

Forschungsbericht

Untersuchungen zur Ladungssicherung auf Nutzfahrzeugen von Schüttgütern in flexiblen Verpackungen



Forschungs- und Technologiezentrum
Ladungssicherung Selm gGmbH
Auf der Koppel 100

59379 Selm

Selm, 06.05.2015

Gefördert durch:



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Ministerium für Wirtschaft, Energie,
Industrie, Mittelstand und Handwerk
des Landes Nordrhein-Westfalen



An den durchgeführten Versuchen haben mitgewirkt:

Prof. Dr.-Ing. Carsten Dorn, Steinbeis Forschungszentrum -
Institut für Transportwesen und Logistik – ITL Bremerhaven, Bremerhaven

Rainer Elfring – Mitarbeiter der F&T LaSiSe, Leiter Institut

Marc Schmülling – Mitarbeiter der F&T LaSiSe

Thomas Hinz – wissenschaftliche Hilfskraft der F&T LaSiSe

Malte Tien – wissenschaftliche Hilfskraft der F&T LaSiSe

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung.....	7
2.	Versuchsbedingungen	9
3.	Versuchskomponenten	10
3.2	Schiene.....	10
3.3	Schüttgüter	11
3.4	Gitterbox	11
3.5	Standard Sattelaufleger Code XL	12
3.7	Anschlagmittel nach DIN EN 1492-2	17
3.8	Kantenschutz	18
3.9	Messtechnik.....	18
4.	Versuchsvorbereitung	19
4.1	Messung der Gewichtskräfte	19
4.2	Messung der Reibkräfte.....	22
4.3	Messung des Schüttgutwinkels.....	24
5.	Versuchsaufbau	25
5.1	Messstellenplan	29
6.	Versuchsdurchführung	32
7.	Vorgehensweise bei der Versuchsauswertung.....	33
7.1	Theoretische Grundlagen: Ruck	36
7.2	Vorgaben und Normen: Messung der Beschleunigungen	37
7.3	Kennzeichnung der Dateien.....	38
8.	Ursachen für Messabweichungen.....	39
9.	Analyse und Zusammenfassung der Versuchsergebnisse.....	41
9.1	Gitterbox	41
9.2	Big Bag Splitt.....	48
9.3	Big Bag Kies.....	55
9.4	Big Bag Sand	61
10.	Der Schüttwinkel als Vergleichsgröße für das Verhalten von Schüttgütern in flexiblen Verpackungen.....	67
11.	Schlussfolgerung	68
12.	Quellenangaben.....	69
13.	Anlagen.....	71
13.1	Konstruktionszeichnungen.....	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Rollwagen und Laufschiene.....	10
Abbildung 2 - Big Bag	11
Abbildung 3 - Krone Sattelaufleger	12
Abbildung 4 - Spannelement 1 Festende.....	13
Abbildung 5 - Spannelement 1 Losende.....	13
Abbildung 6 - Spannelement 2 Festende.....	14
Abbildung 7 - Spannelement 2 Losende.....	14
Abbildung 8 - Spannelement 3 Festende.....	15
Abbildung 9 - Gurtband.....	15
Abbildung 10 - Einteiliger Zurrgurt	16
Abbildung 11 - Einteiliger Zurrgurt	16
Abbildung 12 - Rundschlinge	17
Abbildung 13 - Rundschlinge	17
Abbildung 14 - Kantenschutzwinkel	18
Abbildung 15 - Messung der Gewichtskraft	19
Abbildung 16 - Gewichtskraft "Big Bag mit Sand".....	20
Abbildung 17 - Messung der Reibkraft.....	22
Abbildung 18 - Reibkraft "Big Bag mit Splitt"	23
Abbildung 19 - Darstellung Schüttgutwinkel	24
Abbildung 20 - Versuchsaufbau Seitenansicht	25
Abbildung 21- Versuchsaufbau Vorderansicht.....	26
Abbildung 22 - Versuchsaufbau Rückansicht	27
Abbildung 23 - Versuchsaufbau Gitterbox	28
Abbildung 24 - Messstellenplan	29
Abbildung 25 - Befestigung Kraftmessdose (Rollwagen).....	30
Abbildung 26 - Befestigung Kraftmessdose (Ladebalken).....	30
Abbildung 27 - Beschleunigungsaufnehmer a-5-4 (Ladefläche).....	30
Abbildung 28 - Beschleunigungsaufnehmer a-5-6 (Rollwagen).....	30
Abbildung 29 - Beschleunigungsaufnehmer a-5-8 (Gitterbox).....	31
Abbildung 30 - Beschleunigungsaufnehmer a-5-8 (Schüttgut 1)	31
Abbildung 31 - Beschleunigungsaufnehmer a-5-8 (Schüttgut 2)	31
Abbildung 32 - Messrad	32
Abbildung 33 - Versuchsbereich Modul 3	32
Abbildung 34 - Freikörperbild Rollwagen	34
Abbildung 35 - Detailansicht Gitterbox.....	39
Abbildung 36 - Ungefilterte Beschleunigungssignale (Gitterbox).....	41
Abbildung 37 - Gefilterte Beschleunigungssignale (Gitterbox)	42
Abbildung 38 - Vergleich der Beschleunigungen (Gitterbox).....	43
Abbildung 39 - Beschleunigungswerte Ladegut (Gitterbox).....	44
Abbildung 40 - Vergleich der gemessenen/errechneten Beschleunigung (Gitterbox) .	45
Abbildung 41 - Gesamtvergleich Beschleunigungen (Gitterbox)	46

Abbildung 42 - Gesamtübersicht der prozentualen Abweichungen (Gitterbox)	46
Abbildung 43 - Ungefilterte Beschleunigungssignale (Big Bag Splitt).....	48
Abbildung 44 - Gefilterte Beschleunigungssignale (Big Bag Splitt)	49
Abbildung 45 - Vergleich der Beschleunigungen (Big Bag Splitt).....	50
Abbildung 46 - Beschleunigungswerte Ladegut (Big Bag Splitt).....	51
Abbildung 47 - Vergleich der gemessenen/errechneten Beschleunigung (Big Bag Splitt)	52
Abbildung 48 - Gesamtvergleich Beschleunigungen (Big Bag Splitt)	53
Abbildung 49 - Gesamtübersicht der prozentualen Abweichungen (Big Bag Splitt)....	54
Abbildung 50 - Ungefilterte Beschleunigungssignale (Big Bag Kies).....	55
Abbildung 51 - Gefilterte Beschleunigungssignale (Big Bag Kies)	56
Abbildung 52 - Vergleich der Beschleunigungen (Big Bag Kies).....	57
Abbildung 53 - Beschleunigungswerte Ladegut (Big Bag Splitt).....	58
Abbildung 54 - Vergleich der gemessenen/errechneten Beschleunigung (Big Bag Splitt)	59
Abbildung 55 - Gesamtvergleich Beschleunigungen (Big Bag Splitt)	60
Abbildung 56 - Gesamtübersicht der prozentualen Abweichungen (Big Bag Splitt)....	60
Abbildung 57 - Ungefilterte Beschleunigungssignale (Big Bag Sand)	61
Abbildung 58 - Gefilterte Beschleunigungssignale (Big Bag Sand).....	62
Abbildung 59 - Vergleich der Beschleunigungen (Big Bag Sand).....	63
Abbildung 60 - Beschleunigungswerte Ladegut (Big Bag Sand)	64
Abbildung 61 - Vergleich der gemessenen/errechneten Beschleunigung (Big Bag Sand).....	65
Abbildung 62 - Gesamtvergleich Beschleunigungen (Big Bag Sand).....	66
Abbildung 63 - Gesamtübersicht der prozentualen Abweichungen (Big Bag Sand)....	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1- Übersicht Gewichtskräfte	20
Tabelle 2 - Zusammenfassung der Gewichtskräfte	21
Tabelle 3 - Zusammenfassung Reibkräfte	23
Tabelle 4 - Zusammenfassung Schüttgutwinkel	24
Tabelle 5 - Kennzeichnung der Messdateien.....	38
Tabelle 6 - Gegenüberstellung: Schüttgutwinkel/Durchschn. Abweichung der Beschleunigungen	67

Formelverzeichnis

Formel 1 - Grundgleichung der Mechanik.....	7
Formel 2 - Wirkende Kräfte im Freikörperbild Rollwagen	35
Formel 3 - Berechnung der Beschleunigung aus der gemessenen Kraft	35
Formel 4 - Berechnung Geschwindigkeit	36
Formel 5 - Berechnung Beschleunigung.....	36
Formel 6 - Berechnung Ruck	36

1. Einführung

Für die Ladungssicherung von Gütern auf Straßenfahrzeugen finden derzeit die erforderlichen Maßnahmen gemäß der VDI 2700 ff. bzw. der europäischen Norm DIN-EN 12195-1 Anwendung. In diesen Richtlinien und der bisherigen Rechenpraxis zur Ladungssicherung wird nicht zwischen festen und plastisch verformbaren Ladegütern unterschieden.

Mit dem Entwurf der „VDI 2700 Blatt 18: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Sichern von Schüttgütern in flexiblen Verpackungen (Säcke, FIBC)“ wurde im Oktober 2014 der erste Versuch unternommen, eine entsprechende nationale Norm für die Ladungssicherung von Schüttgütern in flexiblen Verpackungen (Big Bags) zu entwickeln. Zum heutigen Zeitpunkt gibt es keine Regelung, in der die stofftypischen Eigenschaften von Schüttgütern Berücksichtigung finden. Fakt ist aber, dass Schüttgüter eben nicht dieselben Verhaltensweisen wie feste Güter aufweisen. Die unterschiedlichen Stoffeigenschaften der Schüttgüter bringen unterschiedliche innere Reibungen hervor. Das dadurch hervorgerufene spätreaktive Verhalten beeinflusst die auftretende Beschleunigung im Ladungsmittelpunkt.

In den bestehenden Richtlinien und Rechenverfahren werden dynamische Eigenbewegungen durch Rutschen, Kippen, Verschieben oder eine Kombination aus mehreren Bewegungen nicht berücksichtigt. Ebenso wenig gibt es Klarheit darüber, welche Bewegungsarten in welchem Umfang toleriert werden können.

Die Grundgleichung der Mechanik besagt, dass die Kraft F , die einer Masse m die Beschleunigung a erteilt, dem Produkt aus der Masse m und der Beschleunigung a entspricht.¹

$$F = m * a = m * \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Formel 1 - Grundgleichung der Mechanik

Zur Vereinfachung und aufgrund verschiedenster Fahrzeugeigenschaften werden in der bisherigen Rechenpraxis, unabhängig von der Art des Ladegutes, pauschale Beschleunigungswerte für den Güterverkehr auf Straßenfahrzeugen angenommen.

¹ Vgl.: http://www.dieter-heidorn.de/Physik/VS/Mechanik/K03_Grundgleichung/K03_Grundgleichung.html (Stand: 17.03.15)

Gemäß der europäischen Norm DIN-EN 12195-1 betragen diese Beschleunigungsbeiwerte:

In Längsrichtung (vorwärts):	0,8 g
In Längsrichtung (rückwärts):	0,8 g
Quer (nur Rutschen):	0,5 g
Quer (Kippen)	0,5 +0,2 g (für instabile Ladungen)
Vertikal nach unten	1,0 g

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die Verhaltensweisen von Schüttgütern und festen Gütern bei Bremsvorgängen auf Nutzfahrzeugen überprüft. Ziel war es zu ermitteln, welchen Einfluss die verschiedenen Stoffeigenschaften der Schüttgüter auf die auftretenden Beschleunigungen im Ladungsschwerpunkt haben und welche Unterschiede sich zwischen festen und flexiblen Ladegütern ergeben.

Zusätzlich sollten die derzeit gültigen Normen und insbesondere die oben angegebenen Grundgleichung auf ihre Anwendbarkeit in Bezug auf Schüttgüter überprüft werden. Festzustellen war, welche Abweichungen zur Formel sich durch stofftypische Eigenschaften und Verhaltensweisen der jeweiligen Schüttgüter ergeben.

2. Versuchsbedingungen

Ort der Versuchsdurchführung war das Freiluft-Forschungslabor der Forschungs- und Technologiezentrum Ladungssicherung Selm gGmbH (im Folgenden F&T LaSiSe), Auf der Koppel 100, 59379 Selm.

Die Versuche fanden unter folgenden klimatischen Bedingungen statt:

18.11.2014 – Messungen der Gewichtskräfte

Temperatur: 9°C

Wetter: Bewölkt

Niederschlag: –

Bemerkungen: –

19.11.2014 – Messungen der Reibkräfte

Temperatur: 8°C

Wetter: Bewölkt

Niederschlag: –

Bemerkungen: Messungen fanden in einer Halle statt

21.11.2014 – Bremsversuche (Sand, Kies)

Temperatur: 7°C

Wetter: Heiter

Niederschlag: –

Bemerkungen: Leichter Bodenfrost, hohe Luftfeuchtigkeit (80%)

24.11.2014 – Bremsversuche (Splitt, Gitterbox)

Temperatur: 8°C

Wetter: Heiter

Niederschlag: –

Bemerkungen: Nasser Asphalt, hohe Luftfeuchtigkeit (80%)

3. Versuchskomponenten

3.1 Rollwagen

Der Rollwagen ist aus einem Quadratrohr 60x60x5 mm ST 37 gefertigt. An der Vorder- und Rückseite befinden sich 3 angeschweißte Ringböcke mit einer Tragfähigkeit von jeweils 3,15 t.

Er ist so konstruiert, dass alle gängigen Formen von Ladungsträgern – sowohl längs als auch quer zur Fahrtrichtung – mittels Anschlagleisten fixiert werden können. Die Anschlagleisten bestehen aus einem 8 mm dicken Flachstahl mit den Abmessungen 90x120 mm bzw. 90x250 mm. Die Leisten werden je nach Bedarf mit dem Rollwagen verschraubt und der Ladungsträger dadurch fest mit dem Wagen verbunden. Als Lagerung des Rollwagens kommen einreihige Zylinderrollenlager zur Anwendung. Vier äußere Stellringe dienen der seitlichen Führung auf den Schienen.

3.2 Schiene

Die Laufschiene des Rollwagens werden aus einem U-80 ST 37 Profil mit einer Länge von 2050 mm gebildet. Zur seitlichen Führung dient ein Flachstahl mit den Abmessungen 40x5 mm. Seitliche U-50-Profile dienen der Verbindung von Lauf- und Führungsschiene sowie der Fixierung auf den Holzbalken. Diese Konstruktion hat sich in der Versuchsdurchführung bewährt, da sie absolut formstabil ist und optimal auf der Ladefläche gesichert werden kann.



Abbildung 1 - Rollwagen und Laufschiene

3.3 Schüttgüter

Die Schüttgüter befinden sich in Big Bags mit einem Gesamtgewicht von je einer Tonne. Die Big Bags haben eine Vierpunktaufhängung. Jede Hebevorrichtung ist an zwei Punkten fixiert, wie auf der unteren Abbildung dargestellt.

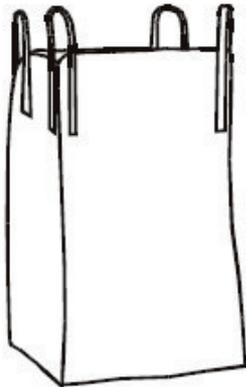


Abbildung 2 - Big Bag
(Podzuweit: Schüttgut in Big Bags, 2012, S. 7)

Für die Versuchsdurchführung werden drei unterschiedliche Schüttgüter mit verschiedenen Konsistenzen verwendet:

- Gesiebter Sand
- Splitt (2-5mm)
- Quarkies (Ø16-32mm)

Die Ermittlung der exakten Gewichtskräfte wird unter Kapitel 4.1 (Seite 19 ff.) beschrieben.

3.4 Gitterbox

Die verwendete Gitterbox kommt als genormte Prüflast für Fahrversuche auf dem Gelände der F&T LaSiSe zur Anwendung und dient in diesem Zusammenhang als Referenzwert. Die Gewichtskraft wurde im Rahmen eines Versuches zwischen dem 12.08.2014 und 22.08.2014 ermittelt und beträgt 10452 N. Somit entspricht sie in etwa der Gewichtskraft der Schüttgüter.

(Identifikationsnummer der Gitterbox: 175 69 143)

3.5 Standard Sattelaufleger Code XL

Hersteller: Krone

Modell: Profi Liner

Baujahr: 2013

Ausführung: Curtainsider

Zurripunktfestigkeit der Zurrleiste: 2000 daN pro Zurrloch, max. 8000 daN/m



Abbildung 3 - Krone Sattelaufleger

3.6 Zurrmittel nach DIN EN 12195-2

Spannelement 1 Festende
Modell: Langhebelzugratsche
Hersteller: Dolezych
Gurtbandbreite: 50 mm
Gurtbandmaterial: PES
LC: 2500 daN
STF: 600 daN
SHF: 50 daN
Gebrauchszustand: Neuwertig



Abbildung 4 - Spannelement 1 Festende

Spannelement 1 Losende
Hersteller: Dolezych
Gurtbandbreite: 50 mm
Gurtbandmaterial: PES
LC: 2500 daN
Gebrauchszustand: Neuwertig



Abbildung 5 - Spannelement 1 Losende

Spannelement 2 Festende
Hersteller: Dolezych
Modell: Langhebelzugratsche
Gurtbandbreite: 50 mm
Gurtbandmaterial: PES
LC: 2500 daN
STF: 600 daN
SHF: 50 daN
Gebrauchszustand: Neuwertig

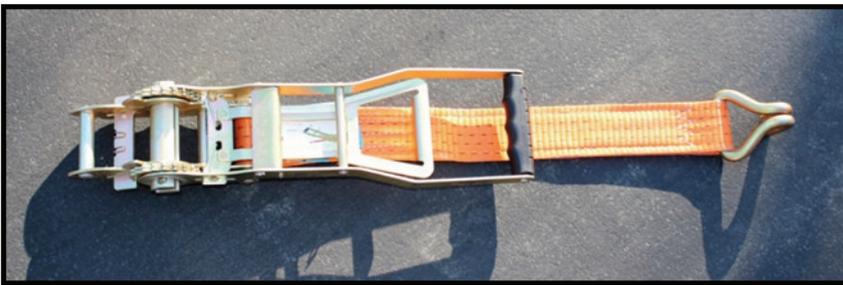


Abbildung 6 - Spannelement 2 Festende

Spannelement 2 Losende
Hersteller: Dolezych
Gurtbandbreite: 50 mm
Gurtbandmaterial: PES
LC: 2500 daN
Gebrauchszustand: Neuwertig



Abbildung 7 - Spannelement 2 Losende

Gefördert durch:



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Ministerium für Wirtschaft, Energie,
Industrie, Mittelstand und Handwerk
des Landes Nordrhein-Westfalen



Spannelement 3 Festende
Hersteller: Dolezych
Modell: Zugratsche
Gurtbandbreite: 50 mm
Gurtbandmaterial: PES
LC: 2500 daN
STF: 300 daN
SHF: 50 daN
Gebrauchszustand: Neuwertig

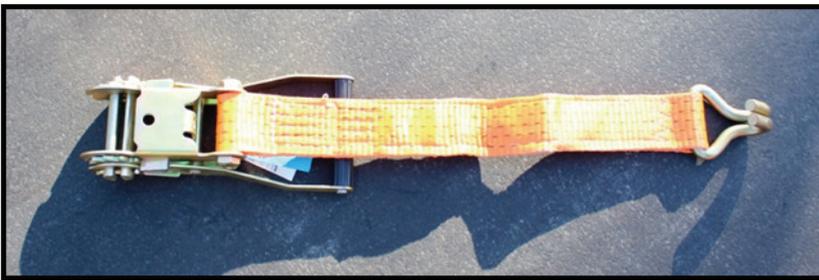


Abbildung 8 - Spannelement 3 Festende

Gurtband
Hersteller: Dolezych
Gurtbandbreite: 50 mm
Gurtbandmaterial: PES
LC: 2500 daN
Verbindungselement: Haken
Gebrauchszustand: Neuwertig



Abbildung 9 - Gurtband

Einteiliger Zurrurt
Modell: Zugratsche
Hersteller: Dolezych
Gurtbandbreite: 35 mm
Gurtbandmaterial: PES
LC: 2000 daN
Gebrauchszustand: neuwertig



Abbildung 10 - Einteiliger Zurrurt

Einteiliger Zurrurt
Modell: Zugratsche
Hersteller: Dolezych
Gurtbandbreite: 25 mm
Gurtbandmaterial: PES
LC: 700 daN
STF: 266 daN
SHF: 25 daN
Gebrauchszustand: gebraucht, keine erkennbaren Schäden, keine Abergereife



Abbildung 11 - Einteiliger Zurrurt

Gefördert durch:



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Ministerium für Wirtschaft, Energie,
Industrie, Mittelstand und Handwerk
des Landes Nordrhein-Westfalen



3.7 Anschlagmittel nach DIN EN 1492-2

Rundschlinge

Hersteller: Dolezych

WLL: 3000 kg

Material: PES

Gebrauchszustand: neuwertig



Abbildung 12 – Rundschlinge

Rundschlinge

Hersteller: Dolezych

WLL: 1000 kg

Material: PES

Gebrauchszustand: gebraucht, keine erkennbaren Schäden, keine Ablegereife



Abbildung 13 - Rundschlinge

3.8 Kantenschutz

Kantenschutzwinkel

Material: PE



Abbildung 14 - Kantenschutzwinkel

3.9 Messtechnik

Bei den fahrdynamischen Untersuchungen sind folgende Datenlogger, Messverstärker und Sensoren zum Einsatz gekommen:

Datenlogger – Typ: HBM CX22-W

Messverstärker – Typ: HBM MX840A

Kraftmessdose – Typ: HBM U9C
Max. Nennkraft: 50kN

Triaxialer Beschleunigungsaufnehmer – Typ: ASC 5521-005
Messbereich: 5g

Pegasem Messrad – Typ: 5W-20

Winkelmesser – Typ: DigiPas DWL180S
Messbereich: 0°- ±90°
Auflösung: 0,05°

4. Versuchsvorbereitung

Im folgenden Kapitel werden alle im Rahmen der Versuchsvorbereitung durchgeführten Messungen beschrieben, die für die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse erforderlich sind.

