
Experimentelle Untersu- chung der Auswirkung von Vertikalanregungen bei der horizontalen Ladungssicherungsprüfung

Masterthesis Nr. 719/18

Bearbeiter: Matthias Müller, B.Sc | 2410151

Betreuer: Maximilian Herold, M.Sc.
Moritz Lippert, M.Sc



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



FAHRZEUGTECHNIK
TU DARMSTADT



Matthias Müller
Matrikelnummer: 2410151
Studiengang: Master Maschinenbau

Masterthesis Nr. 719/18
Thema: Experimentelle Untersuchung der Auswirkung von Vertikalanregungen bei der horizontalen Ladungssicherungsprüfung

Eingereicht: 23. Mai 2019

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Fahrzeugtechnik
Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Otto-Berndt-Straße 2
64287 Darmstadt

Ehrenwörtliche Erklärung

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 23 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Matthias Müller, die vorliegende Master-Thesis ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung überein.

English translation for information purposes only:

Thesis Statement pursuant to § 23 paragraph 7 of APB TU Darmstadt

I herewith formally declare that I, Matthias Müller, have written the submitted thesis independently. I did not use any outside support except for the quoted literature and other sources mentioned in the paper. I clearly marked and separately listed all of the literature and all of the other sources which I employed when producing this academic work, either literally or in content. This thesis has not been handed in or published before in the same or similar form.

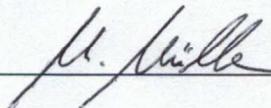
I am aware, that in case of an attempt at deception based on plagiarism (§38 Abs. 2 APB), the thesis would be graded with 5,0 and counted as one failed examination attempt. The thesis may only be repeated once.

In the submitted thesis the written copies and the electronic version for archiving are identical in content.

Datum/ Date:

Unterschrift/ Signature:

23.05.2019





**Masterthesis Nr. 719/18 im Studiengang
Mechanical and Process Engineering (30 CP)**
von Matthias Müller

Beginn: 29.10.2018
Zwischenkolloquium: 18.12.2018
Ende: 28.04.2019

- **Thema:** Experimentelle Untersuchung der Auswirkung von Vertikalanregungen bei der horizontalen Ladungssicherungsprüfung
Topic: *Experimental Analysis of the Effect of Vertical Stimulations on the Results of Horizontal Cargo Security Tests*

Fachgebiet Fahrzeugtechnik



Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Otto-Berndt-Straße 2
64287 Darmstadt

Bearbeiter:
Maximilian Herold, M.Sc.
Tel. +49 6151 16 - 24233
herold@fzd.tu-darmstadt.de

Moritz Lippert, M.Sc.
Tel. +49 6151 16 - 24244
lippert@fzd.tudarmstadt.de

Fax +49 6151 16 - 24205
www.fahrzeugtechnik-darmstadt.de

Datum
22.10.2018

Am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt (FZD) wird an Ladungssicherungskonzepten geforscht und neue Konzepte geprüft. Dazu wurde ein Prüfstand, mit dem die mechanischen Transportbelastungen simultan horizontal und vertikal dargestellt werden können, entwickelt und aufgebaut. In aktuellen Prüfnormen wird bisher entweder nur horizontal oder vertikal geprüft. Im Rahmen dieser Arbeit sollen anhand einer geeigneten experimentellen Untersuchung die Auswirkungen von Vertikalanregungen während der horizontalen Ladungssicherungsprüfung untersucht und aufgezeigt werden.

