und ein erneuter Start (siehe Tabelle / Diagramm 6).

Auswertung

Bei der grafischen Auswertung von Kraftverläufen wie er beispielsweise in der nachfolgenden Darstellung illustriert ist, wird zwischen der Kurvenober- und –untergrenze des Gleitbereichs einer jeden Messkurve gemittelt. Bei der numerischen Auswertung wird aus den entsprechenden oberen und unteren Messwerten des Messbereichs gemittelt. Aus jeder Messung sind gegebenenfalls die ermittelten Haft- oder Gleitreibungskräfte bzw. die Haft- oder Gleitreibbeiwerte zu erfassen. Das kann grafisch anhand der Messkurven oder rechnerisch anhand der Messwerte erfolgen.

Zur statistischen Absicherung der Messergebnisse mit je drei Hüben wird ein Vertrauensbereich von 95 % festgelegt.

5.1.7. Übersichtsexzerpt der wichtigsten Ergebnisse aus der Evaluierungsphase zu den GRW-Beiwerten

Geprüft wurde unter anderem unter Zugkraft längs und quer, mit trockenen und mit nassen Komponenten.

In der nachfolgenden Tabelle sind auszugsweise ermittelte Werte gemäß Verfahrensbeschreibung angeführt. Die in der Tabelle gelisteten Werte stellen nicht zwangsläufig die schlechtesten welche für eine Bewertung herangezogen werden können, dar. Sie sollen lediglich die wichtigsten Zusammenhänge verdeutlichen.

Reifendimension	Untergrund	Bedingungen	Vorspannkraft	μ_{GRW}
205/R16 C110/108 T	Stahl glatt, RZ ~ 13	Nass, längs	nein	0,28
205/R16 C110/108 T	Kässbohrer „Urblech“	Trocken, quer	nein	0,35
205/R16 C110/108 T	Kässbohrer „Urblech“	Trocken, quer	ja	0,65
205/R16 C110/108 T	Kässbohrer „Urblech“	Nass, längs	ja	0,50
205/55 R16 91 W	Alu - Strangguss	Eis, quer	ja	0,13
225/40 R18 92 V	Kässbohrer Offroad-Schiene	Trocken, längs	ja	0,73
165/70 R14 85 T	Kässbohrer „Urblech“	Nass, quer	ja	0,53
185/80 R14 C M+S Produziert KW44/1990	Kässbohrer „Urblech“	Nass, quer	ja	0,51
165/70 R14 85 T	Alu - Strangguss	Nass, quer	ja	0,42
205/70 R17,5 139/136 M	Kässbohrer „Urblech“	Nass, quer	ja	0,48
11R 22,5 148/145 M	Kässbohrer „Urblech“	Nass, längs	ja	0,52
385/55 R22,5 158 L	Kässbohrer „Urblech“	Nass, quer	ja	0,44