4.1 Messung der Gewichtskräfte

Vor der Durchführung der Bremsversuche wurden die Gewichtskräfte der Schüttgüter, des Rollwagens, der verwendeten Palette sowie der Antirutschmatte bestimmt. Der Versuchsaufbau ist auf der unteren Abbildung exemplarisch für alle gewogenen Güter dargestellt und beschrieben.

Zwischen dem zu verriegelndem Gut und der Hubgabel des Staplers wurde die Kraftmessdose implementiert. Die Messung wurde gestartet und das zu verriegelnde Gut langsam angehoben.



Abbildung 15 - Messung der Gewichtskraft

Auf der unteren Abbildung wird deutlich, wie die Gewichtskraft beim Anheben des Big Bags ansteigt und die Messkurve nach ca. 35 Sekunden in einen konstanten Kraftverlauf übergeht. Ab diesem Zeitpunkt beginnt der messrelevante Bereich. Die ermittelten Messreihen wurden nach der Versuchsdurchführung in ein Excel-Format umgewandelt und der jeweilige Mittelwert der Gewichtskraft über einen Zeitraum von etwa 30 Sekunden gebildet.



Abbildung 16 - Gewichtskraft "Big Bag mit Sand"

In der folgenden Tabelle sind die ermittelten Gewichtskräfte der gewogenen Güter zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1- Übersicht Gewichtskräfte

Gewogenes Gut	Gewichtskraft [N]
Sand	10852
Gitterbox	10452
Kies	10499
Splitt	10101
Rollwagen	1169
Palette	186
Antirutschmatte	93

Für die Bremsversuche der Schüttgüter sind folgende in der Tabelle 1 angegebenen Komponenten zu addieren:
Ladegut, Rollwagen, Palette, zwei Antirutschmatten.

Für den Bremsversuch der Gitterbox sind folgende in der Tabelle 1 angegebenen Komponenten zu addieren:
Ladegut, Rollwagen, eine Antirutschmatte

Die zusammengefassten Gewichtskräfte der vier verwendeten Ladegüter, wie sie auch in der Versuchsdurchführung zum Einsatz gekommen sind, sind in der folgenden Tabelle in aufsteigender Reihenfolge dargestellt.

Tabelle 2 - Zusammenfassung der Gewichtskräfte

Zusammenfassung der Gewichtskräfte	
Ladegut	Gewichtskraft gesamt [N]
Splitt	11642
Gitterbox	11714
Kies	12040
Sand	12393

4.2 Messung der Reibkräfte

Um die Reibkräfte auf ein Minimum zu reduzieren, wurden im Rahmen der Versuchsvorbereitung die Zylinderrollenlager des Rollwagens ausreichend geölt, die Rollen und Stellringe auf ihre Leichtläufigkeit überprüft und die Kontaktflächen gereinigt.

Die Ermittlung fand in Anlehnung an die Richtlinie „VDI 2700 Blatt 14: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Ermittlung von Reibbeiwerten“ statt. Die abweichende Außentemperatur bei der Ermittlung der Reibkraft betrug 8°C. Die Messung erfolgte mit drei Zugvorgängen mit einer zwischenzeitlichen Entlastung, so dass der Rollwagen dabei zum Stillstand kam. Die Aufzeichnung erfolgte mit einem jeweils neuen Nullpunkt.

Die Prüfgeschwindigkeit der Messeinrichtung betrug – abweichend zur oben angegebenen VDI-Norm – ca. 400 mm/min bei einem Gleitweg von etwa 100 mm pro Messung. Zwischen dem Rollwagen, der Kraftmessdose und dem Elektrozyylinder wurden durch zwei Metallbolzen spielarme Verbindungen geschaffen, um störende Einflüsse durch Dehnung zu minimieren.

Der Versuchsaufbau zur Ermittlung der Reibkräfte ist auf der folgenden Abbildung dargestellt.

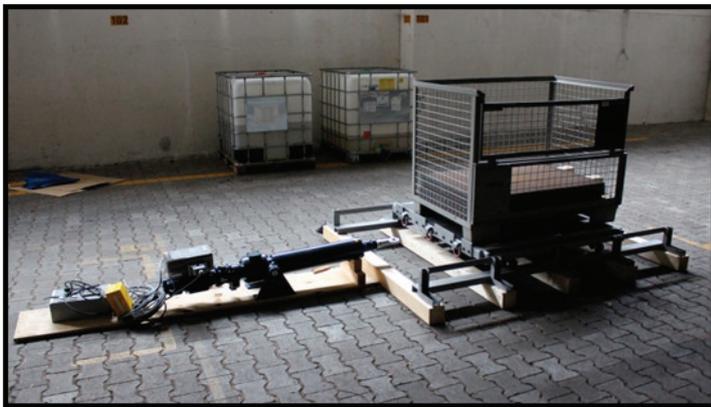


Abbildung 17 - Messung der Reibkraft

Die Schienen wurden mit Antirutschmatten unterlegt, bis keine Neigung mehr feststellbar war. Die eigentliche Versuchsdurchführung fand in Bezug auf die Neigung unter denselben Rahmenbedingungen statt, da die Schienenkonstruktion auch auf der Ladefläche des Aufliegers zu allen Seiten ausgerichtet wurde. Die Gewichtskräfte der Ladegüter bei der Ermittlung der Reibkraft entsprachen den Werten aus Tabelle 2 (Seite 21).

Die Messung wurde gestartet und der Rollwagen mit konstanter Relativgeschwindigkeit über die Schienen gezogen. Um das Ergebnis statistisch abzusichern, wurde die Ermittlung der Reibkraft 3-mal für jedes Ladegut durchgeführt und aus den Messwerten der Mittelwert gebildet.

Auf dem unteren Graphen ist die Messung der Reibkraft abgebildet. Zu Beginn der Kurve wurde der höchste Wert erreicht, da zur Überwindung der Haftreibung die größte Kraft notwendig ist.

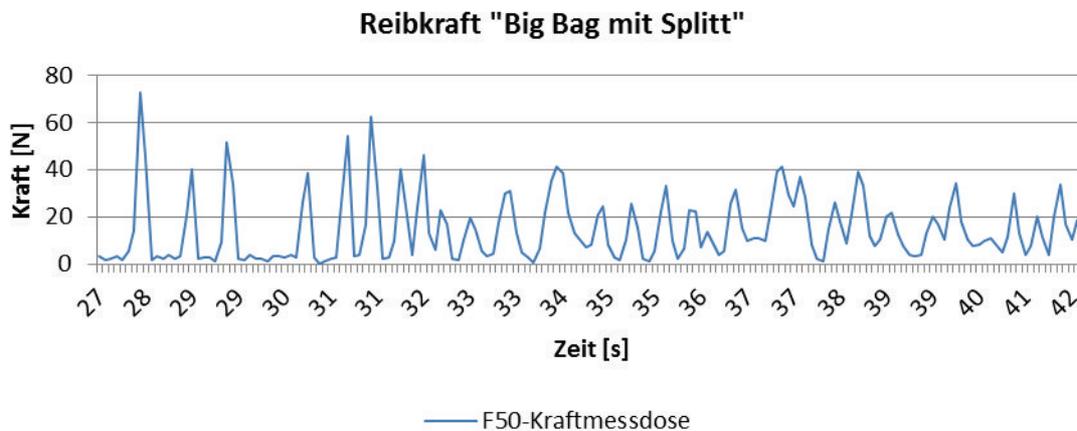


Abbildung 18 - Reibkraft "Big Bag mit Splitt"

Die Ergebnisse der Reibkräfte sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 3 - Zusammenfassung Reibkräfte

Ladegut	Reibkraft 1. Durchgang [N]	Reibkraft 2. Durchgang [N]	Reibkraft 3. Durchgang [N]	Mittelwert Reibkraft [N]
Sand	7,5	15,8	24,7	16,0
Gitterbox	29,0	7,9	37,2	24,7
Kies	12,1	11,3	74,6	32,7
Splitt	15,7	23,3	37,1	25,4

Es ist eine sehr breite Streuung der Messergebnisse bei den einzelnen Durchgängen zu erkennen. Einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Messergebnisse kann das geringe Spiel innerhalb der Verbindung zwischen Elektrozyylinder und Rollwagen haben. Darauf lässt sich aufgrund der relativ großen Ausschläge der Messkurve auf dem oberen Diagramm deuten.

Aufgrund der geringen Größenordnung spielen diese Reibkräfte in der Versuchsdurchführung allerdings eine unerhebliche Rolle.

4.3 Messung des Schüttgutwinkels

Der Schüttgutwinkel stellt einen Indikator für das Fließverhalten von Schüttgütern dar. Schüttgüter mit einem hohen Schüttgutwinkel ($>45^\circ$) neigen zum „Verklumpen“, wobei Schüttgüter mit einem Winkel von $<15^\circ$ eine sehr hohe Fließfähigkeit aufweisen.²

Die Rieselfähigkeit eines Gutes (und damit die Größe des Schüttgutwinkels) wird durch folgende Faktoren beeinflusst: Feuchte- und Ölgehalt des Gutes, Verdichtung, unterschiedliche Körnung und die Oberflächenbeschaffenheit der Körner.

Dieser Winkel lässt sich nicht über eine bestimmte Größe hinaus steigern. Wird ein Schüttgut, wie auf der unteren Abbildung dargestellt, ausgeschüttet, ergibt sich für jede Menge stets derselbe Schüttgut- bzw. Kegelmessungswinkel.

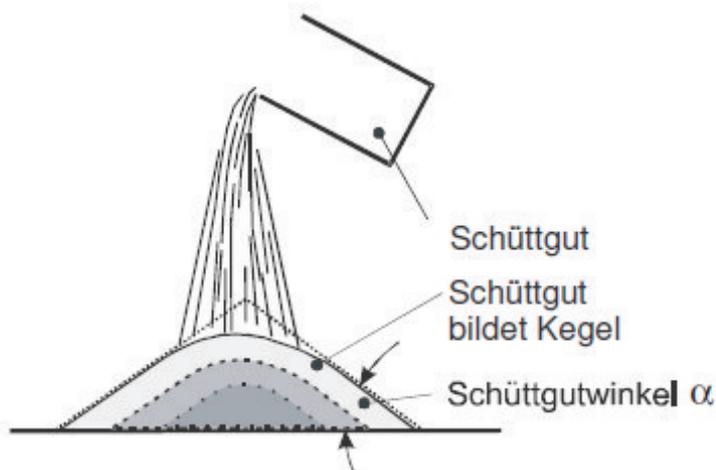


Abbildung 19 - Darstellung Schüttgutwinkel
(Podzuweit: Schüttgut in Big Bags, 2012, S. 9)

Um festzustellen, ob der Schüttgutwinkel als Vergleichsgröße zum Verhalten der untersuchten Ladegüter herangezogen werden kann, wurde dieser nach der Versuchsdurchführung ermittelt.

Für die Ermittlung wurde eine jeweils gleich große Menge des jeweiligen Gutes, wie auf der oberen Abbildung dargestellt, auf eine ebene Fläche ausgeschüttet und der Winkel mit einem digitalen Winkelmessgerät ermittelt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle in absteigender Reihenfolge dargestellt.

Tabelle 4 - Zusammenfassung Schüttgutwinkel

Ladegut	Schüttgutwinkel
Splitt	33,7°
Kies	30,7°
Sand	25,8°

² Vgl. Podzuweit: Schüttgut in Big Bags, 2012, S. 11

Die Formstabilität des Big Bags kann mit abnehmendem Winkel immer weniger garantiert werden. Es lässt sich aus den Ergebnissen also schließen, dass der Big Bag mit Splitt im Vergleich zu den anderen Gütern formstabiler ist und der mit Sand gefüllte Big Bag eher zu plastischen Verformungen neigt.

Wie sich die Einflüsse der Schüttgutwinkel auf die Messergebnisse der verschiedenen Ladegüter ausgewirkt haben, wird in Kapitel 10 (Seite 67) erläutert.

5. Versuchsaufbau

Die Schienen des Rollwagens wurden vor der Versuchsdurchführung auf fünf Holzbalken mit den Abmessungen 100 x 100 x 1700 mm festgeschraubt. Dadurch wird eine starre Konstruktion gebildet und die Schienen bleiben auch bei starken Verzögerungen oder hohen Fliehkräften absolut parallel zueinander liegen.

Die Neigung des aufgesattelten Aufliegers wurde durch das Absenken der hinteren LKW-Achse minimiert. Die Holzbalken der Schienen wurden im Anschluss mit Antirutschmatten unterlegt, bis sie sowohl in Längs- als auch in Querrichtung keine Neigungen mehr aufwiesen. Durch diese Maßnahmen wurde sichergestellt, dass die Messergebnisse nicht durch Neigungen verfälscht werden bzw. die Bremsversuche unter denselben Bedingungen stattfinden wie die Ermittlung der Reibkräfte.

Die Schienen liegen parallel zur Fahrtrichtung und werden zur Sicherung formschlüssig an den vorderen Multi-Block-Ladebalken des Trailers angelegt. Rückseitig werden sie mit einem Gurt vor dem Verrutschen gesichert (siehe Abbildungen 20 (Seite 25) und 22 (Seite 27)).



Abbildung 20 - Versuchsaufbau Seitenansicht

Zur Sicherung des Rollwagens und zur Aufnahme der entstehenden Kraft kommen insgesamt zwei Multi-Block-Ladebalken zum Einsatz (am linken und rechten Bildrand der Abbildung 20 (Seite 25) zu erkennen).

Die vordere gelbe Rundschlinge ist einmal umgelegt und sichert den Rollwagen beim Beschleunigen, damit er sich nur bedingt entgegen der Fahrtrichtung bewegen kann. Sie ist jeweils am Ladebalken und am mittleren Klotz der Palette befestigt.



Abbildung 21- Versuchsaufbau Vorderansicht

Die Kraftmessdose ist zwischen dem mittleren Ringbock des Rollwagens und der hinteren gelben Rundschlinge implementiert. Die Rundschlinge ist im direkten Zug über zwei Gurtbänder am hinteren Ladebalken fixiert und dient somit der Sicherung des Rollwagens beim Verzögern. Die beiden Rundschlingen haben eine leichte Vorspannung, damit eine schlagartige Krafteinleitung in die Kraftmessdose möglichst verhindert wird. Der Rollweg beträgt bei maximaler Verzögerung ca. 15 cm.

Die verwendete Industriepalette ist vollflächig mit Antirutschmatten unterlegt und liegt auf dem Rollwagen bündig an vier Anschlagleisten an. Sie ist des Weiteren durch einen einteiligen Zurring am Rollwagen fixiert.

Um zu verhindern, dass der Rollwagen bei starker Verzögerung vollständig nach vorne kippt, wurde ein weiterer Gurt zwischen Palette und der Ladefläche gespannt (siehe Abbildung 20, Seite 21). Dieser Gurt hat eine sehr geringe Vorspannung, somit ist die erzeugte Bremswirkung durch die Reibung auf den Brettern der Palette zu vernachlässigen. Durch den relativ hohen Schwerpunkt und die Versatzbewegungen der Big Bags, war während des Bremsvorganges eine nicht unerhebliche Kippbewegung des Rollwagens zu erkennen.

Der Versuchsaufbau und die Befestigung der Big Bags auf dem Rollwagen sind für alle Schüttgüter identisch. Die Vorgehensweise ist im Folgenden beispielhaft für alle Güter beschrieben.

Die Big Bags stehen vollflächig auf Antirutschmatten und werden über ein Kopf-Lashing mit einer Rundschlinge durch die Aufhängeschlaufen über zwei Zurrgurte an der Ladefläche befestigt. Um sicherzustellen, dass die Kraft nur in die Kraftmessdose eingeleitet wird, haben die roten Zurrgurte des Lashings keine Vorspannung (deutlich zu erkennen auf Abbildung 20, Seite 25).

Die Gurte dienen ausschließlich der Sicherung gegen das (Aus-)Kippen und Verrutschen der Big Bags. Dieses „Sicherungssystem“ hat sich während des Versuchsablaufes bewährt, da es erst zum Einsatz kommt, wenn sich die Big Bags sehr stark nach vorne neigen bzw. ihre Positionen auf der Palette verlassen. Zu diesem Zeitpunkt ist die hintere Rundschlinge stets vollständig gespannt und somit die maximale Kraft in der Kraftmessdose erreicht.



Abbildung 22 – Versuchsaufbau Rückansicht

Die Gitterbox steht vollflächig auf Antirutschmatten und ist durch die Anschlagleisten auf dem Rollwagen fixiert. Um zu verhindern, dass die Stahlplatten bei starken Verzögerungen durch das Gitter drücken, werden sie mit zwei Zurrgurten auf der Gitterbox niedergezurrt. Die vordere Rundschlinge ist bei den Bremsversuchen der Gitterbox am mittleren Ringbock des Rollwagens befestigt. Der Rollweg sowie die Vorspannung der beiden Rundschlingen sind in diesem Fall dieselben wie bei den Schüttgütern.



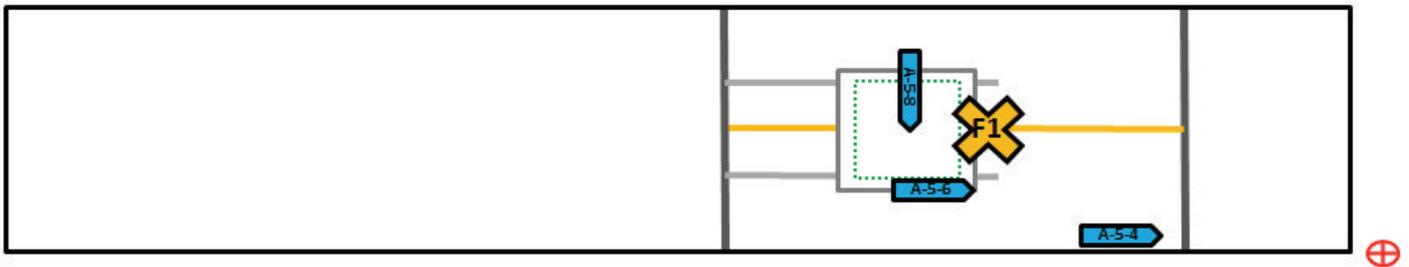
Abbildung 23 - Versuchsaufbau Gitterbox

5.1 Messstellenplan

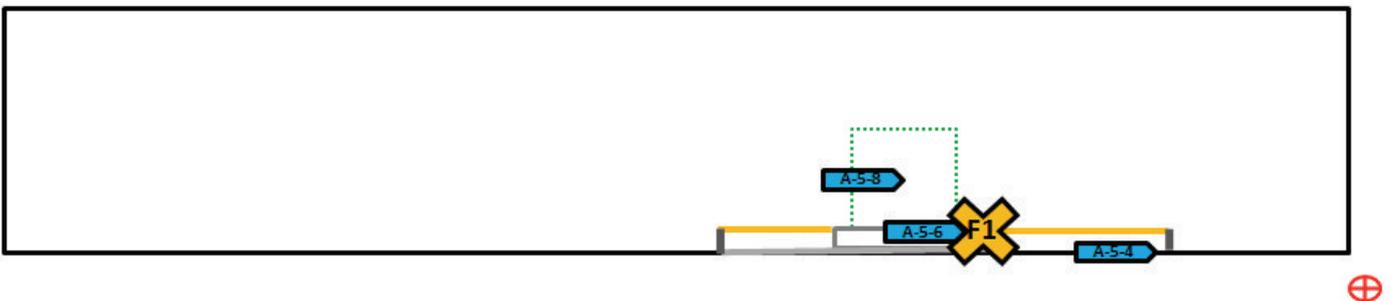
Auf den folgenden Abbildungen sind die Anordnungen der Messtechniken grafisch dargestellt.