Im Einzelnen werden folgende Ergebnisse erwartet:

1. Eine Analyse der bisherigen Prüfnormen und des Potentials des vorliegenden Prüfstands ist durchgeführt.
2. Die Anforderungen an die experimentelle Untersuchung hinsichtlich Hardware und Messtechnik sind definiert.
3. Eine ausführliche Versuchsplanung mit unterschiedlichen Vertikalanregungsprofilen und unterschiedlichen Ladeeinheiten ist erstellt.
4. Die geplanten Experimente sind durchgeführt und alle relevanten Messdaten aufgezeichnet.
5. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sind ausgewertet und diskutiert.
6. Geeignete Fahrversuche zum Vergleich mit den Ergebnissen am Prüfstand sind durchgeführt und ausgewertet.
7. Die Methodik des Vorgehens und die oben genannten Ergebnisse inklusive deren Diskussion sind ausführlich dokumentiert.

Als Ergebnis der Arbeit wird eine detaillierte Versuchsplanung, eine umfassende experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Vertikalanregung

Seite: 1/2



bei der horizontalen Ladungssicherungsprüfung sowie eine ausführliche, leicht nachvollziehbare Dokumentation erwartet. Die Arbeit bleibt Eigentum des Fachgebiets. Auf das Merkblatt des Fachgebiets wird hingewiesen.

Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Betreuer: Maximilian Herold

Betreuer: Moritz Lippert

Zusammenfassung

Bei der horizontalen Ladungssicherungsprüfung nach der europäischen Norm DIN EN 12915-1 bleiben vertikale Anregungen für den Straßentransport weitgehend unberücksichtigt. Zwar werden diese Anregungen im Ausland bereits mitberücksichtigt, doch bleibt deren Einfluss auf die Ladung in der Wissenschaft wenig untersucht. Um die Auswirkungen der vertikalen Anregung auf die Ladung zu untersuchen, steht dem Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt ein Beschleunigungsschlittenprüfstand (HULK) zur Prüfung von Ladungssicherungssystemen zu Verfügung. Dieser besitzt im Gegensatz zu herkömmlichen Beschleunigungsschlittenprüfständen die Besonderheit, dass neben der horizontalen Verzögerung auch die Möglichkeit einer simultanen vertikalen Anregung des Prüftisches besteht. Durch diesen Ladungssicherungsprüfstand besteht die Möglichkeit, eine große Anzahl an Versuchen unter einer reproduzierbaren Versuchsumgebung durchzuführen. Die Untersuchung vertikaler Anregungen mit Fahrversuchen ist dagegen durch den zeitlichen Aufwand sowie die begrenzte Reproduzierbarkeit nur bedingt umsetzbar.

Zur Identifizierung der vertikalen Anregungen wurden Fahrversuche mit ausgewählten Fahrmanövern mit einem Lkw durchgeführt. Dabei konnten speziell bei dem Fahrmanöver Vollbremsung reproduzierbare vertikale Beschleunigungen festgestellt werden. Anhand dieser Ergebnisse wurde der Prüfaufbau zur vertikalen Anregung analysiert und entsprechend angepasst. Auf Basis von Recherchen zu unterschiedlichen Ladungssicherungsnormen und Ladeeinheiten wurde die Forschungsladeeinheit „Research Cargo Unit“ (RCU) entwickelt und umgesetzt. Die RCU verfügt über einstellbare Eigenschaften und dient als Stellvertreter unterschiedlicher Ladeeinheiten im Versuchsbetrieb. Darauf aufbauend wurden geeignete Versuche mittels der RCU entwickelt, um sowohl die Auswirkungen vertikaler Anregungen im Allgemeinen als auch bei ausgewählten Sicherungstechniken zu identifizieren. Neben der RCU wurden anschließend auch Versuche mit speziellen Ladeeinheiten durchgeführt, die in der Logistik Verwendung finden. Die Erstellung der Versuchspläne sowie die statistische Auswertung erfolgte dabei mit den Methoden der statistischen Versuchsplanung.