Tabelle / Diagramm 5: Empirische Testergebnisse

Auswertung einer Messung des GRW-Beiwertes

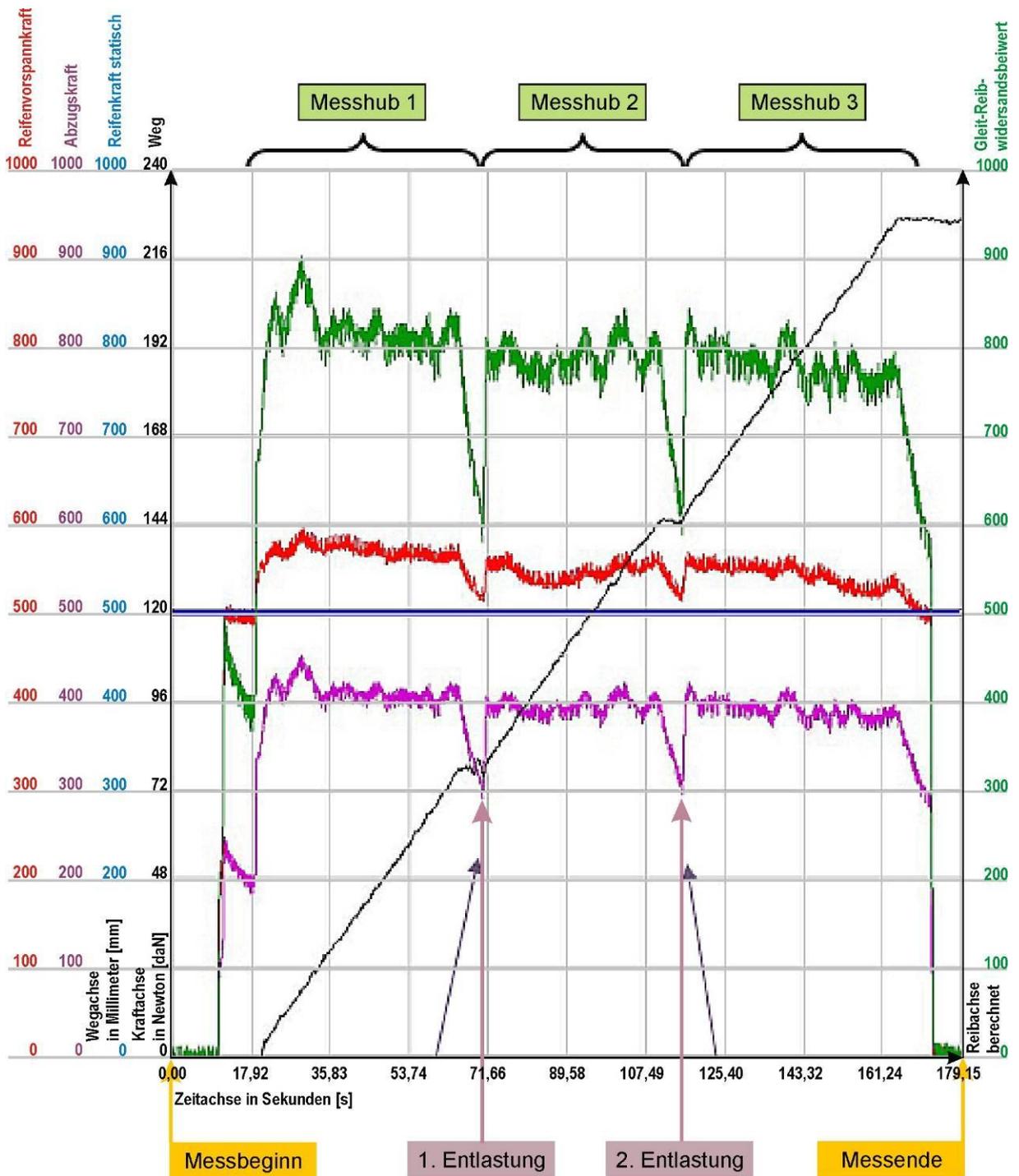


Tabelle / Diagramm 6: Auswertung einer Messung mit 3 Hüben

Jede Wertetabelle / Grafik kann weiteren Testergebnissen gegenübergestellt werden, um die Abhängigkeiten der Testparameter darzustellen.

6. Analyse und nächste Schritte

Die durchgeführten Versuchsreihen geben nun erstmalig fundierte Aufschlüsse zum Thema Reibbeiwert Reifen zu profilierter Fahrbahnoberfläche.

Nachdem mit Hilfe dieses Prüfstandes und der beschriebenen Methode über 800 Zugversuche durchgeführt wurden, können die empirisch ermittelten Werte als gefestigt angesehen werden. Die so ermittelten Reibbeiwerte stellen die entscheidende Kenngröße dar, auf deren Basis die in der realen Anwendung erforderlichen Typen und Mengen der Hilfsmittel zur Ladungssicherung (neu) ermittelt werden müssen. Aufgrund dieser nun neu gewonnenen Erkenntnisse muss das Zusammenwirken „Fahrzeugtransporter / Ladung“ neu definiert werden.

Da nun erstmalig mit dieser physikalischen Grundlage (GRW-Beiwert μ) an eine Berechnung der Ladungssicherung gedacht werden. Es können somit neue Berechnungsmodelle erschaffen werden.

Um die Berechnungsmodelle auch aussagekräftig und nachhaltig gestalten zu können, müssen alle eingesetzten Fahrbahnbleche geprüft und zertifiziert werden. Eine Anwendung der neuen Berechnungsmodelle muss ebenfalls durch dynamische Fahrttests untermauert und belegt werden. Ohne die erfolgreich absolvierte Blechprüfung kann und darf sich kein Hersteller an das neue Berechnungsschema anlehnen oder dieses verwenden. Wie man deutlich aus der Vielzahl der Versuche erkennen kann, ist Blech nicht gleich Blech. Eine wirksame und allgemein gültige Blechzertifizierung kann nur unter Einhaltung aller definierten und zuvor beschriebenen Versuchsparameter erfolgen.

Grundsätzlich hat diese wissenschaftliche Untersuchung gezeigt, dass Fahrzeugtransporte ohne geeignete und zertifizierte Fahrbahnschienen ein erhöhtes Sicherheitsrisiko im öffentlichen Straßenverkehr darstellen können.

Das Projektergebnis kann normierenden Organisationen in Theorie und Praxis präsentiert werden. Das Projektteam geht davon aus dass diese Untersuchungsergebnisse in die offiziellen Richtlinien aufgenommen werden.

7. Literaturverzeichnis

AUVA. (August 2014). *Ladungssicherung im Straßenverkehr*. Wien: Allgemeine Unfallversicherungsanstalt.

BG Bau. (2016). *Ladungssicherung auf Fahrzeugen der Bauwirtschaft*. Berlin: Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft.

Böge, A., & Böge, W. (2015). *Technische Mechanik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Juni 2011). DIN EN 12195-1. *Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen - Sicherheit - Teil 1*. Berlin.

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (April 2009). VDI 2700, Blatt 8.1, Blatt 8.2. *Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen - Sicherung von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen auf Fahrzeugtransportern*. Düsseldorf: VDI e.V.

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (September 2011). VDI 2700 Blatt 14: *Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen - Ermittlung von Reibbeiwerten*. Düsseldorf: VDI e.V.

www.cgvector.com. (2003). *vector_blueprint_Alfa_018*. Von www.cgvector.com/vector_blueprint_Alfa_018 abgerufen

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt den folgend genannten Transport- und Logistikunternehmen, die dieses Projekt mit der Zurverfügungstellung von Rad- / Reifenkombinationen unterstützt haben:

FMS Fahrzeugbau GmbH

Steegener Chaussee 2, 19230 Hagenow (Deutschland); Hr. Geschäftsführer Dirk Friemann

Gartner KG

Linzer Straße 40, 4650 Edt bei Lambach (Österreich); Hr. Prok. Marcus Schwarzbauer

Hödlmayr High & Heavy GmbH

Aisting 33, 4311 Schwertberg (Österreich); Hr. Geschäftsführer Michael Wöckinger

Transordizia S.L.

Plaza Suskadi, Of 67-1, 20305 Irun (Spanien), Director Gerente Paco Cobo