Fahrtrichtung
←

Draufsicht



Seitenansicht



Legende



Abbildung 24 - Messstellenplan

Die Sensoren wurden wie folgt auf der Ladefläche, dem Rollwagen und an bzw. in den Ladegütern angebracht:

Die Kraftmessdose ist am mittleren Ringbock des Rollwagens und über eine Rundschlinge und zwei Gurtbänder am Multi-Block-Ladebalken des Trailers befestigt.

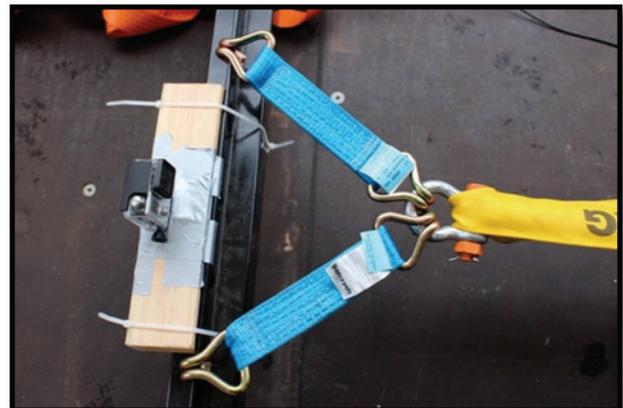
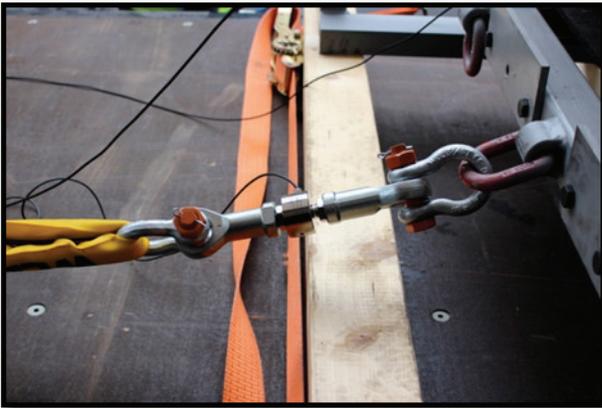


Abbildung 25 - Befestigung Kraftmessdose (Rollwagen)
Abbildung 26 - Befestigung Kraftmessdose (Ladebalken)

Die Beschleunigungsaufnehmer sind an folgenden Positionen angebracht:

- auf der Ladefläche des Aufliegers (a-5-4)
- am Rollwagen (a-5-6)

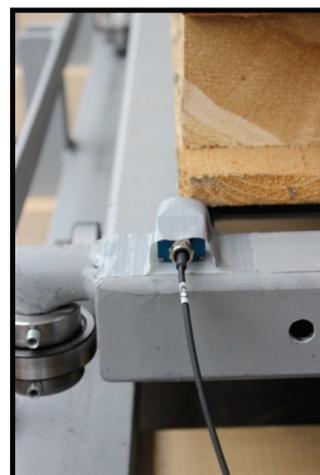
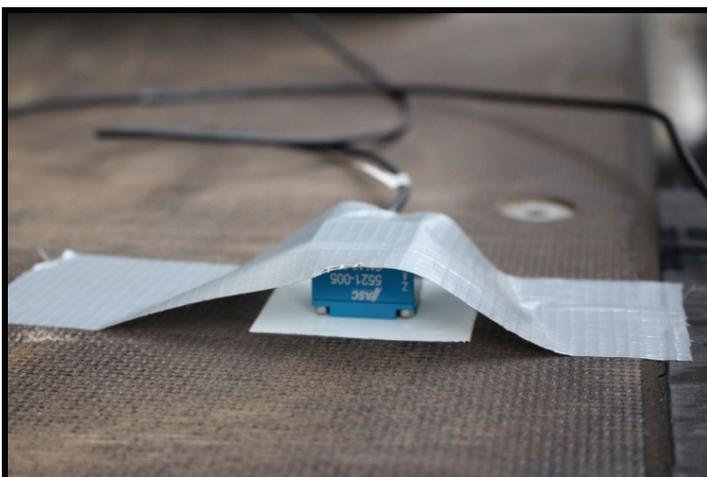


Abbildung 27 - Beschleunigungsaufnehmer a-5-4 (Ladefläche)
Abbildung 28 - Beschleunigungsaufnehmer a-5-6 (Rollwagen)

-im Schwerpunkt der Schüttgüter bzw. im Ladungsmittelpunkt der Gitterbox (a-5-8)



Abbildung 29 - Beschleunigungsaufnehmer a-5-8 (Gitterbox)

Da sich das Schüttgut beim Fahren – insbesondere beim Bremsen – bewegt, bestehen die Gefahren, dass der Beschleunigungsaufnehmer nicht mehr optimal im Ladungsschwerpunkt ausgerichtet ist bzw. der Aufnehmer und die Verkabelung beschädigt werden kann.

Um diese Risiken zu verhindern, wurde der Beschleunigungsaufnehmer zwischen zwei miteinander verschraubten Flacheisen angebracht. Die Verkabelung wurde durch einen Schlauch gezogen, um diese vor Beschädigungen durch Bewegungen des Schüttgutes zu schützen. Diese Konstruktion wurde im Ladungsschwerpunkt des Schüttgutes (ca. 40 cm tief) platziert und zu allen Seiten ausgerichtet.



Abbildung 30 - Beschleunigungsaufnehmer a-5-8 (Schüttgut 1)



Abbildung 31 - Beschleunigungsaufnehmer a-5-8 (Schüttgut 2)

Das Messrad ist als Nachläufer am Fahrzeugaufbau des Aufliegers befestigt, wie auf der unteren Abbildung dargestellt.



Abbildung 32 - Messrad

6. Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung fand auf dem Modul 3 parallel zum Aquaplaning-Bereich statt. Auf diesem Abschnitt ist die Fahrbahn absolut eben. Die Bremsversuche werden etwa 20 Meter hinter dem Beginn des Bereiches eingeleitet. Somit ist sichergestellt, dass sich beim Bremsvorgang der komplette Sattelzug auf einer ebenen Fläche befindet und die Messergebnisse nicht durch Hangabtriebskräfte beeinflusst werden.



Abbildung 33 - Versuchsbereich Modul 3

Die Bremsversuche finden mit maximaler Verzögerung aus einer Geschwindigkeit von 15 km/h statt. Der Sattelzug startet im Bereich des Wendehammers (linke Bildhälfte, obere Abbildung) und fährt gerade auf die Bremsstrecke zu. Es ist darauf zu achten, dass eine konstante Verzögerung durchgeführt wird.

Damit durch die Bremsversuche keine Verdichtung der Schüttgüter im vorderen Bereich der Big Bags stattfindet, werden sie nach jeder Versuchsdurchführung abgeladen, um 180° gedreht und wieder auf dem Rollwagen abgelegt.

Durch das Anheben werden die Big Bags zusätzlich wieder „geradegezogen“, da nach der Bremsung in der Regel eine leichte Neigung zu erkennen ist. Bei starker plastischer Verformung der Big Bags (insbesondere beim Ladegut Sand) wurde der Beschleunigungsaufnehmer im Schwerpunkt der Ladung mehrfach neu ausgerichtet.

Um die Messergebnisse statistisch abzusichern, wurde der oben beschriebene Versuchsablauf mit jedem Ladegut insgesamt 10-Mal durchgeführt. Nach jedem Fahrversuch wurden alle eingesetzten Messtechniken „auf null“ gesetzt. Aufgrund von Messfehlern bzw. einer Kapazitätsauslastung des Datenloggers können bei den Ladegütern Gitterbox und Sand nur jeweils sieben Versuchsdurchführungen in die Auswertung eingebracht werden. Dieses Problem wurde erst beim Auslesen der Daten festgestellt.

7. Vorgehensweise bei der Versuchsauswertung

Alle ermittelten Messreihen wurden zunächst aus der Software für die Messdatenerfassung in ein Excel-Format umgewandelt. Bei den Bremsversuchen wurden im Durchschnitt pro Kanal etwa 300.000 – 400.000 Messwerte verarbeitet. Für die Versuchsauswertung ist nur der Zeitraum des Bremsvorganges bis zum vollständigen Stillstand des Sattelzuges und des Rollwagens von Interesse. Somit musste für jede Messreihe der Zeitraum von wenigen Sekunden bestimmt werden, welcher für die weitere Verarbeitung und Analyse herangezogen wurde. Dieser Zeitraum umfasst in etwa 10.000 Messwerte.

Das unten abgebildete Freikörperbild des Rollwagens wurde modellhaft für die Untersuchung angenommen und soll die Zusammenhänge der wirkenden Kräfte darstellen. Es ist sehr stark vereinfacht dargestellt und berücksichtigt aus dem Bremsvorgang nur die entstehende Trägheitskraft.

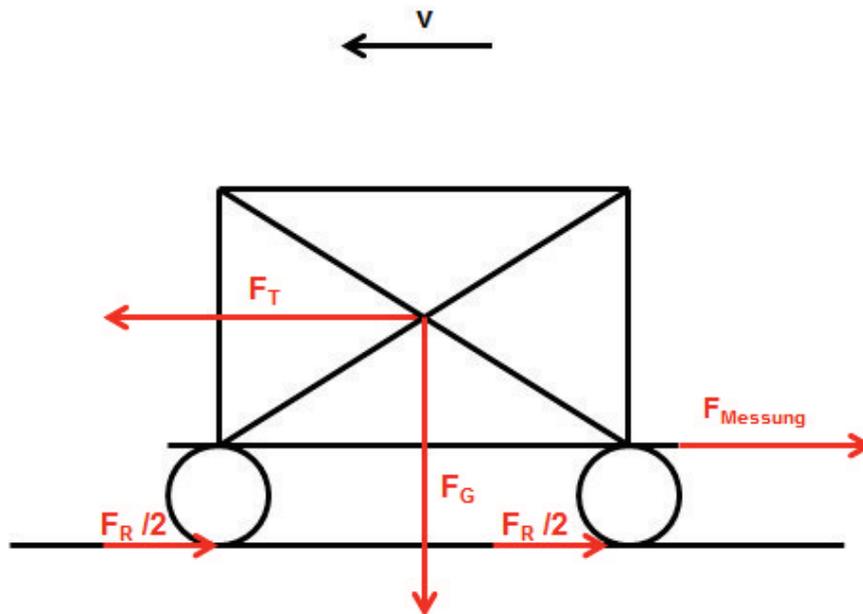


Abbildung 34 - Freikörperbild Rollwagen

Die Ladefläche des Aufliegers ist nicht starr mit den Reifen verbunden, sondern über Federn und dämpfende Elemente elastisch gelagert. Aus der Verzögerung heraus folgt daher zunächst ein Ankippen der Ladefläche. Dieser Nickwinkel ist nicht konstant, sondern wird während des Bremsvorganges bis zum Stillstand von Nickschwingungen überlagert. Während einer Vollbremsung wirken somit neben der Trägheitskraft noch weitere Kräfte auf die Ladung, die innerhalb der Versuchsanalyse nicht berücksichtigt worden sind. Zu diesen Kräften zählt zum einen die Hangabtriebskraft als Folge der Flächenneigung durch den Nickwinkel, zum anderen die Trägheitskraft infolge der Tangentialbeschleunigung aus überlagerter Nickschwingung.³

³ Vgl.: Hermann Kaps: Ladungssicherung im Straßenverkehr – Wer kennt die Wahrheit?, Seite 3, 2011

Die Trägheitskraft während der Bremsung entspricht der Summe aus gemessener Kraft und der jeweiligen Reibkraft des Gutes.

Für geradlinige Beschleunigungen wird für diesen Fall angenommen:

$$F_{\text{Messung}} + F_{\text{Reibung ges}} = m_{\text{ges}} * a$$

Formel 2 - Wirkende Kräfte im Freikörperbild Rollwagen

Somit kann aus der messtechnisch erfassten Kraft auf die aufgetretene Beschleunigung in Fahrtrichtung geschlossen werden.

$$a = \frac{F_{\text{Messung}} + F_{\text{Reibung ges}}}{m_{\text{ges}}}$$

Formel 3 - Berechnung der Beschleunigung aus der gemessenen Kraft

Die Beschleunigungswerte aus der ermittelten Kraft werden im Kapitel 9 mit den gemessenen Beschleunigungswerten der Ladegüter verglichen.

7.1 Theoretische Grundlagen: Ruck

Die Geschwindigkeit wird definiert als das Verhältnis von zurückgelegter Strecke pro Zeit [m/s] und ist die erste Ableitung des Ortsvektors nach der Zeit.

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{x}(t)}{dt}$$

Formel 4 - Berechnung Geschwindigkeit

Die Beschleunigung beschreibt das Verhältnis von der Geschwindigkeitsänderung pro Zeit [m/s²] und ist die erste Ableitung der Geschwindigkeit bzw. die zweite Ableitung des Ortsvektors nach der Zeit.⁴

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \frac{d^2\vec{x}(t)}{dt^2}$$

Formel 5 - Berechnung Beschleunigung

In der Versuchsauswertung werden die jeweiligen Beschleunigungen a in Abhängigkeit der Zeit t betrachtet. In diesem Fall wird also die Änderung der Beschleunigung pro Zeiteinheit [m/s³] untersucht, welche der ersten Ableitung von der Beschleunigung, der zweiten Ableitung der Geschwindigkeit und der dritten Ableitung des Ortsvektors nach der Zeit entspricht.⁵

$$\vec{j}(t) = \frac{d\vec{a}(t)}{dt} = \frac{d^2\vec{v}(t)}{dt^2} = \frac{d^3\vec{x}(t)}{dt^3}$$

Formel 6 - Berechnung Ruck

Der Ruck (\vec{j}) findet vorwiegend in der Fahrzeugdynamik Anwendung. In diesem Fall wird während der Vollbremsung die Änderung der Tangentialbeschleunigung betrachtet. Für die fahrdynamische Untersuchung bedeutet dies, dass je höher die Änderung der Beschleunigung innerhalb eines Zeitintervalls ist, desto größer sind die Auswirkungen auf die Ladegüter.

⁴ Vgl.: <http://de.wikipedia.org/wiki/Beschleunigung>
(Stand : 22.03.15)

⁵ Vgl.: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ruck>
(Stand : 22.03.15)

7.2 Vorgaben und Normen: Messung der Beschleunigungen

Die aufgezeichneten Beschleunigungssignale weisen teilweise sehr hohe Spitzenwerte auf, die ein Zeitintervall von nur wenigen Millisekunden haben. Diese Spitzenwerte werden nicht in die Analyse eingebracht, da sie das Ergebnis verfälschen würden. Kurzfristige Belastungen gelten darüber hinaus als unkritisch. Es gibt je nach Anwendungsgebiet unterschiedliche Aussagen zu den Zeitintervallen, die eine Beschleunigung anliegen muss, damit die Auswirkungen berücksichtigt werden können.

Laut Prof. Dr.-Ing. Heiko Johannsen, Autor des Buches „Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion“ und Dozent an der TU Berlin, werden in der Crashtechnik die Belastungen von Dummybeschleunigungen berücksichtigt, die mindestens über eine Dauer von 3 ms wirken. Da Crashereignisse deutlich kürzer dauern als Fahrdynamikereignisse, ist das relevante Zeitintervall wesentlich geringer und die Abtastrate mit 10 – 20 kHz wesentlich höher als in diesem Versuch.

Die ISO 15037-2: (Road vehicles – Vehicle dynamics test methods – Part 2: General conditions for heavy vehicles and buses) empfiehlt für Längsbeschleunigungen eine maximale Abweichung von $\pm 0,15 \text{ m/s}^2$ vom gemessenen Höchstwert. Die typischen und zu erwartenden Beschleunigungswerte werden mit $\pm 15 \text{ m/s}^2$ angegeben.⁶ Diese Größenordnung kann aufgrund der gemessenen Werte auf der Ladefläche bestätigt werden. Um Aliasing-Effekte⁷ zu verhindern, sollen die Beschleunigungssignale mit einer Grenzfrequenz von 2 Hz gefiltert werden (Anti-Aliasing Filter 4. Ordnung).

Für die Auswertung dieser Untersuchung finden die Anforderungen für fahrdynamische Prüfungen der DIN EN 12642:2006 Anwendung.

Die Anforderungen sind erfüllt, wenn die gefilterten Beschleunigungssignale mindestens über eine Zeitspanne von 50 ms den verlangten Beschleunigungswert an allen Messpositionen überschreiten und das Gesamtbeschleunigungsniveau sich in dieser Größenordnung mit einer Abweichung von $\pm 0,05 \text{ g}$ über eine Dauer von mindestens einer Sekunde bewegt.
[DIN EN 12642:2006 Anhang B, Seite 17]

Um den größtmöglichen wissenschaftlichen Nutzen aus den erhobenen Messwerten zu ziehen, wurden die Daten ungefiltert mit einer Abtastrate von 1200 Hz/Kanal (Messung der Gewichts- und Reibkräfte) bzw. 2400 Hz/Kanal (fahrdynamische Tests) aufgezeichnet. Im Postprocessing wurden die Beschleunigungswerte der fahrdynamischen Untersuchung mit einer Grenzfrequenz von 100 Hz nachgefiltert (Butterworth Tiefpassfilter 4. Ordnung). Somit stehen zur Analyse sowohl die ungefilterten als auch die gefilterten Signale zu Verfügung. Die Qualität der Messwerte ist somit deutlich höher, als für eine Zertifizierung nach DIN EN 12642:2006, Anhang B gefordert.

⁶ Vgl.: ISO 15037-2, Seite 4

⁷ Störende Frequenzanteile, die beim Digitalisieren von Signalen auftreten. Unerwünschte Frequenzanteile werden durch die Tiefpassfilterung herausgefiltert.

Vgl.: <http://de.wikipedia.org/wiki/Alias-Effekt>

Aus den Messdaten wurde im Anschluss der maximale Beschleunigungswert mit einem durchgehenden Zeitintervall von 50 ms ermittelt.

Jedoch schreibt die Norm auch vor, dass dieses Beschleunigungsniveau mit einer Abweichung von +/-0,05 g über eine Dauer von mindestens einer Sekunde vorliegen muss. Dies ist bei den Bremsungen nicht der Fall gewesen, da die gesamten Bremsvorgänge bis zum Stillstand in der Regel nur ca. eine Sekunde gedauert haben.

7.3 Kennzeichnung der Dateien

Die Kennzeichnung der Messdateien ergibt sich wie folgt:

Datum_Ladegut_Fahrtrichtung_Geschwindigkeit_Bremmung_Nummer

Beispiel: 141121_KS_FH_15_VB_12

Tabelle 5 - Kennzeichnung der Messdateien

Datum	Angabe des Datums in Format jjmmtt
Ladegut	GB = Gitterbox SP = Splitt KS = Kies SA = Sand
Fahrtrichtung (Schüttgüter)	FV = Fahrtrichtung vorne FH = Fahrtrichtung hinten Die Angabe der Fahrtrichtung war für die Auswertung der Beschleunigungen im Ladungsmittelpunkt der Schüttgüter von Relevanz. Die Big Bags wurden während der Versuchsdurchführungen mehrfach gedreht. Somit wurden während der Bremsung jeweils positive und negative Beschleunigungssignale aufgenommen.
Geschwindigkeit	Angabe der Geschwindigkeit in Km/h
Bremmung	LB = Leichte Bremsung NB = Normale Bremsung VB = Vollbremsung In der Versuchsauswertung finden nur die Durchführungen Anwendung, bei denen eine maximale Verzögerung durchgeführt wurde.
Nummer	Gibt die fortlaufende Nummer der Versuchsfahrten des jeweiligen Ladegutes an

8. Ursachen für Messabweichungen

Zum besseren Verständnis der Messergebnisse im Allgemeinen sowie der gewählten Darstellung der Ergebnisse soll bereits an dieser Stelle des Versuchsberichts auf besondere Umstände in der Versuchsdurchführung hingewiesen werden.

Im theoretischen Ansatz wird davon ausgegangen, dass die maximale Trägheitskraft (F_T) sowie die über die Kraftmessdose gemessene Kraft (F_{Messung}) im selben Zeitpunkt auftreten. Für die fahrdynamischen Untersuchungen kann dies nicht bestätigt werden. Innerhalb der durchgeführten Versuchsfahrten wurden zeitliche Differenzen von 10 – 400 ms gemessen.