Um eine geeignete Näherung zu den in Fahrversuchen gemessenen vertikalen Beschleunigungen zu erzielen, wurden die vertikalen Anregungen des Prüfstands angepasst. Bei den damit durchgeführten Versuchen wurde insbesondere bei der Sicherungstechnik Blockieren ein hoch signifikanter Einfluss der vertikalen Anregung bei der gemessenen Blockierkraft festgestellt. Durch die vertikale Anregung wurde dabei eine Zunahme der Blockierkraft beobachtet, die bei der Verwendung von Antirutschmatten besonders ausgeprägt war. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Kippneigung mit vertikaler Anregung tendenziell höher ist, als ohne. Bei der Sicherungstechnik Niederzurren wurde ebenfalls ein signifikanter Unterschied durch die vertikale Anregung und bei der Verwendung von Antirutschmatten durch eine weitere Verschiebung der RCU festgestellt. Auch bei der Prüfung der speziellen Ladeeinheiten zeigte die vertikale Anregung teilweise einen Einfluss auf die Ladeeinheiten.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Formelzeichen und Indizes	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Konkretisierung der Aufgabenstellung	2
1.3 Methodik des Vorgehens	2
2 Stand der Technik und Forschung der Ladungssicherung.....	4
2.1 Grundlagen.....	4
2.2 Prüfverfahren zur Beurteilung von Ladungssicherung	5
2.3 Sicherungstechniken	7
2.3.1 Standsicherheit/Stabilität	9
2.3.2 Blockieren	10
2.3.3 Niederzurren.....	11
2.4 Vertikale Anregungen	12
2.4.1 Berücksichtigung in Normen und Richtlinien	12
2.4.2 Untersuchungen und Forschung.....	15
2.5 Untersuchungswerkzeug	17
2.5.1 Vorstellung HULK.....	17
2.5.2 Potentialanalyse HULK	20
2.6 Zielsetzung	22
3 Versuchsvorbereitung	23
3.1 Fahrversuche zur Identifizierung vertikaler Anregungen	23
3.2 Anpassungen der vertikalen Anregung des HULK.....	26
3.3 Beschleunigungsverlauf HULK.....	30
3.4 Klassifizierung von Ladeeinheiten.....	33
3.5 Research Cargo Unit	35
3.5.1 Umsetzung	37
3.5.2 Bestimmung des Schwerpunkts der RCU	39
3.6 Voruntersuchungen	42
3.6.1 Reibwert Abschätzung	42
3.6.2 Überprüfung des DMS-Sperrbalkens.....	44
3.7 Statistische Versuchsplanung.....	47
3.7.1 Systemgrenzen, Parameter, Faktoren und Qualitätsmerkmale	47

3.7.2	Versuchspläne	48
3.7.3	Effekte	50
3.7.4	Wechselwirkungen	52
3.7.5	Grundlagen der Statistik	53
3.7.6	Überprüfung auf statistische Signifikanz	57
4	Experimentelle Versuche und Auswertung	61
4.1	Kippneigung der RCU	61
4.1.1	Versuchsaufbau	61
4.1.2	Versuchsplan	63
4.1.3	Auswertung	64
4.2	RCU Blockieren mit Sperrbalken	68
4.2.1	Versuchsaufbau	68
4.2.2	Versuchsplan	69
4.2.3	Auswertung	70
4.3	Niederzurren der RCU	77
4.3.1	Versuchsaufbau	77
4.3.2	Versuchsplan	78
4.3.3	Auswertung	79
4.4	RCU ohne Sicherung	83
4.4.1	Versuchsaufbau	83
4.4.2	Versuchsplan	83
4.4.3	Auswertung	84
4.5	Zusammenfassung Versuchsergebnisse RCU	87
4.6	Spezielle Ladeeinheiten	89
4.6.1	Sackware Kaliumsulfat	89
4.6.2	Stahlspundfässer auf Europalette	91
4.6.3	Kunststofffässer L-Ring auf Europalette	93
5	Diskussion der Ergebnisse	95
6	Fazit und Ausblick	97
6.1	Fazit	97
6.2	Ausblick	99
A	Anhang	100
	Literaturverzeichnis	121