Dieser Zeitversatz hat eine Ursache in der während der Bremsung aufgetretenen Dehnung der Rundschnur. Die maximale Dehnung (= Maximaler Wert F_{Messung}) ist bereits erreicht, wenn sich das Ladegut noch in der Vorwärtsbewegung befindet.

Verstärkt wird dieser Effekt durch die Rutsch- bzw. Verschiebewegungen der Big Bags. Die maximale Verzögerung innerhalb des Ladegutes wurde bei dem überwiegenden Teil der Versuchsfahrten mit Schüttgütern daher zeitlich erst nach der maximalen Kraft erreicht.

Die Gitterbox ist fest mit dem Rollwagen verbunden. Aus diesem Grund ließen sich in der Versuchsdurchführung keine Bewegungen der Box feststellen. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass sich die Stahlplatten und damit auch der Beschleunigungsaufnehmer trotz Holzverkeilung und Niederzurrung innerhalb der Gitterbox bewegt haben (siehe untere Abbildung).



Abbildung 35 - Detailansicht Gitterbox

Die zeitlichen Abweichungen (positiv und negativ) sind bei diesem Ladegut ausgeglichen und nur auf die oben beschriebene Dehnung der Rundschlinge sowie die Bewegungen der Stahlplatten innerhalb der Gitterbox zurückzuführen.

Durch den Einsatz einer Zugstange hätte dieser Zeitversatz etwas minimiert werden können, da die elastische Dehnung dieser Stange in einem für diesen Versuch irrelevanten Bereich liegt.

Erschwerend kam hinzu, dass die Multi-Block-Ladebalken nicht absolut starr mit dem Auflieger verbunden sind. Durch dieses Spiel kann zusätzlich ein sehr geringer Zeitversatz verursacht worden sein.

Die Beschleunigungsaufnehmer reagieren sehr empfindlich auf Bewegungsänderungen und nehmen jede Erschütterung wahr, wobei die Kraftmessdose ein sehr konstantes Messsignal abgibt. Dadurch können sich zusätzliche Messabweichungen registriert worden sein.

Bei praxisnahen Versuchsdurchführungen ergeben sich innerhalb der Versuchsreihen zusätzlich Abweichungen durch äußere Einflüsse, die nicht beeinflussbar sind. Zu nennen wären inkonstante Bremsungen und Witterungsbedingungen (Nässe). Die Messergebnisse sind somit nur begrenzt reproduzierbar.

Bei einer Versuchsfahrt kann aufgrund der gemessenen Beschleunigung davon ausgegangen werden, dass keine Vollbremsung durchgeführt wurde. Bei leichten und normalen Bremsungen ist kein Unterschied zwischen dem Verhalten von festen und semi-festen Gütern feststellbar. Diese Problematik wurde beim ersten Analysieren der Messdaten deutlich. Aus diesem Grund konnte die betroffene Versuchsdurchführung

141121_KS_FH_15_VB_12

nicht wiederholt werden.

Die Messergebnisse der oben angegebenen Versuchsfahrt werden in der Analyse entsprechend gekennzeichnet.

9. Analyse und Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Messkurven der verschiedenen Ladegüter anhand eines Beispiels grafisch dargestellt. Die jeweiligen Messkurven sind so gewählt, dass sie am ehesten die Verhaltensmuster der jeweiligen Ladegüter wiedergeben. Im Anschluss daran werden alle relevanten Messfahrten tabellarisch gegenübergestellt und analysiert.

9.1 Gitterbox

Die Messwerte der Gitterbox stellen in diesem Zusammenhang einen Referenzwert zu den verwendeten Schüttgütern dar. Die hier aufgeführten Ergebnisse stammen aus der Versuchsdurchführung Nummer 2 (Dateiname: 141124_GB_15_VB_2).

Die beiden folgenden Graphen stellen die gemessenen Beschleunigungen an allen drei Messstellen gegenüber. Um zu verdeutlichen, welche Auswirkung die Filterung der Messsignale hat, werden die ungefilterten den gefilterten Werten gegenübergestellt.

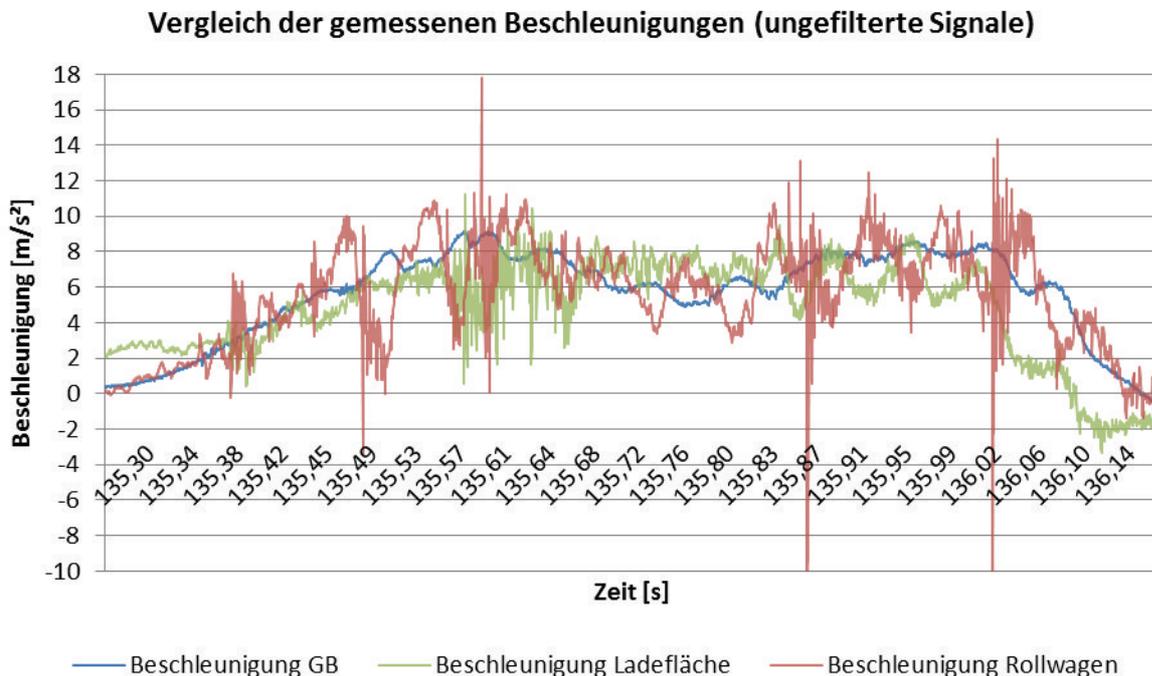


Abbildung 36 - Ungefilterte Beschleunigungssignale (Gitterbox)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Spitzenwerte, insbesondere die der roten Messkurve „Beschleunigung Rollwagen“, eine für mechanische Belastungen sehr hohe Frequenz aufweisen und nach der Filterung fast vollständig verschwunden sind, da durch den Tiefpassfilter die hohen Frequenzanteile gedämpft werden (Anti-Aliasing-Filter). Zudem haben die Spitzenwerte nur sehr geringe Zeitintervalle.

Die höchsten Beschleunigungen werden auf dem Rollwagen gemessen, die geringsten auf der Ladefläche.

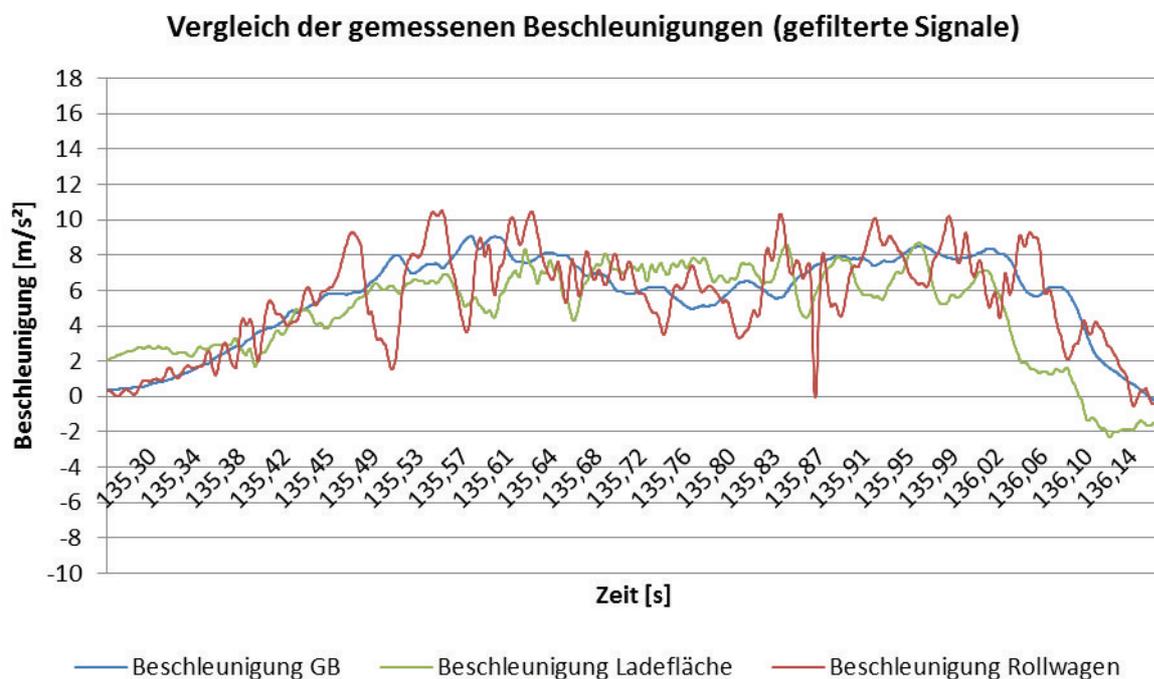


Abbildung 37 - Gefilterte Beschleunigungssignale (Gitterbox)

Offensichtlich gibt es zwischen dem Rollwagen und der Gitterbox Elemente, die die aufgezeichneten Beschleunigungen dämpfen, da die Messwerte auf dem Ladegut geringer ausfallen, als die auf dem Rollwagen.

Der untere Graph stellt die ungefilterten und gefilterten Beschleunigungssignale des Ladegutes gegenüber.

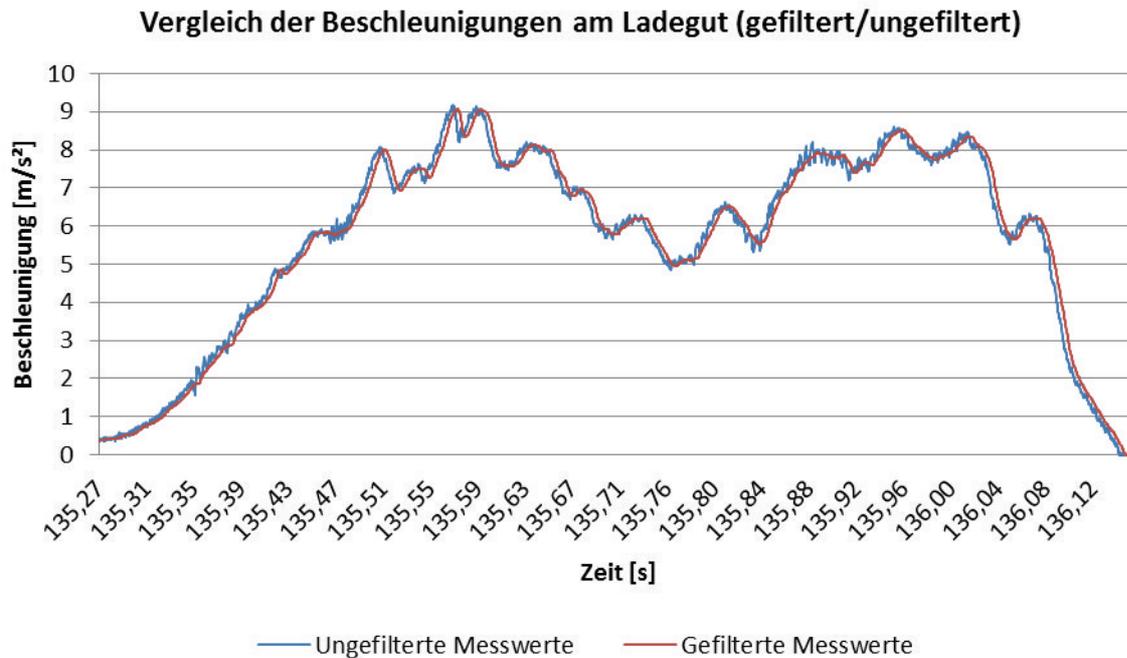


Abbildung 38 - Vergleich der Beschleunigungen (Gitterbox)

Es ist deutlich erkennbar, dass eine Filterung der Signale für dieses Ladegut in der Versuchsauswertung keinen nennenswerten Unterschied macht. Die Differenz zwischen den maximalen Werten beträgt nur $0,01 \text{ m/s}^2$. Der prozentuale Unterschied würde sich nach einer Filterung der Messdaten nur im Promillebereich befinden. Aus diesem Grund finden in der weiteren Versuchsanalyse die ungefilterten Messdaten Anwendung, da das Gesamtniveau der Beschleunigungen hier von Relevanz ist.

Der geringfügige Zeitversatz zwischen den beiden Kurven ist auf die Filterung der Messsignale zurückzuführen. Durch die Abschwächung der Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz wird der Signalverlauf leicht verschoben.

Um den Anforderungen der in Kapitel 6.2 genannten Norm zu entsprechen, werden die Spitzensignale bereinigt. Der für diese Versuchsdurchführung ermittelte Spitzenwert von $7,74 \text{ m/s}^2$ wurde gemäß DIN EN 12642:2006 die geforderten 50 ms überschritten (rote Messkurve, unterer Graph).

Die Messkurve hat – im Vergleich zu den Schüttgütern – einen relativ konstanten Verlauf. Ursächlich dafür ist, dass die Gitterbox fest mit dem Rollwagen verbunden ist und somit während des Bremsvorganges keine (Kipp-)Bewegungen und daraus resultierende Beschleunigungsveränderungen des Ladegutes stattfinden können.

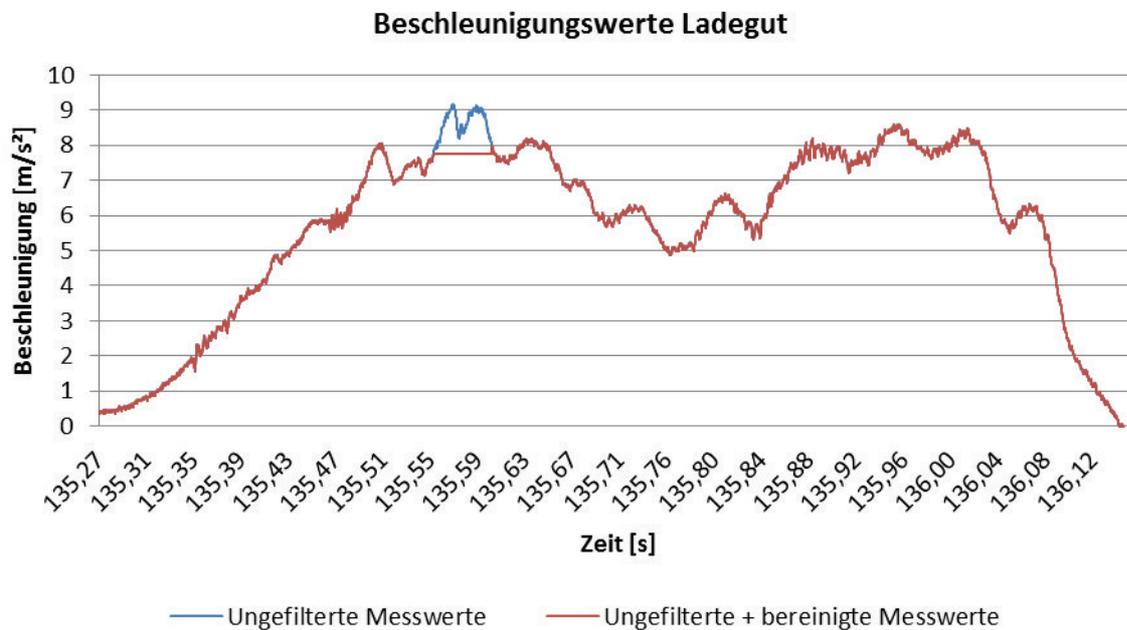


Abbildung 39 - Beschleunigungswerte Ladegut (Gitterbox)

Das unten abgebildete Diagramm stellt die gemessene und rechnerisch ermittelte Beschleunigung gegenüber. Für die rechnerisch ermittelte Beschleunigung wurde zusätzlich der maximale Wert ermittelt, welcher die geforderten 50 ms anlag. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kurvenverläufe fast identisch sind. Der Zeitversatz zwischen den beiden Spitzenwerten ist minimal, des Weiteren ist eine zeitliche Überschneidung der Werte ersichtlich. Die Differenz zwischen den bereinigten Maximalwerten beträgt 0,6 m/s².

Bei diesem Ladegut gibt es nur sehr geringe Ladungsbewegungen und damit verbundene Zeitunterschiede zwischen den Spitzenwerten.

Vergleich der gemessenen und errechneten Beschleunigung am Ladegut

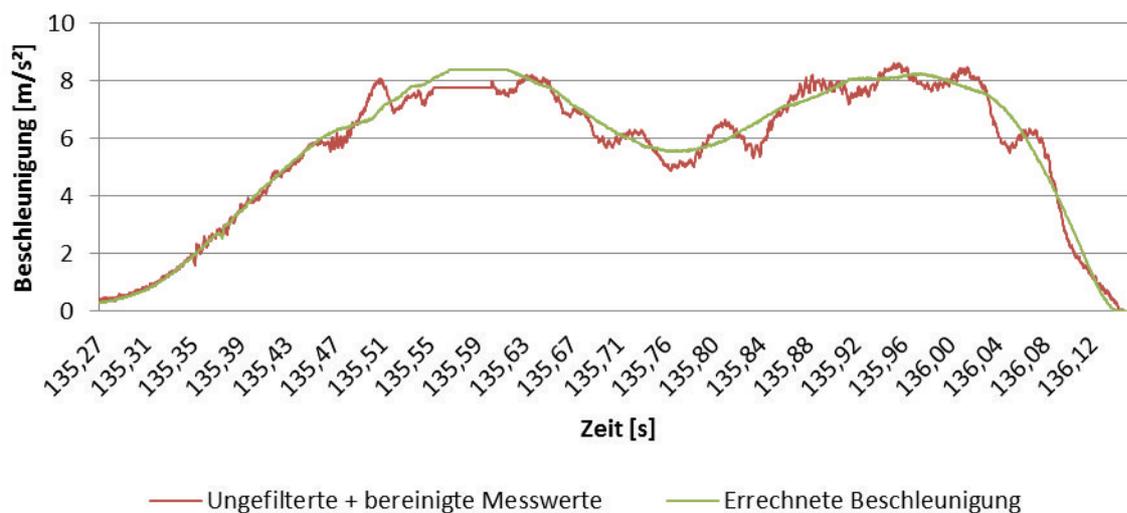


Abbildung 40 - Vergleich der gemessenen/errechneten Beschleunigung (Gitterbox)

Die unteren Diagramme zeigen alle für die Versuchsauswertung relevanten Messfahrten. Wie bereits in Kapitel 6 beschrieben, können für dieses Ladegut nur 7 Durchführungen in die Auswertung einbezogen werden.

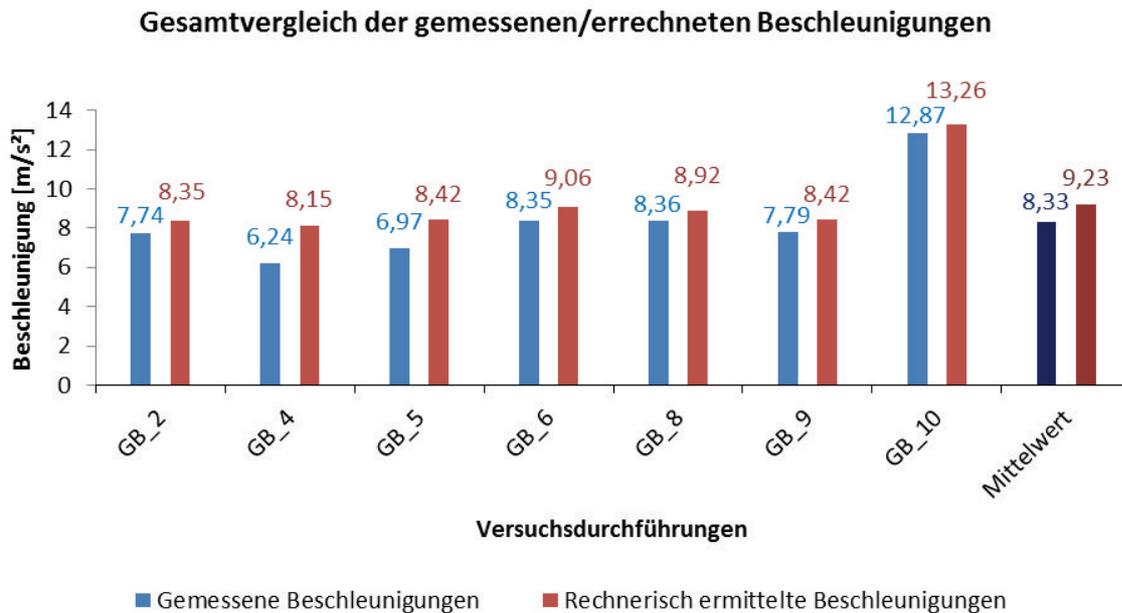


Abbildung 41 - Gesamtvergleich Beschleunigungen (Gitterbox)

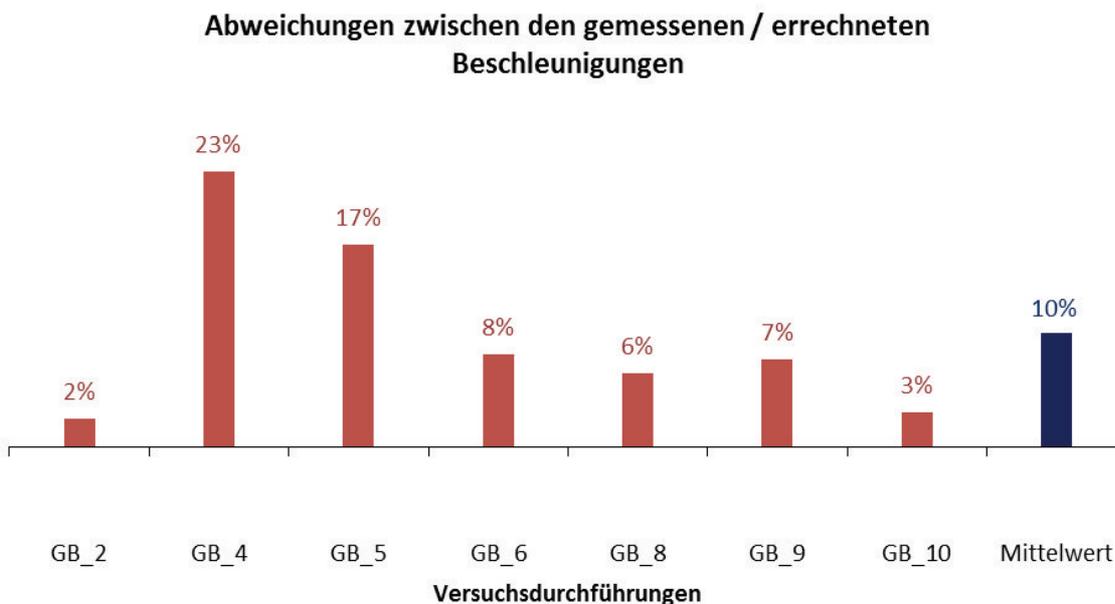


Abbildung 42 - Gesamtübersicht der prozentualen Abweichungen (Gitterbox)

Die teilweise hohen Abweichungen zwischen der gemessenen und errechneten Beschleunigung werden durch die Mittelwertbildung statistisch abgesichert. Dieser Mittelwert stellt das letztendliche Messergebnis für dieses Ladegut dar. Die rechnerisch ermittelte Beschleunigung ist 10 % höher als die gemessene.

Diese positive Abweichung kann für die Schüttgüter nicht bestätigt werden, bei diesen Ladegütern sind die durchschnittlichen Abweichungen stets negativ. Die gemittelte Abweichung von 10 % wird auf die in Kapitel 8 erläuterten Messabweichungen zurückgeführt.

Die ausschließliche Betrachtung der Spitzenwerte ist in diesem Zusammenhang als nicht ausreichend zu betrachten, vielmehr ist das Gesamtniveau der Messwerte von entscheidender Bedeutung. Die zusätzliche Untersuchung aller Messkurven dieses Ladegutes zeigt, dass die Kurvenverläufe nahezu identisch sind.

Es lässt sich für dieses Ladegut zusammenfassend feststellen, dass die gemessene Kraft dem Produkt aus Masse und gemessener Beschleunigung mit einer relativ hohen Genauigkeit entspricht. Somit ist bewiesen, dass die Grundgleichung der Mechanik für feste Güter ohne Einschränkung anzuwenden ist.

Die Abweichung der jeweiligen Messkurven (gemessenen und errechnete Beschleunigung) voneinander ist von allen untersuchten Ladegütern bei der Gitterbox am geringsten.

9.2 Big Bag Splitt

Die hier aufgeführten Ergebnisse stammen aus der Versuchsdurchführung Nummer 2 (Dateiname: 141124_SP_FH_15_VB_2). Die beiden folgenden Graphen stellen die gemessenen Beschleunigungen vor bzw. nach der Filterung an allen drei Messstellen gegenüber.

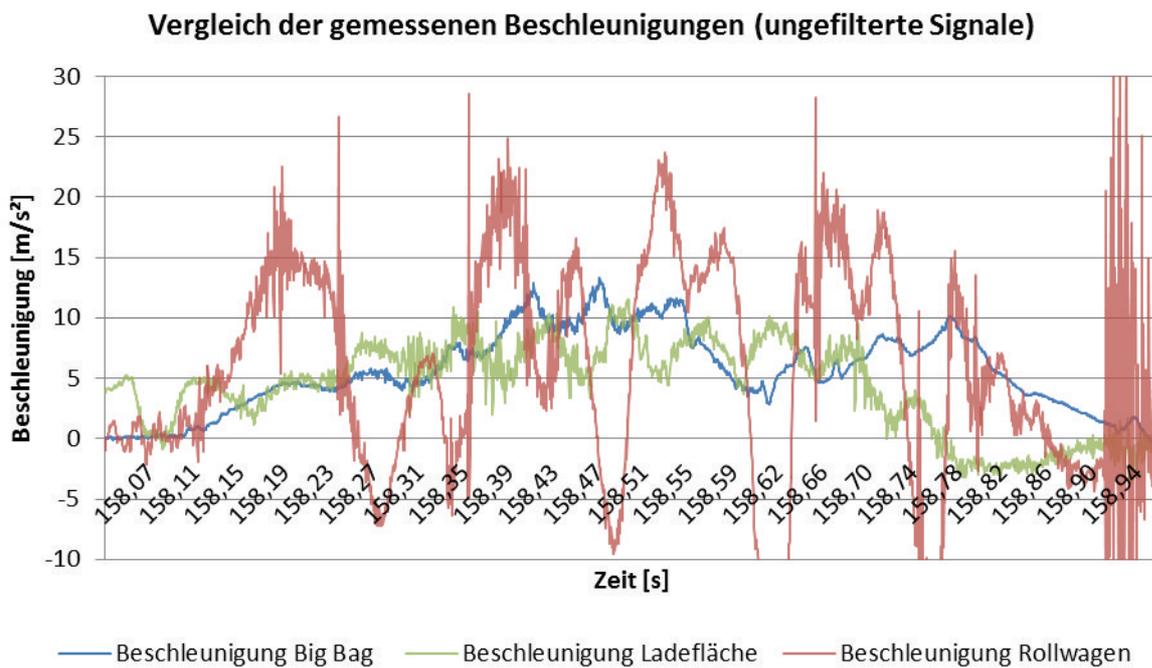


Abbildung 43 - Ungefilterte Beschleunigungssignale (Big Bag Splitt)

Der Einfluss der Filterung auf die Beschleunigungen der Ladefläche und innerhalb des Big Bags ist minimal. Die Frequenzwerte der Messsignale sind somit weitestgehend unter 100 Hz. Die Beschleunigung des Rollwagens übersteigt bei diesem Ladegut die anderen Werte um ein Vielfaches. Die Versatzbewegungen des Big Bags haben zur Folge, dass dieses Zeitintervall größer ausfällt als bei dem Referenzgut Gitterbox.

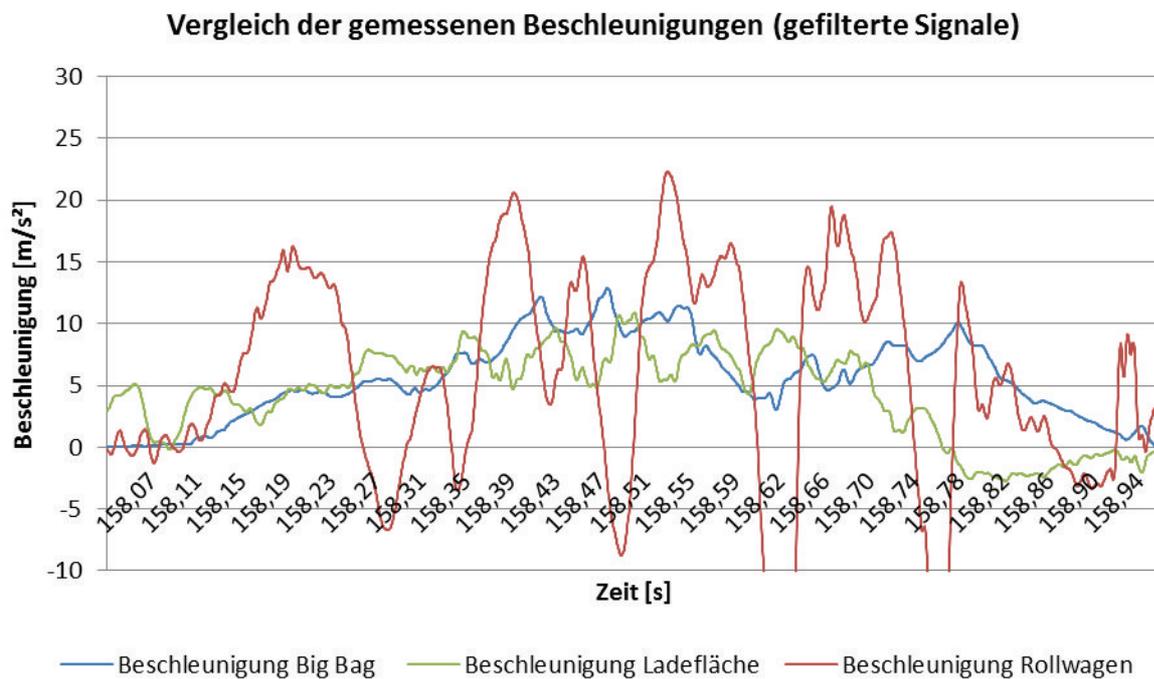


Abbildung 44 - Gefilterte Beschleunigungssignale (Big Bag Splitt)

Die unten dargestellte Messkurve zeigt die Beschleunigungswerte während des Bremsvorganges im Ladungsmittelpunkt des Big Bags vor und nach der Filterung.

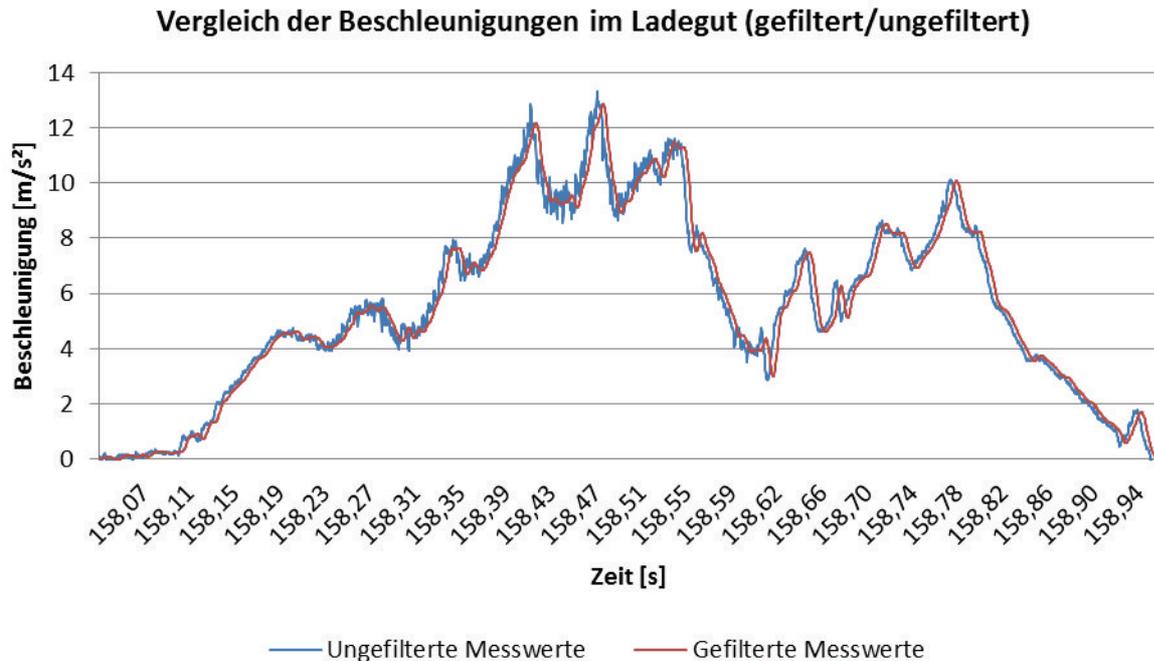


Abbildung 45 - Vergleich der Beschleunigungen (Big Bag Splitt)

Die Differenz zwischen den in den maximalen Werten beträgt $0,5 \text{ m/s}^2$ und fällt somit sehr gering aus. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Messwerte der Schüttgüter werden für dieses Ladegut in der Analyse die gefilterten Messsignale verwendet.

Das Schüttgut Splitt zeigt am ehesten Verhaltensweisen eines festen Gutes und blieb während der gesamten Versuchsdurchführung formstabil.

Es ist eine sehr inkonstante Messkurve zu erkennen. Während des Bremsvorganges ist ein starres Kippen mit einer deutlichen Versatzbewegung des Big Bags erkennbar gewesen. Diese Bewegungen waren durch den Einsatz einer Antirutschmatte gehemmt, so dass sich der Big Bag nicht konstant, sondern in abrupten kurzen Bewegungen insgesamt ca. 15-25 cm in Fahrtrichtung nach vorne bewegt hat. Durch die ruckartigen Versatzbewegungen sind die gemessenen Beschleunigungswerte im Ladungsschwerpunkt sehr ungleichmäßig.

Anhand des folgenden Graphen ist zu sehen, dass die Spitzenwerte der Messkurve bereinigt worden sind, um den Anforderungen zu entsprechen. Der bereinigte Spitzenwert von $9,66 \text{ m/s}^2$ entspricht etwa 1 g und lag die geforderten 50 ms an.

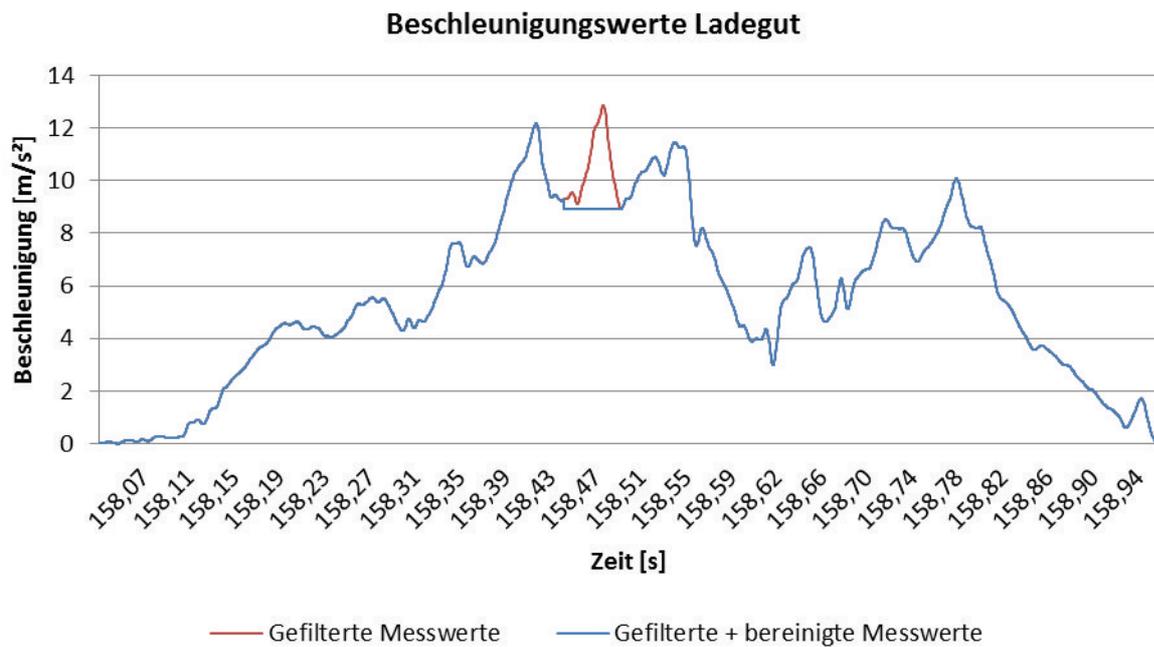


Abbildung 46 - Beschleunigungswerte Ladegut (Big Bag Splitt)

Die untere Messkurve zeigt den Vergleich der gemessenen und der rechnerisch ermittelten Beschleunigung. Die jeweiligen Spitzenwerte haben ein Zeitintervall von 50 ms. Im Vergleich zum Referenzwert weichen die Kurvenverläufe geringfügig voneinander ab. Es ist eine leichte Zeitverzögerung in Bezug auf die jeweiligen Spitzenwerte ist bei diesem Ladegut erkennbar. Durch das spätreaktive Verhalten wird in der Regel bei allen Schüttgütern die errechnete Beschleunigung vor der gemessenen erreicht.

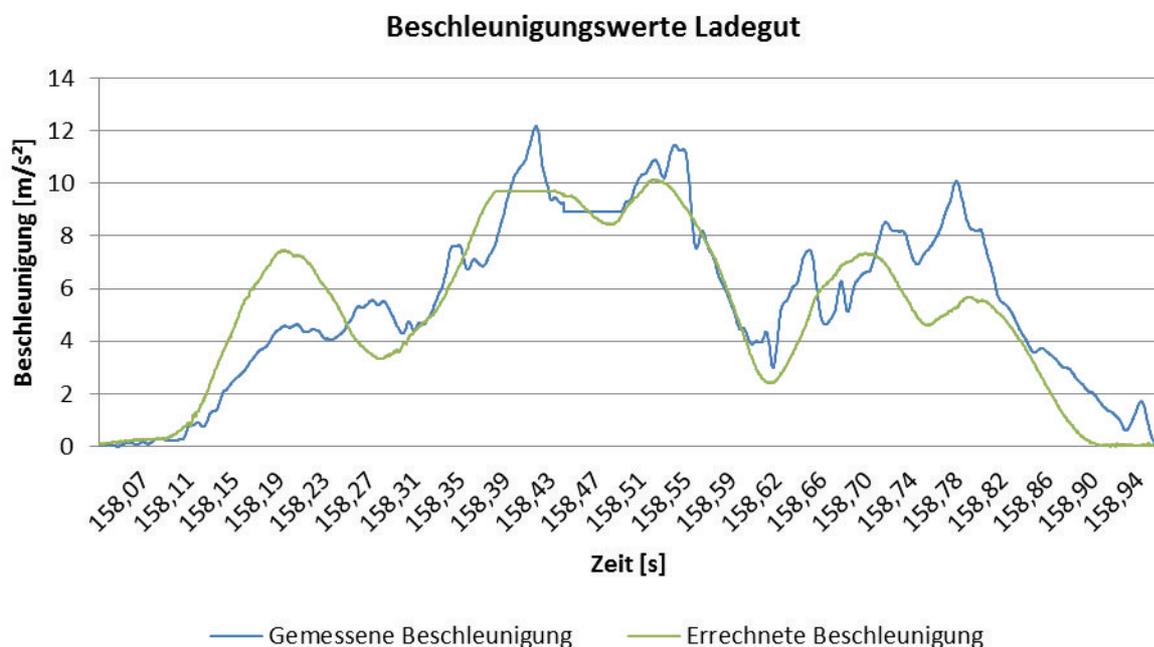


Abbildung 47 - Vergleich der gemessenen/errechneten Beschleunigung (Big Bag Splitt)

Auf Grundlage der oberen Messkurve kann für dieses Ladegut angenommen werden, dass es geringe Abweichungen zwischen der gemessene Kraft und dem Produkt aus Masse und gemessener Beschleunigung gibt, die auf Bewegungen innerhalb des Ladegutes zurückzuführen sind.

Der Vergleich der Messkurven aller Ladegüter zeigt, dass die Kurvenverläufe ähnlich, aber nicht identisch sind. Diese These kann durch den Gesamtvergleich der Beschleunigungen bestätigt werden.