Formelzeichen und Indizes

Lateinische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	$\frac{m}{s^2}$	Beschleunigung
$a_{z,peak}$	$\frac{m}{s^2}$	Beschleunigungsspitze beim Wiederauftreffen der RCU Ladefläche
b	mm	horizontaler Abstand Kippkannte Schwerpunkt
BC	N	Zulässige Blockierkraft Blockiervorrichtung
c	./.	Beschleunigungsbeiwert
C	mm	Konstante
d	mm	vertikaler Abstand Kippkannte Schwerpunkt
E		Effekt
E_{std}		Standardisierter Effekt
$f_{1,q}$./.	Beschleunigungsbeiwert in/ quer zur Fahrtrichtung
f_s	./.	Sicherheitsbeiwert Niederzurren
h	mm	Montage Höhe Sperrbalken
F	N	Kraft
F_B	N	Notwendige Blockierkraft der Blockiervorrichtung
F_G	N	Gewichtskraft
FG	./.	Freiheitsgrad
F_K	N	Kraft Kraftmessdose
F_R	N	Reibkraft
F_S	N	Rückhaltekraft Sperrbalken
F_T	N	Vorspannkraft Zurrmittel
F_{Zug}	N	Zugkraft
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
k	./.	Anzahl Faktoren
l_h	mm	Abstand Zurrgurt horizontal
l_v	mm	Abstand Zurrgurt vertikal
m	kg	Masse
n_1	./.	Anzahl Stufen
n_q	./.	Anzahl Wiederholungen/ Replikationen einer Faktorstufenkombination
n_{Zurr}	./.	Anzahl Zurrmittel
N	./.	Versuchsumfang
q	./.	Anzahl Faktorstufenkombinationen
r		Residuum

s		Standardabweichung
s_E		Standardabweichung des Effekts
s_{ges}		Standardabweichung des Versuchsumfangs
S_{TF}	N	Maximale Vorspannkraft Zurrmittel
t	./.	t-Wert Studentsche Verteilung
v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
w	mm	Weg/Verschiebung
$y_{o,u}$		Streubereich

Griechische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
α	./.	Signifikanzniveau
β	°	Winkel Schwerpunktbestimmung
γ	°	Abspannwinkel
$\delta_{o,u}$		Konfidenzintervall des Effekts
μ	./.	Reibbeiwert
$\mu_{o,u}$		Konfidenzintervall
μ_{Norm}	./.	Reibbeiwert nach DIN 12195-1
σ		Standardabweichung
τ	ms	Zeit
$\tau_{z,peak}$	ms	Zeitpunkt des Wiederauftreffens der RCU auf die Ladefläche
φ	°	Neigungswinkels
ω	1/s	Kreisfrequenz

Indizes:

Zeichen	Bezeichnung
x	Fahrzeug/ Hulk Längsrichtung
y	Fahrzeug/ Hulk Querrichtung
z	Fahrzeug/ Hulk Vertikalrichtung
RCU	Research Cargo Unit
max	maximal
min	minimal
mv	mit vertikaler Anregung
ov	ohne vertikale Anregung
P	Platten
S	Schwerpunkt