Es gibt nur geringe Abweichungen zwischen den gemessenen und errechneten Beschleunigungen. Die durchschnittliche Abweichung beträgt -5 % und ist somit geringer als bei dem Referenzgut Gitterbox. Es muss in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen werden, dass bei diesem Ladegut die rechnerisch ermittelte Beschleunigung geringer ausfällt als die gemessene. Offensichtlich werden durch die Ladungsbewegungen Kräfte abgebaut, die somit nicht mehr in die Kraftmessdose eingeleitet werden.

Gesamtvergleich der gemessenen/errechneten Beschleunigungen

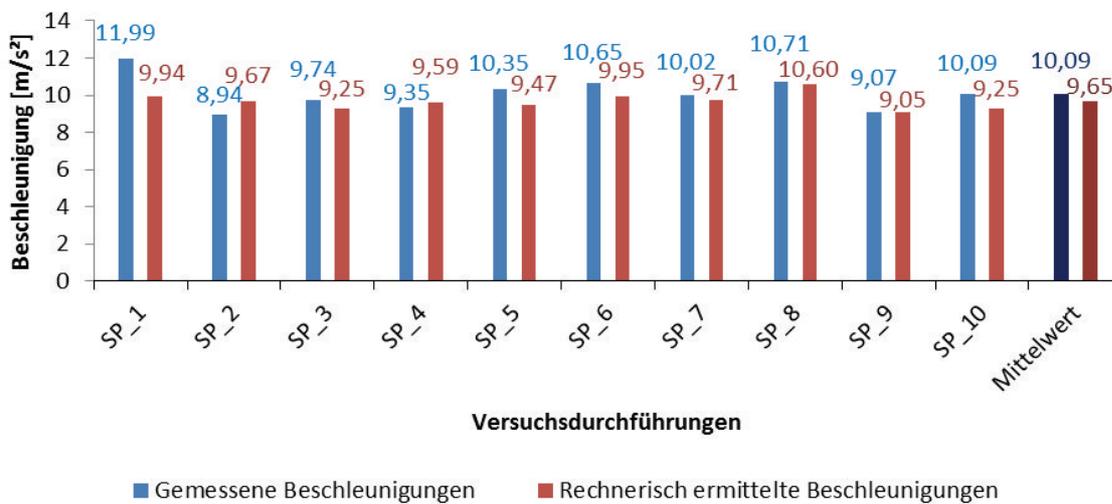


Abbildung 48 - Gesamtvergleich Beschleunigungen (Big Bag Splitt)

Dieses Ladegut zeigt durch die geringe Gesamtabweichung von -5 % am ehesten von allen Schüttgütern Verhaltensweisen eines festen Gutes. Das konnte bereits bei der Versuchsdurchführung festgestellt werden, da es im Gegensatz zu den anderen Schüttgütern keine plastischen Verformungen des Big Bags gab.

Abweichungen zwischen den gemessenen / errechneten Beschleunigungen

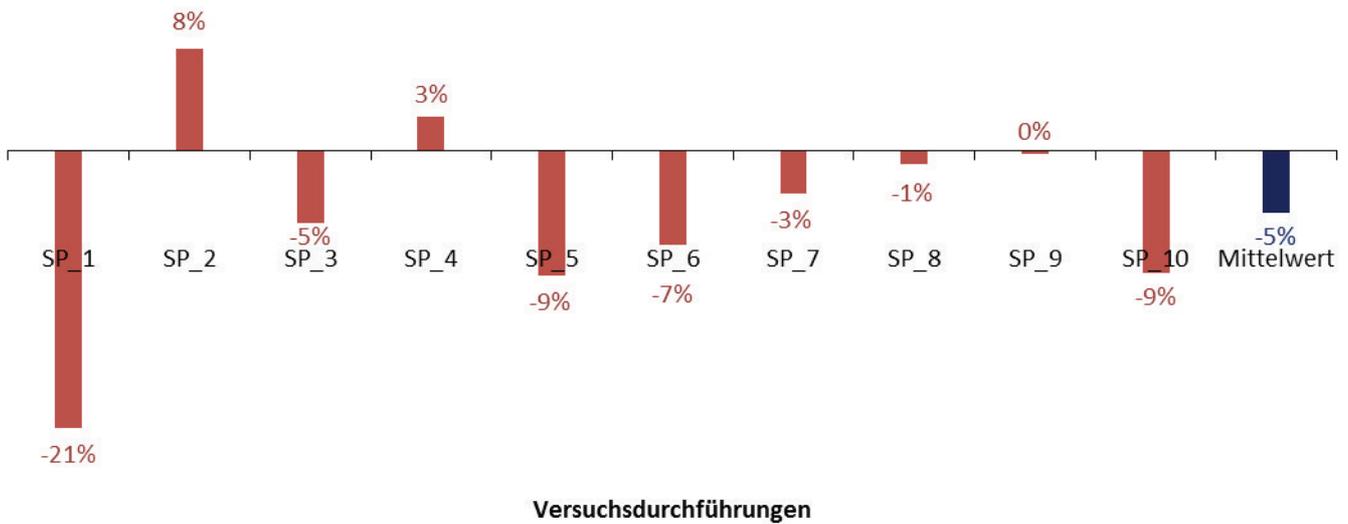


Abbildung 49 - Gesamtübersicht der prozentualen Abweichungen (Big Bag Splitt)

9.2 Big Bag Kies

Die hier aufgeführten Ergebnisse stammen aus der Versuchsdurchführung Nummer 8 (Dateiname: 141121_KS_FH_15_VB_8). Für die Versuchsdurchführung mit dem Ladegut Kies muss auf folgenden Sachverhalt hingewiesen werden:

Innerhalb der Versuchsanalyse wurde festgestellt, dass deutliche Vibrationen ab einer Verzögerung von 3–4 m/s² und damit verbundene schnelle Änderungen der Beschleunigungswerte ermittelt wurden. Diese Vibrationen sind auf die spezifischen Eigenschaften des Ladegutes zurückzuführen, da dieses Verhalten bei den anderen Schüttgütern nicht festgestellt werden konnte.

Die beiden folgenden Graphen stellen die gemessenen Beschleunigungen an allen drei Messstellen gegenüber.

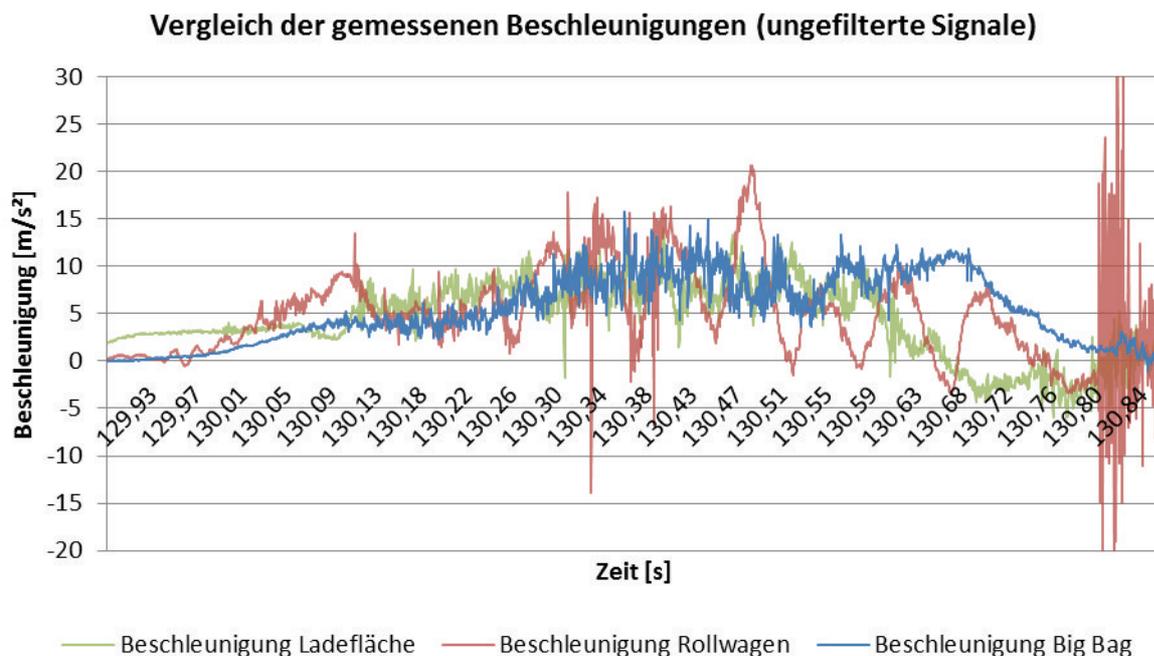


Abbildung 50 - Ungefilterte Beschleunigungssignale (Big Bag Kies)

Vergleich der gemessenen Beschleunigungen (gefilterte Signale)

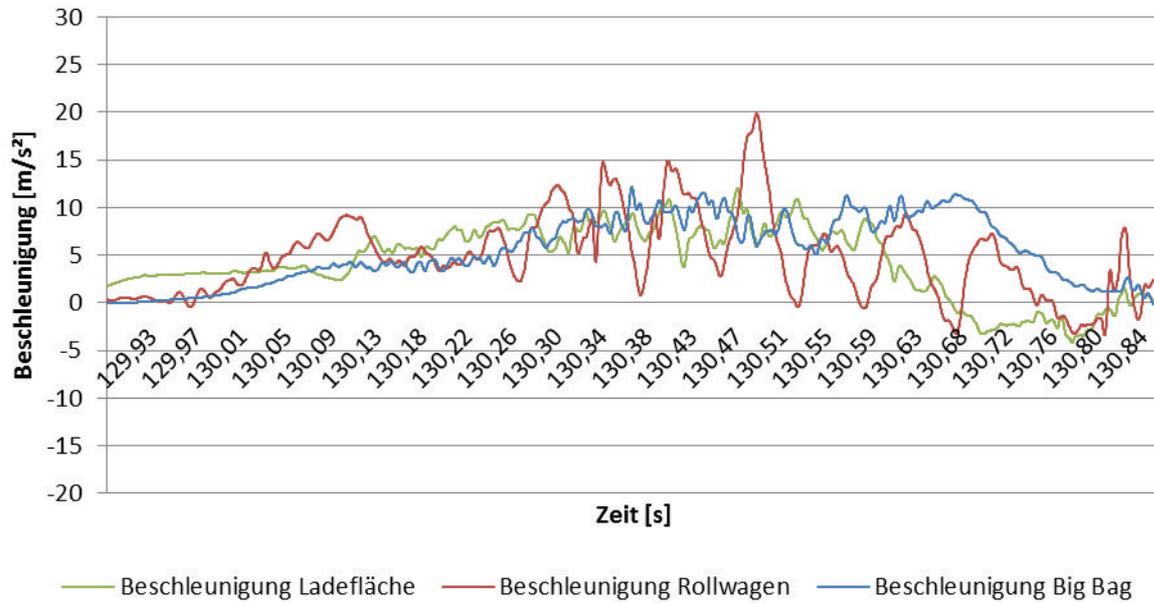


Abbildung 51 - Gefilterte Beschleunigungssignale (Big Bag Kies)

Wie bei allen Versuchsdurchführungen werden die höchsten Beschleunigungswerte auf dem Rollwagen gemessen. Zudem ist ein deutlicher Unterschied zwischen den ungefilterten und gefilterten Messwerten erkennbar.

Die Frequenzen der Messwerte innerhalb dieses Ladegutes sind sehr hoch. Aus diesem Grund ist die Filterung der Messsignale unbedingt erforderlich, wie auch auf der unteren Abbildung deutlich zu erkennen ist.

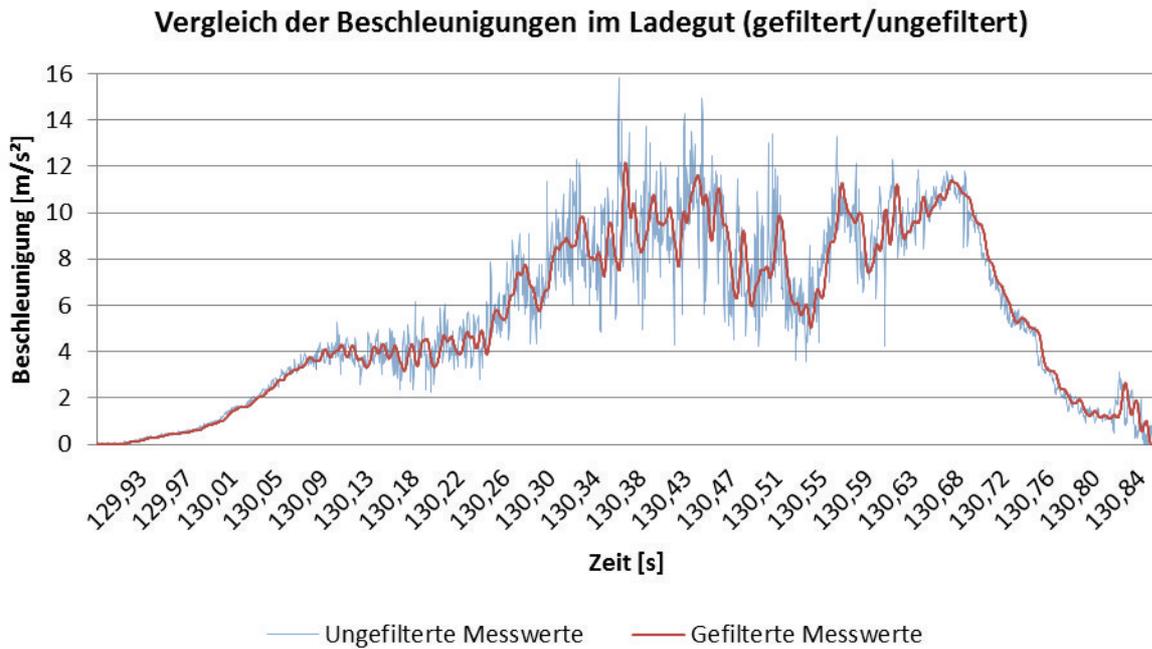


Abbildung 52 - Vergleich der Beschleunigungen (Big Bag Kies)

Der maximale Beschleunigungswert von $9,78 \text{ m/s}^2$ lag die geforderten 50 ms an. Anhand des unteren Graphen wird deutlich, dass auch nach der Filterung ein sehr inkonstantes Messsignal zu verzeichnen ist. Anhand der Fotodokumentation kann belegt werden, dass während des Bremsvorganges im Ladegut eine sichtbare Bewegung stattgefunden hat. Die Ausschläge der Messkurve können auf die leichte Versatzbewegung in Kombination mit einem kippenden Verschub zurückgeführt werden.

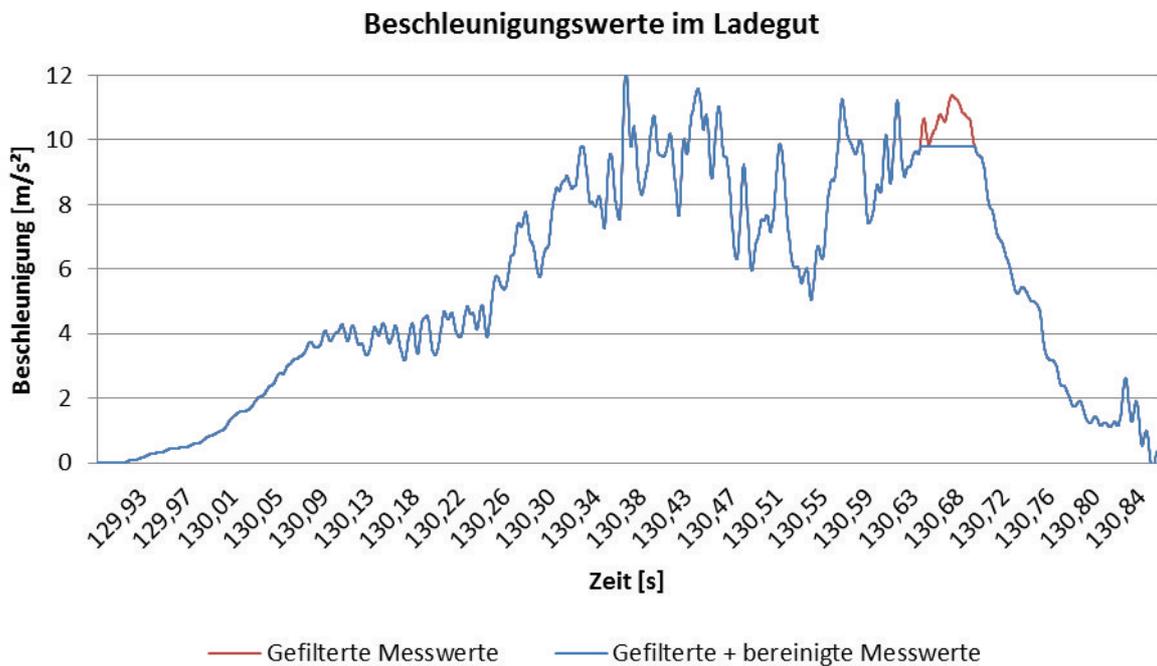


Abbildung 53 - Beschleunigungswerte Ladegut (Big Bag Splitt)

Das unten abgebildete Diagramm stellt die gemessene und rechnerisch ermittelte Beschleunigung gegenüber. Die rechnerisch ermittelte Beschleunigung lag die geforderten 50 ms an. Obwohl die Differenz zwischen den Maximalwerten mit $0,26 \text{ m/s}^2$ sehr gering ausfällt, so beträgt der Zeitversatz der beiden Werte durch die Ladungsbewegung ca. 270 ms.

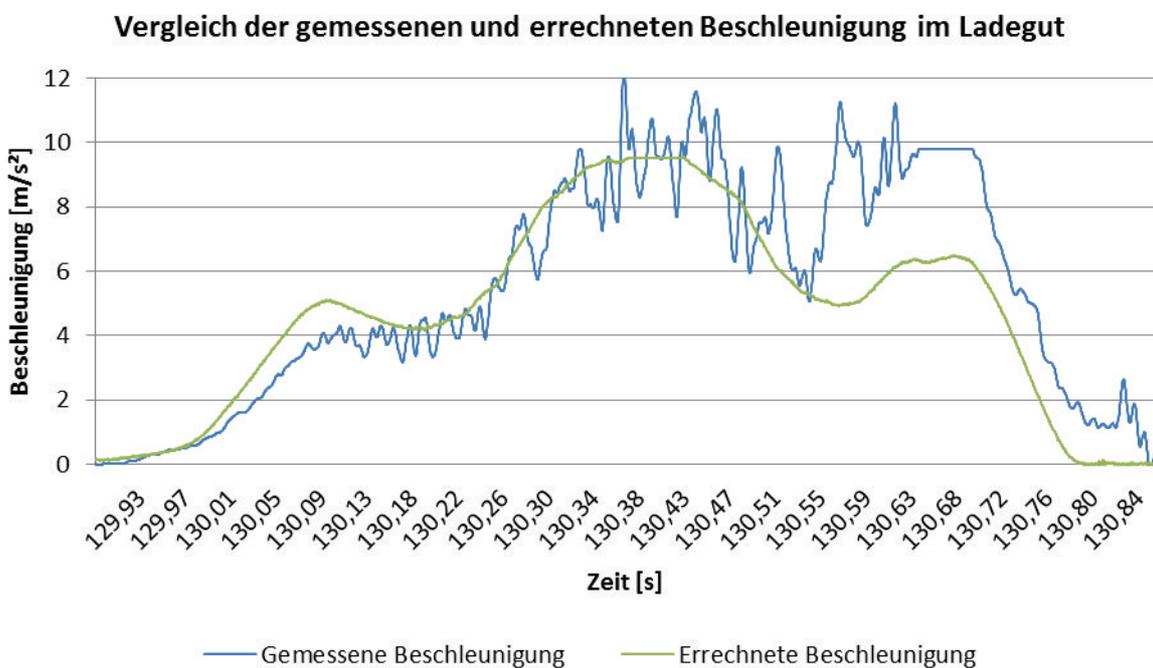


Abbildung 54 - Vergleich der gemessenen/errechneten Beschleunigung (Big Bag Splitt)

Für dieses Ladegut kann festgestellt werden, dass die Differenz zwischen gemessener Kraft und dem Produkt aus Masse und gemessener Beschleunigung etwas höher ausfällt als bei dem Ladegut Splitt. Hinzuzufügen ist, dass die Streuung der Messergebnisse für das Ladegut Kies erheblich höher als bei den anderen Ladegütern ausfällt.

Die durchschnittliche Abweichung von -14% (Abbildung 56, Seite 60) zeigt, dass bei diesem Ladegut durch Bewegungen ein höherer Kräfteanteil abgebaut wurde, der somit nicht in die Kraftmessdose eingeleitet worden ist.

Aufgrund der vergleichsweise geringen gemessenen Beschleunigung in der Versuchsdurchführung KS_12 wird davon ausgegangen, dass hier keine Vollbremsung durchgeführt wurde. Daraus ergibt sich die ungewöhnlich hohe Abweichung von +19% (Abbildung 56, Seite 61).

Gesamtvergleich der gemessenen/errechneten Beschleunigungen

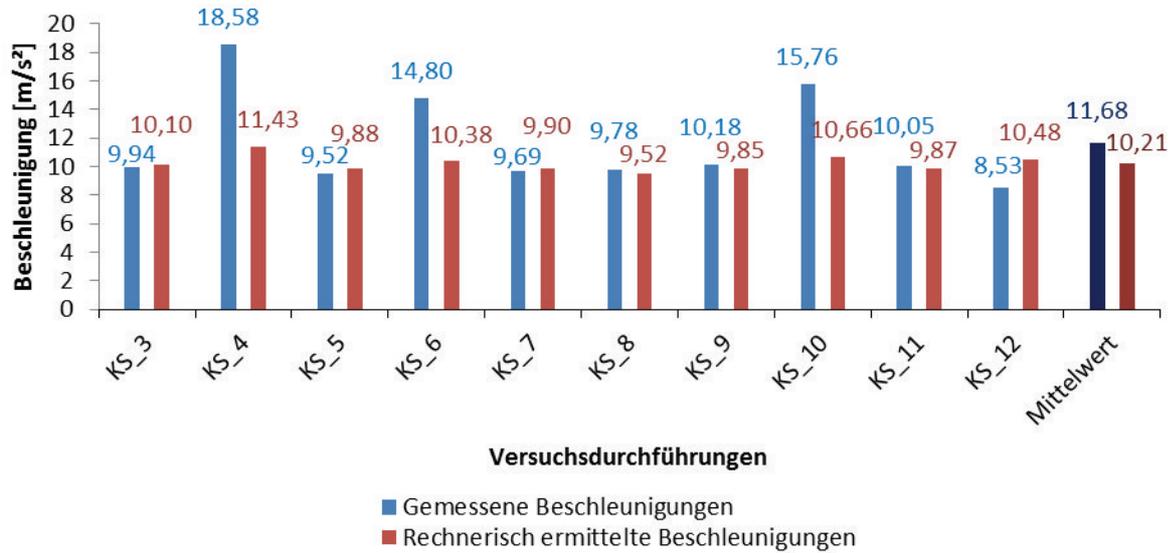


Abbildung 55 - Gesamtvergleich Beschleunigungen (Big Bag Splitt)

Abweichungen zwischen den gemessenen / errechneten Beschleunigungen

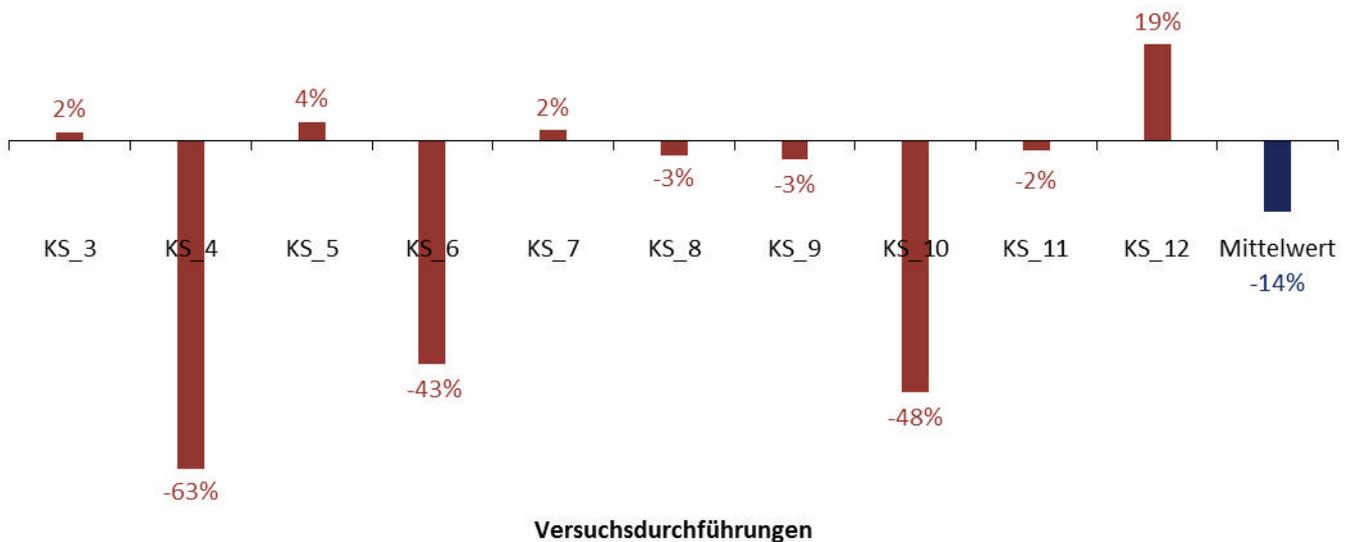


Abbildung 56 - Gesamtübersicht der prozentualen Abweichungen (Big Bag Splitt)

9.3 Big Bag Sand

Die hier aufgeführten Ergebnisse stammen aus der Versuchsdurchführung Nummer 4 (Dateiname: 141121_SA_FV_15_VB_4). Wie bei allen anderen Versuchsdurchführungen sind die gemessenen Beschleunigungen am Rollwagen, sowohl im ungefilterten als auch im gefilterten Zustand, am höchsten. Zudem besitzen die ungefilterten Maximalwerte eine sehr hohe Frequenz, wie der Vergleich zwischen ungefilterten und gefilterten Messwerten der beiden folgenden Graphen zeigt.

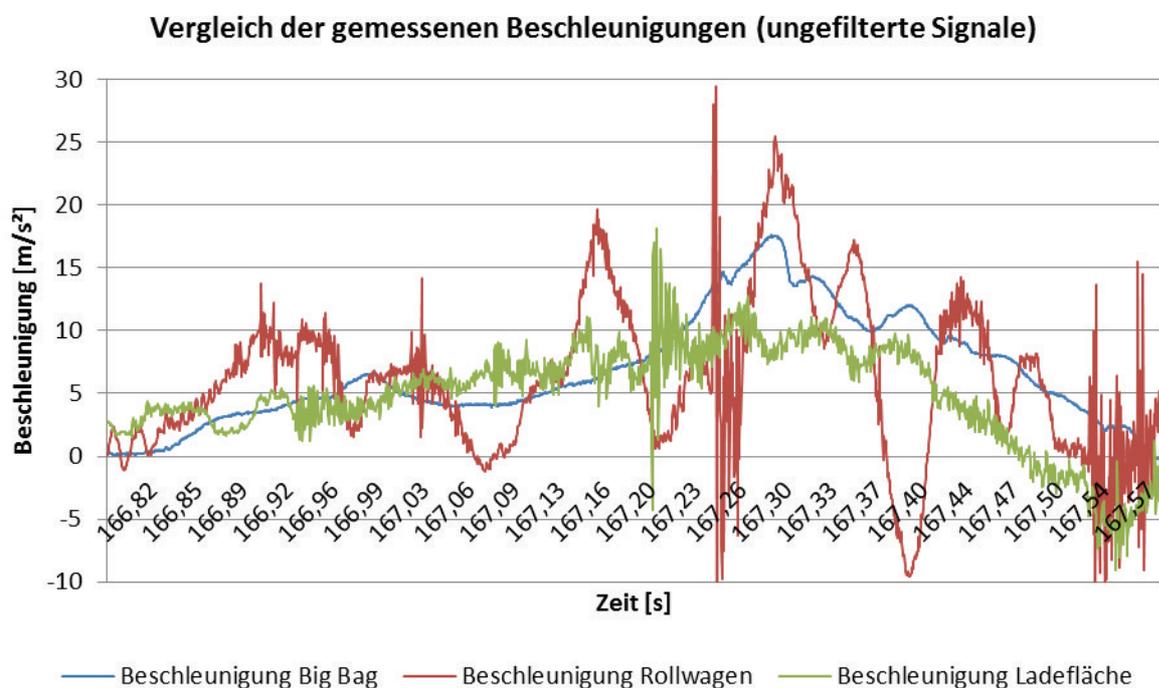


Abbildung 57 - Ungefilterte Beschleunigungssignale (Big Bag Sand)

Vergleich der gemessenen Beschleunigungen (gefilterte Signale)

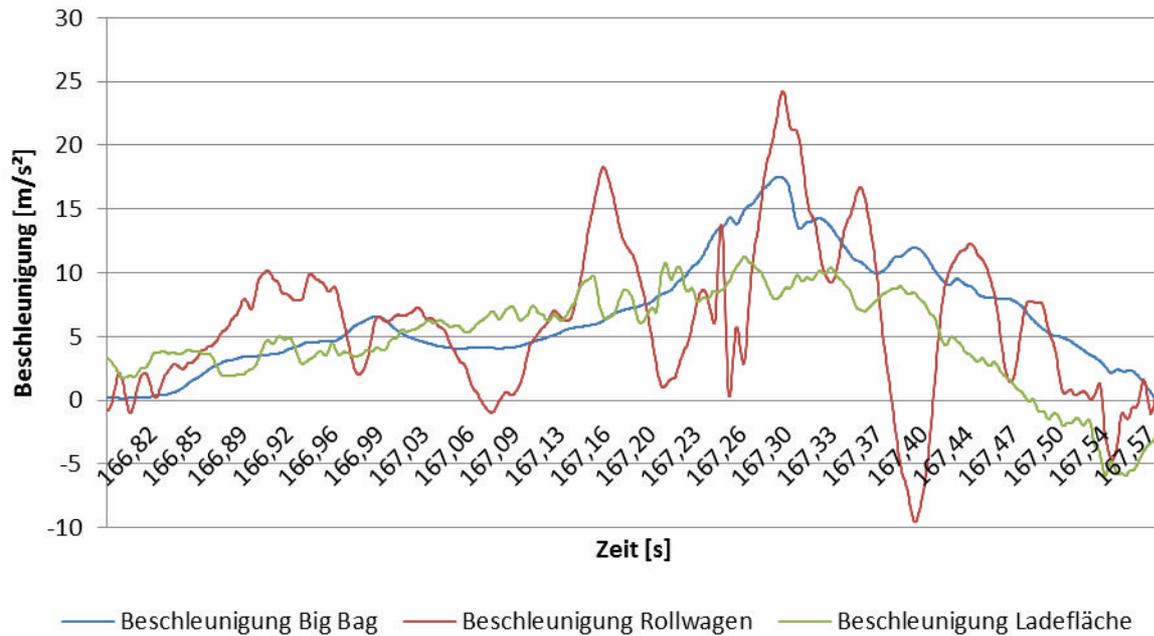


Abbildung 58 - Gefilterte Beschleunigungssignale (Big Bag Sand)

Die Differenz zwischen gefilterter und ungefilterter Beschleunigung fällt mit $0,04 \text{ m/s}^2$ sehr gering aus. Zurückzuführen ist diese geringe Differenz auf das sehr träge Verhalten dieses Ladegutes. Die relativ abrupten Verhaltensmuster der beiden anderen Schüttgüter können hier nicht festgestellt werden. Der Big Bag bleibt während des Bremsvorganges nicht formstabil, vielmehr ist ein klassischer Verschub mit einer plastischen Verformung des Big Bags erkennbar.

Auf der unteren Abbildung lässt sich der geringe Zeitversatz der beiden Kurven – hervorgerufen durch die Filterung der Messdaten – eindeutig erkennen.

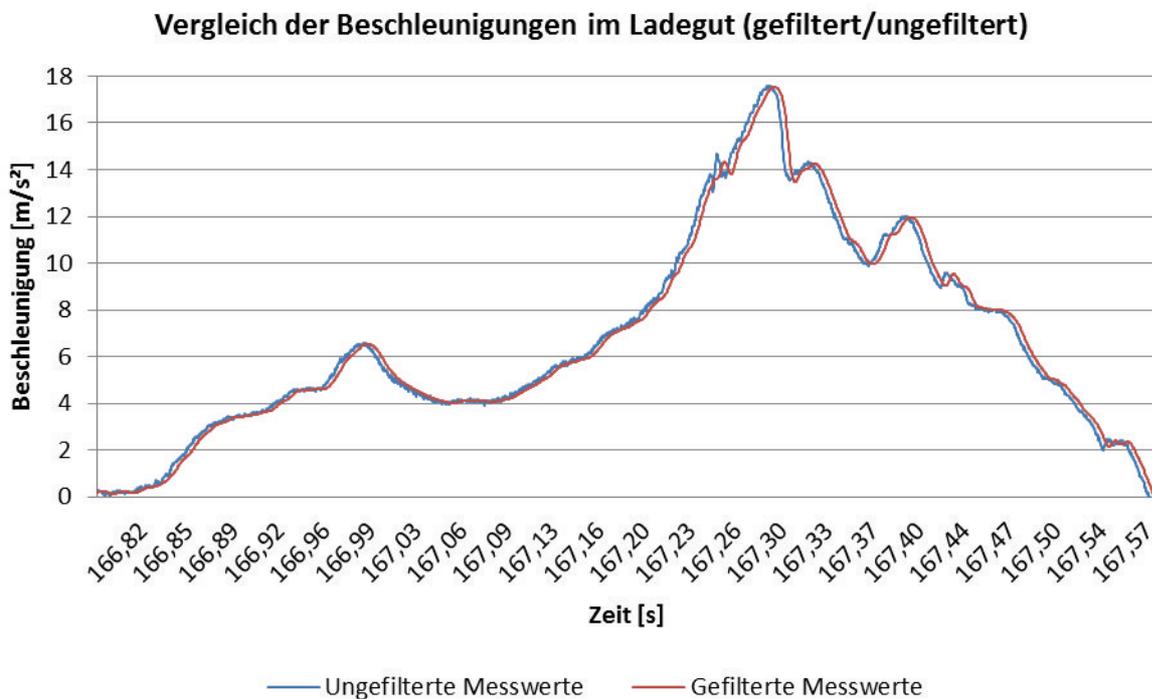


Abbildung 59 - Vergleich der Beschleunigungen (Big Bag Sand)

Der Maximalwert von $13,82 \text{ m/s}^2$ wurde die geforderten 50 ms überschritten (unterer Graph). Für dieses Ladegut wurden im Durchschnitt die höchsten Beschleunigungswerte gemessen.

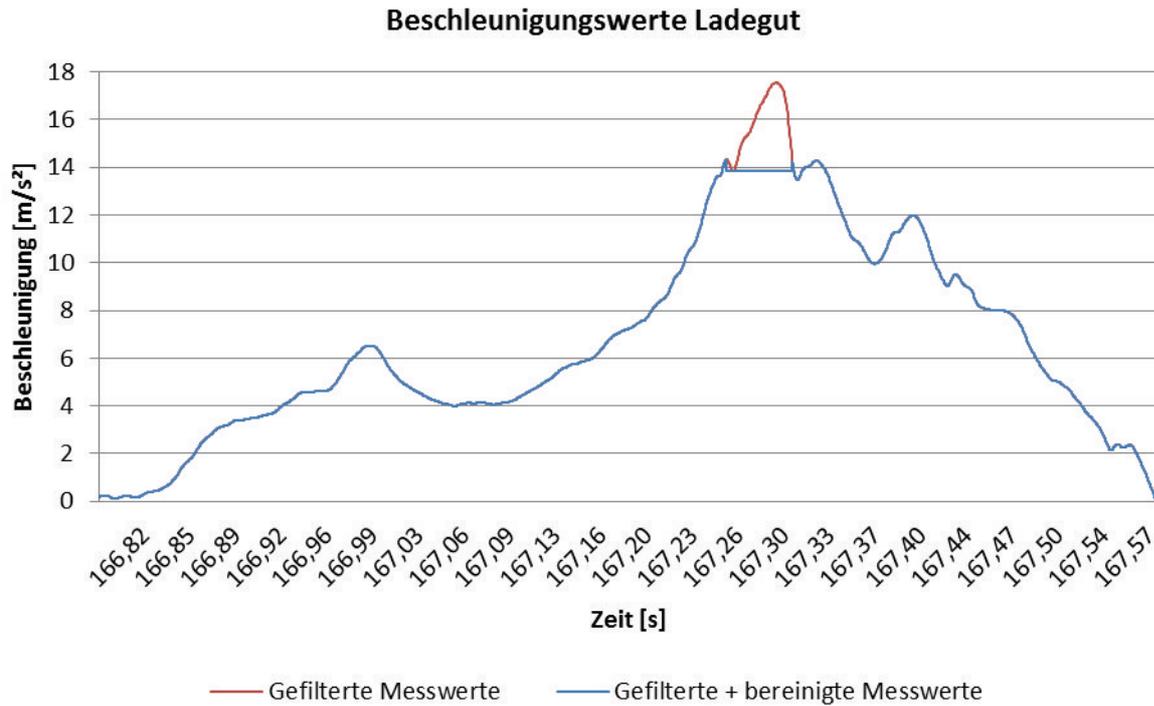


Abbildung 60 - Beschleunigungswerte Ladegut (Big Bag Sand)

Auf der unteren Abbildung sind die gemessenen und rechnerisch ermittelten Beschleunigungswerte gegenübergestellt. Die Abweichungen sind bei diesem Ladegut am größten und betragen bei dieser Versuchsdurchführung rund 39%.

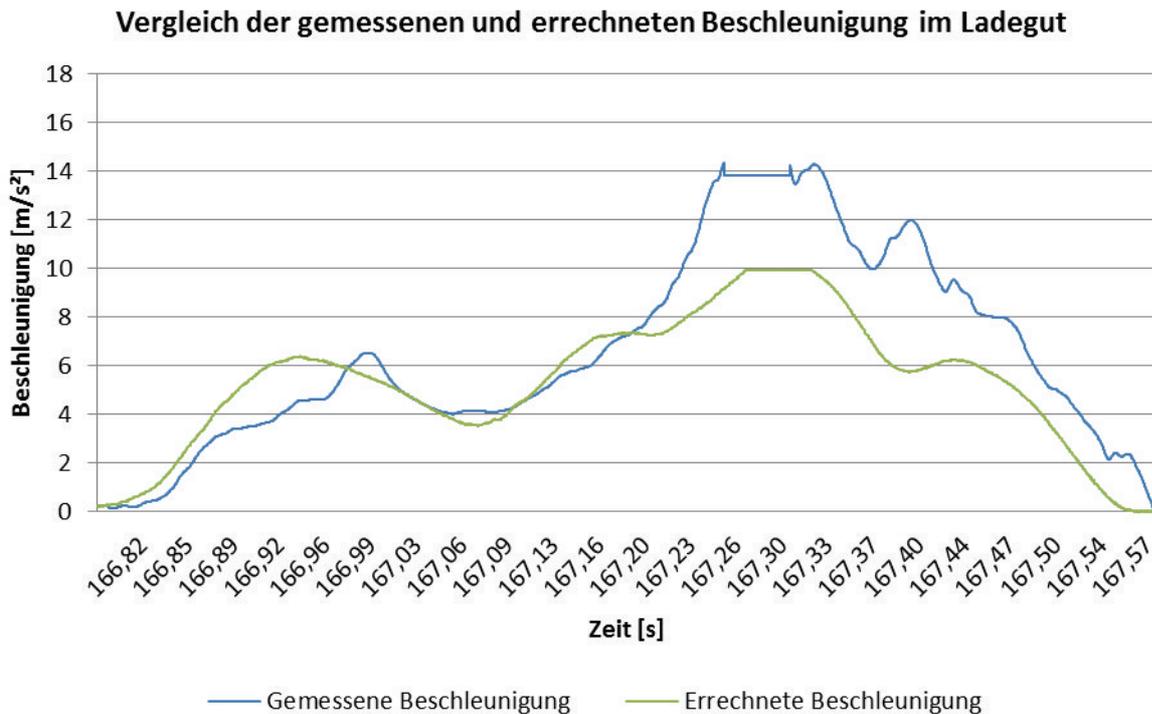


Abbildung 61 - Vergleich der gemessenen/errechneten Beschleunigung (Big Bag Sand)

In Bezug auf die beiden folgenden Abbildungen lässt sich für dieses Ladegut mit durchschnittlich 42 % eine erhebliche Abweichung zwischen gemessener und errechneter Beschleunigung feststellen. Während der Versuchsdurchführung ist bei allen Durchführungen eine deutliche plastische Verformung des Big Bags erkennbar gewesen. Dieser prägnante Unterschied im Vergleich zu den anderen untersuchten Schüttgütern spiegelt sich auch in den unten dargestellten Messergebnissen wieder.