Abkürzungsverzeichnis

ADMA	Automotive Dynamic Motion Analyzer
BMJV	Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz
CAD	Computer Aided Design
CCMTA	Canadian Council Of Motor Transport Administrators
DESTASIS	Statistisches Bundesamt
DIN EN	Deutsches Institut für Normung Europäische Norm
DMS	Dehnmessstreifen
DoE	Design of Experiments
EUMOS	European Safe Logistics Association
FZD	Fahrzeugtechnik Darmstadt
HULK	Hydraulisches Untersuchungswerkzeug für Ladungssicherungskonzepte
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LaSi	Ladung Sicherung
LE	Ladeinheit
LHM	Ladehilfsmittel
MVR	Motor Vehicle Registry
NSC	National Security Council
NTC	National Transport Commission
RCU	Research Cargo Unit (Forschungsladeinheit)
TUD	Technische Universität Darmstadt
UNECE /EU	United Nations Economic Commission for Europe
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Methodik des Vorgehens	3
Abbildung 2-1 Richtung und Amplitude von Prüfbeschleunigungen beim Straßentransport	4
Abbildung 2-2 Skizze zur Stabilitätsberechnung nach DIN 12195-1:2010 ³⁵ . (1) Schwerpunkt Ladeinheit; (2) Ladeinheit; (3) Kippkante	9
Abbildung 2-3 Darstellung der Ladungssicherung durch Blockieren. (1) Schwerpunkt Ladeinheit, (2) Ladeinheit, (3) Blockiervorrichtung	10
Abbildung 2-4 Darstellung vom Niederrücken einer Ladeinheit. Links Seitenansicht, rechts Vorderansicht	11
Abbildung 2-5 Zeitlicher Verlauf der Reibkraft und der vertikalen Beschleunigung	16
Abbildung 2-6 CAD Modell des hydraulischen Untersuchungswerkzeug für Ladungssicherungskonzepte (HULK).....	17
Abbildung 2-7 Anbindung des Mitnehmerschlitten an den Prüftisch am HULK ⁵⁸	18
Abbildung 2-8 Lagerung des Prüftisches mit vertikalem Freiheitsgrad auf dem axialen Schienensystem	19
Abbildung 2-9 Funktionsweise der vertikalen Anregung des Prüftisch durch das Überfahren von Anregungsprofilen.....	19
Abbildung 2-10 Anregungsprofil zur mehrfachen vertikalen Anregung des Prüftisches.....	21
Abbildung 3-1 Ausschnitt der Messaufzeichnung der vertikalen Beschleunigung bei einer Stadtfahrt durch Darmstadt	24
Abbildung 3-2 Ausschnitt der Messaufzeichnung der vertikalen Beschleunigung bei einer Autobahnfahrt.....	24
Abbildung 3-3 Beschleunigungsverlauf der vertikalen und longitudinalen Beschleunigung bei einer Vollbremsung aus 40 km/h	25
Abbildung 3-4 Beschleunigungsverlauf der vertikalen Beschleunigung a_z und der longitudinalen Beschleunigung a_x bei einer Vollbremsung aus 80 km/h.....	25
Abbildung 3-5 Auswirkungen der vertikalen Beschleunigung beim Auftreffen auf den Anregungsträger (Anregungsprofil 3).....	28
Abbildung 3-6 CAD Modell (links) und Umsetzung (rechts) des überarbeiteten Anregungsträgers	29
Abbildung 3-7 Vertikale Beschleunigung mit überarbeitetem Anregungsträger	29
Abbildung 3-8 Beschleunigungsverlauf des Prüftisches mit relevanten Kenngrößen.....	30
Abbildung 3-9 Vergleich des vertikalen Weges w_z und des vertikalen Beschleunigungsverlaufs a_z	32
Abbildung 3-10 Aufbau und Komponenten einer Ladeinheit.....	33
Abbildung 3-11 CAD Modell der RCU	37
Abbildung 3-12 Plattenträger der RCU. Ansicht von unten.	38
Abbildung 3-13 Umsetzung Schwerpunktverstellung der RCU.....	39
Abbildung 3-14 Bestimmung des Schwerpunkts der RCU. (1) Schwerpunkt; (2), (3) Anschlagpunkte.....	40
Abbildung 3-15 Konstruktion der Schwerpunkt lage der RCU	40
Abbildung 3-16 Aufbau zur Zugprüfung auf der Ladefläche des Prüftisches des HULK. (1) RCU; (2) Umlenkrolle Seil; (3) Hallenkran; (4) Kraftmessdose; (5) Ladefläche	43
Abbildung 3-17 Auswertung Zugversuch RCU mit Europalette/ Ladefläche des Prüftisches $m_{RCU} = 398$ kg).....	44
Abbildung 3-18 Zugkraft Offsetbestimmung Hubwagen (links). Aufbau zur Überprüfung des DMS-Sperrbalkens (rechts). (1) RCU; (2) Umlenkrolle Seil; (3) Hallenkran; (4) Kraftmessdose; (5) Ladefläche; (6) Hubwagen; (7) DMS-Sperrbalken	45