Gesamtvergleich der gemessenen/errechneten Beschleunigungen

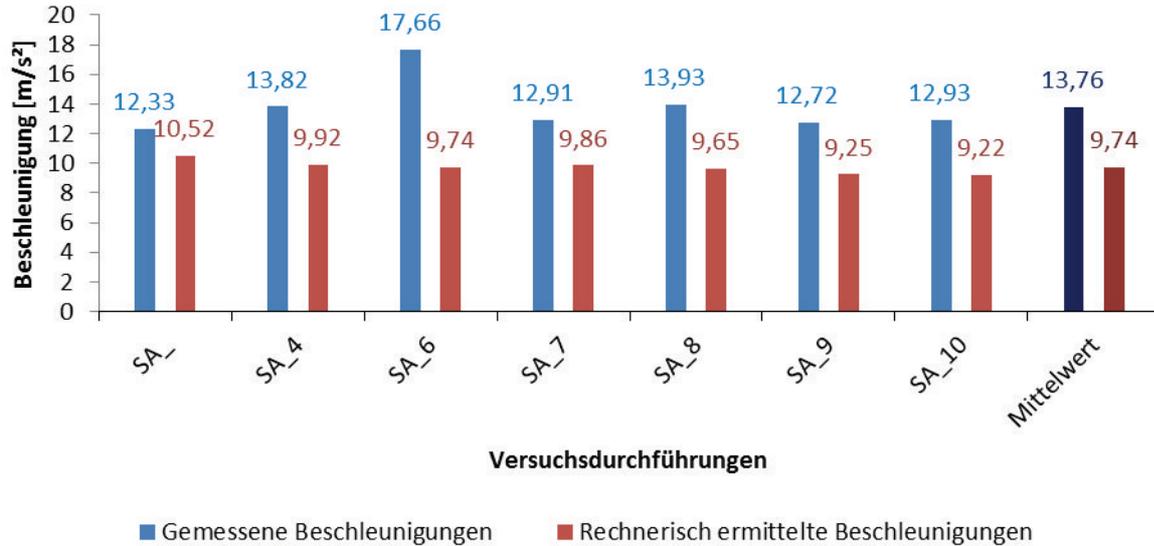


Abbildung 62 - Gesamtvergleich Beschleunigungen (Big Bag Sand)

Abweichungen zwischen den gemessenen / errechneten Beschleunigungen

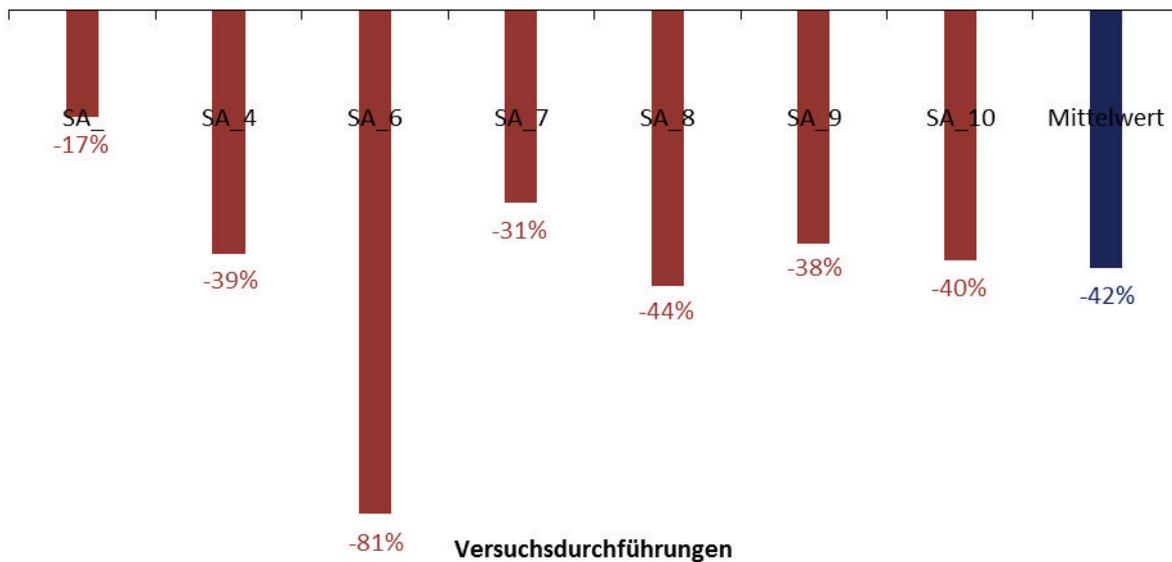


Abbildung 63 - Gesamtübersicht der prozentualen Abweichungen (Big Bag Sand)

10. Der Schüttwinkel als Vergleichsgröße für das Verhalten von Schüttgütern in flexiblen Verpackungen

Die untere Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen dem jeweiligen Schüttgutwinkel und der Abweichung zwischen gemessener und errechneter Beschleunigung.

Tabelle 6 - Gegenüberstellung: Schüttgutwinkel/Durchschn. Abweichung der Beschleunigungen

Ladegut	Schüttgutwinkel	Durchschnittliche Abweichung zwischen gemessener und errechneter Beschleunigung
Splitt	33,7°	5%
Kies	30,7°	14%
Sand	25,8°	42%

Bezugnehmend auf die obere Tabelle kann festgestellt werden, dass es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den beiden Werten gibt. Je kleiner der Schüttgutwinkel ist, desto größer ist die Abweichung zwischen gemessener und errechneter Beschleunigung.

Bei einem geringen Schüttgutwinkel ist der Zusammenhang der Körner untereinander kleiner, das Fließverhalten ausgeprägter. Durch die daraus resultierenden Ladungsbewegungen kann erheblich mehr Energie abgebaut werden, was sich wiederum in den oben angegebenen Differenzen widerspiegelt.

Für das Ladegut Splitt konnte in der Versuchsdurchführung innerhalb des Big Bags nur eine unwesentliche Bewegung festgestellt werden, die Größenordnungen der Messkurven weisen nur einen geringen Unterschied auf. Somit fällt die Differenz mit durchschnittlich 5% sehr gering aus.

Die Ladungsbewegungen innerhalb des Big Bags sowie die Abweichungen der Messkurven bei dem Ladegut Kies sind etwas größer als bei dem Ladegut Splitt. Die Differenz ist daher mit 14% etwas höher.

Für das Ladegut Sand konnten während der Versuchsdurchführung erhebliche Ladungsbewegungen mit einer deutlichen plastischen Verformung des Big Bags festgestellt werden. Die Messkurven weichen in ihrer Größenordnung stark voneinander ab. Die Differenz ist mit 42% von allen untersuchten Schüttgütern am höchsten.

Mit der Angabe des Schüttgutwinkels kann somit eine erste Einschätzung für das Verhalten der Schüttgüter (plastische Verformung, Abbau von Energie durch Ladungsbewegungen) in Big Bags abgegeben werden.

11. Schlussfolgerung

Durch diese Untersuchung konnte bewiesen werden, dass es teilweise erhebliche Unterschiede zwischen den Verhaltensweisen von festen Gütern und Schüttgütern in flexiblen Verpackungen gibt. Diese Differenzen werden durch die stofftypischen Eigenschaften der Schüttgüter bestimmt.

Die dynamischen Ladungsbewegungen und der damit verbundene Abbau von Kräften werden in den derzeit verwendeten Normen und Richtlinien zur Ladungssicherung nicht berücksichtigt.

Der Abbau von Kräften durch Ladungsbewegungen von Schüttgütern in flexiblen Verpackungen sowie die zu tolerierenden Größenordnungen und -arten dieser Bewegungen wurden zudem noch nicht ausreichend untersucht.

Aus den Versuchsergebnissen lassen sich folgende, allgemeine Erkenntnisse ableiten:

- Die Grundgleichung der Mechanik kann auf feste Güter ohne Einschränkungen angewandt werden. Trotz Abweichungen der Spitzenwerte, stimmen die Verläufe und Größenordnungen der gemessenen und rechnerisch ermittelten Beschleunigungen überein.
- Der Schüttgutwinkel eines Gutes kann als eine erste Einschätzung für das zu erwartende Verhalten des Ladegutes herangezogen werden. Mit abnehmendem Winkel steigt die Wahrscheinlichkeit einer plastischen und somit irreversiblen Verformung des Big Bags.
Je geringer der Schüttgutwinkel, desto höher ist die Abweichung zwischen gemessener und errechneter Beschleunigung.
- Die Grundgleichung der Mechanik kann nicht ohne Einschränkungen auf Schüttgüter in flexiblen Verpackungen übertragen werden. Dasselbe gilt für die derzeit gültigen und angewandten Normen zur Ladungssicherung auf Nutzfahrzeugen. Der teilweise erhebliche Abbau von Kräften durch dynamische Prozesse innerhalb des Ladegutes bleibt hierbei völlig unberücksichtigt.
Weiterführende Untersuchungen im Hinblick auf diese Problematik und deren Berücksichtigung in relevanten Richtlinien und Normen werden in diesem Zusammenhang als sinnvoll erachtet.

Im Rahmen der fahrdynamischen Untersuchung wurden nur drei verschiedene Schüttgüter und deren Verhaltensweisen betrachtet. Um die oben geschilderten Erkenntnisse statistisch abzusichern, wird die Untersuchung von weiteren Schüttgütern (wenn möglich unter genormten Bedingungen) empfohlen.

12. Quellenangaben

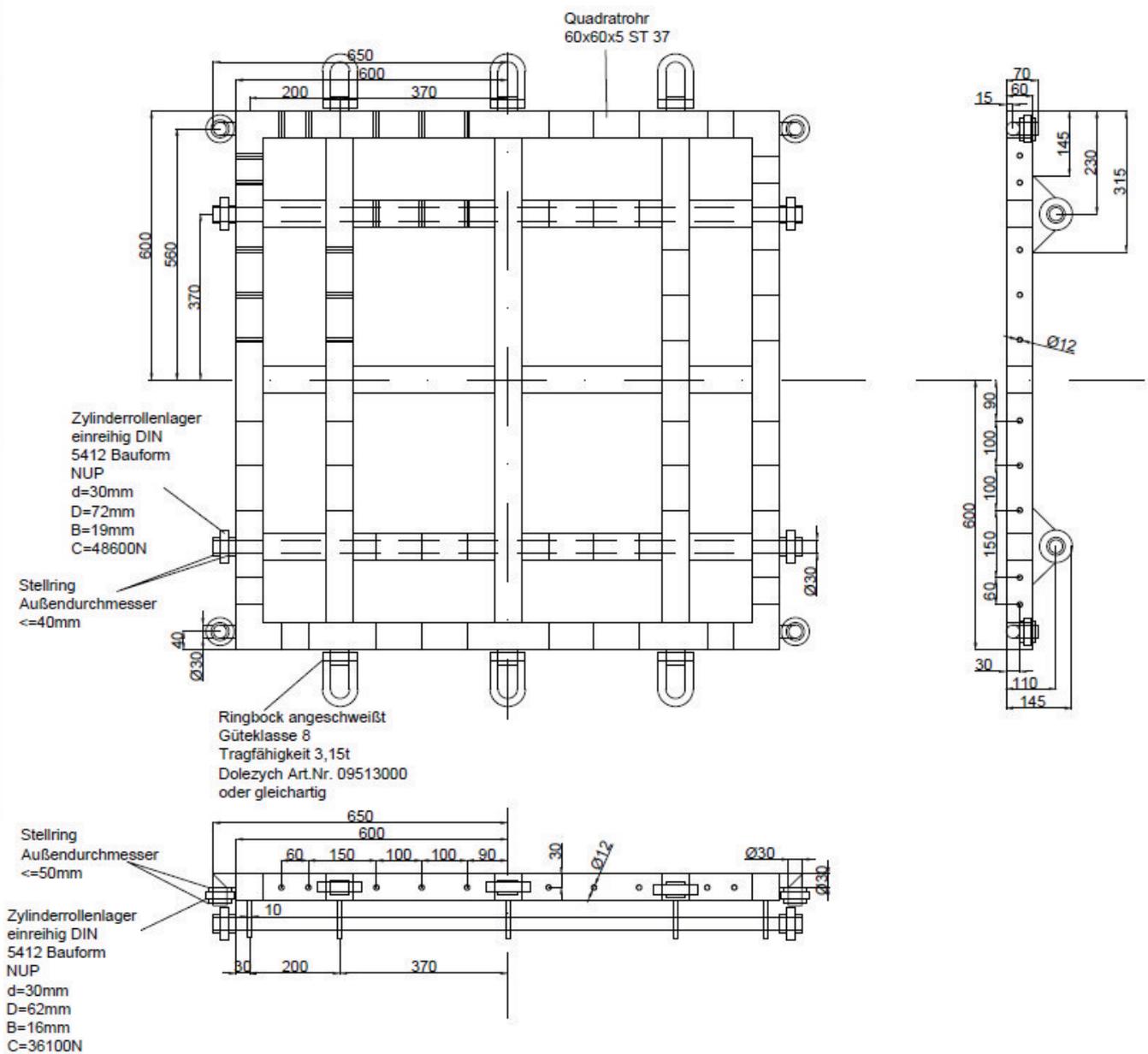
- [1] Forschungs- und Technologiezentrum Ladungssicherung Selm gGmbH (2014): Versuchsbericht „Erstellung von Prüflasten“
- [2] Forschungs- und Technologiezentrum Ladungssicherung Selm gGmbH (2014): Forschungsbericht „Untersuchungen zur Thematik der überbreiten niedergezurrten Ladung auf Nutzfahrzeugen“
- [3] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2011): VDI 2700 Blatt 14: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Ermittlung von Reibbeiwerten
- [4] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2014): VDI 2700 Blatt 18 (Entwurf): Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Sichern von Schüttgütern in flexiblen Verpackungen (Säcke, FIBC)
- [5] Deutsches Institut für Normung e.V. (2004): DIN EN 12195-1: Ladungssicherungseinrichtungen auf Straßenfahrzeugen – Sicherheit – Teil 1: Berechnung von Zurrkräften
- [6] Deutsches Institut für Normung e.V. (2007): DIN EN 12642-01: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Aufbau an Nutzfahrzeugen – Mindestanforderungen
- [7] Deutsches Institut für Normung e.V. (2001): DIN EN 12195-2: Zurrgurte aus Chemiefasern
- [8] Deutsches Institut für Normung e.V. (2009): DIN EN 1492-2: Rundschlingen aus Chemiefasern für allgemeine Verwendungszwecke
- [9] ISO 15037-2:2002: Road vehicles - Vehicle dynamics test methods - Part 2: General conditions for heavy vehicles and buses
- [10] Prof. Ulrich Podzuweit: Schüttgut in Big Bags, 2012, URL: http://www.klsk.de/fileadmin/KLSK/user_upload/pdf/Fachausschuesse/BigBag/Schuetgut_in_Bigbags.pdf
(Stand 31.10.14)
- [11] Prof. Hermann Kaps: Ladungssicherung im Straßenverkehr – Wer kennt die Wahrheit?, 2011, URL: http://www.tis-gdv.de/tis/lsls_im_strassenverkehr/Ladungssicherung_im_Strassenverkehr_110517.pdf
(Stand 02.12.14)

- [12] Prof. Hermann Kaps: Die Ladungssicherung im Straßenverkehr – Die Fakten, 2013, URL:
http://www.tis-gdv.de/tis/lslsl_im_strassenverkehr_die_fakten/aufsatz_ladungssicherung_fakten.pdf
(Stand 10.11.14)
- [13] TÜV NORD Mobilität GmbH & Co. KG: Verladeanweisung zur Ladungssicherung beim Transport von Säcken auf Paletten und Big-Bags auf Paletten, 2010, URL:
http://www.pagel.com/all/pdf/certificates/de/verladeanweisung_de.pdf
(Stand 18.12.14)
- [14] Prof. Dr.-Ing. Heiko Johannsen: Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion – Grundlagen der Unfallaufklärung, 3. Aufl., 2013
- [15] Prof Bruno Assmann, Prof Dr.-Ing. Peter Selke: Technische Mechanik 3 – Kinematik und Kinetik, 15. Aufl., 2011
- [16] <http://www.gdv.de/2012/07/da-darf-nichts-verrutschen/>
(Stand 14.03.15)
- [17] <http://www.gdv.de/2011/09/ladungssicherung-im-strassenverkehr-gdv-fordert-ueberarbeitung-der-aktuellen-normen-fuer-mehr-sicherheit/>
(Stand 13.03.15)
- [18] <http://de.wikipedia.org/wiki/Tiefpass>
(Stand 13.03.15)
- [19] <http://de.wikipedia.org/wiki/Ruck>
(Stand 22.03.15)
- [20] http://de.wikibooks.org/wiki/Das_Mehr%C3%B6rperproblem_in_der_Astronomie/_Grundlagen/_Ruck
(Stand 22.03.15)
- [21] <http://de.wikipedia.org/wiki/Alias-Effekt>
(Stand: 22.03.15)
- [22] <http://de.wikipedia.org/wiki/Beschleunigung>
(Stand 22.03.15)

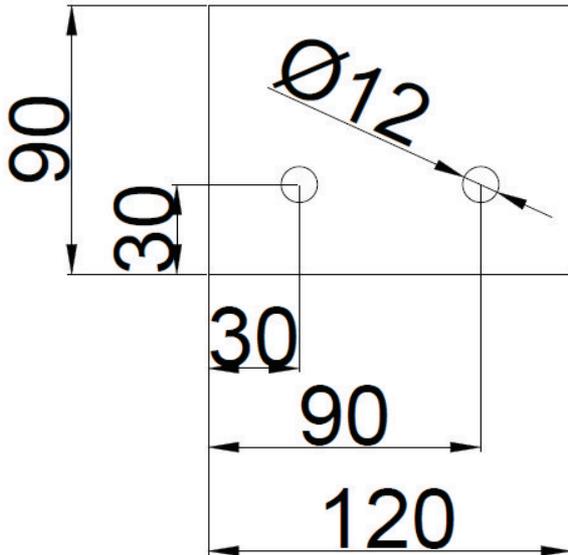
13. Anlagen

13.1 Konstruktionszeichnungen

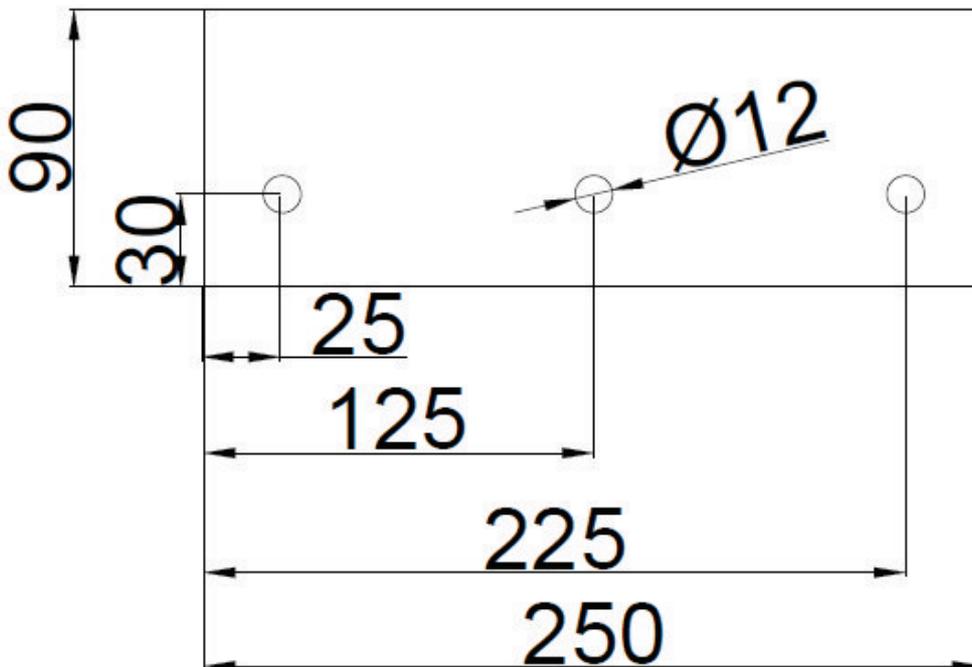
Rollwagen Tragrahmen



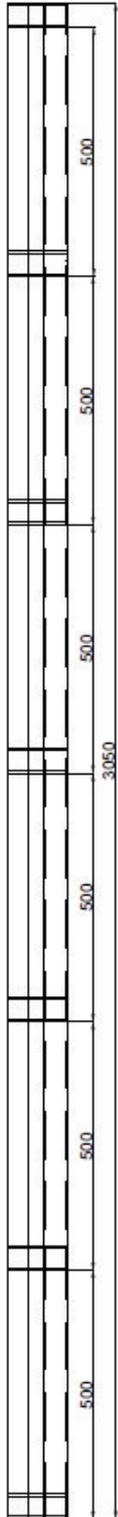
Anschlagleisten 2-Loch



Anschlagleisten 3-Loch



Schiene Längsansicht



Schiene Querschnitt