Abbildung 3-19 Überprüfung des Sperrbalkens auf systematische Messfehler	46
Abbildung 3-20 Korrigierter Kraftverlauf des Sperrbalkens	46
Abbildung 3-21 Blockschaubild der Systemgrenzen mit Eingangs- und Ausgangsgrößen	48
Abbildung 3-22 Effektdiagramm zum beispielhaftem Versuchsplan aus Tabelle 7.....	51
Abbildung 3-23 Wechselwirkungsdiagramm zum beispielhaftem Versuchsplan aus Tabelle 7.....	52
Abbildung 3-24 Absolute und relative Häufigkeitsverteilung (links), kumulierte relative Häufigkeitsverteilung (rechts) ¹⁰⁸	54
Abbildung 3-25 Dimensionsbehaftete Normalverteilung ¹¹²	55
Abbildung 3-26 Beispielhaftes Wahrscheinlichkeitsnetz mit Ausreißer	55
Abbildung 3-27 Residuen über Versuchsnummer mit Trend (links) und ohne Trend (rechts) ¹¹⁵	56
Abbildung 3-28 Grafische Darstellung des Konfidenzintervall eines signifikanten Effekts.....	59
Abbildung 3-29 Beispielhafte Darstellung eines Balkendiagramm zur Beurteilung signifikanter Effekte und Wechselwirkungen	59
Abbildung 4-1 Versuchsaufbau zur Untersuchung der Kippneigung; (1) Schwerpunkt RCU, (2) RCU, (3) Kippkante, (4) Zurrigurt; (5) Sperrbalken.....	62
Abbildung 4-2 Umgesetzter Versuchsaufbau zur Untersuchung der Kippneigung mit der RCU	62
Abbildung 4-3 Abhängigkeit der Kippneigung von der Schwerpunkthöhe d und der Verzögerung ax nach DIN 12195-1 für den dargestellten Versuchsaufbau.....	63
Abbildung 4-4 Maximal erreichter Kippwinkel bei der eingestellten Schwerpunkthöhe z_S , RCU = 800 mm.....	64
Abbildung 4-5 Ausschnitt horizontaler Beschleunigungsverlauf mit und ohne vertikale Anregung der Versuchsreihe Kippneigung der RCU.....	65
Abbildung 4-6 Abhängigkeit der Größe und des zeitlichen Versatzes des Peaks beim Wiederauftreffen der RCU auf die Ladefläche nach erfolgtem Kippvorgang mit vertikaler Anregung.....	66
Abbildung 4-7 Vergleich der vertikalen Beschleunigungsverläufe bei einer eingestellten Schwerpunkthöhe $z_{S,RCU} = 633$ mm. Markierte Stelle: Wiederauftreffen der RCU auf der Ladefläche des Prüftisches	67
Abbildung 4-8 Versuchsaufbau Blockieren mit Sperrbalken (Fahrtrichtung x-Richtung). (1) RCU; (2) Sperrbalken mit DMS; (3) Sperrbalken zur Rückseitigen Sicherung; (4) optionale Distanzstücke zur Einstellung einer Ladelücke	69
Abbildung 4-9 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe für die Versuchsreihe $m_{RCU} = 398$ kg	71
Abbildung 4-10 Residuen vs. Versuchsreihenfolge (links) und Häufigkeitsverteilung der Residuen (rechts) der maximalen Blockierkraft für die Versuchsreihe $m_{RCU} = 595$ kg.....	72
Abbildung 4-11 Wahrscheinlichkeitsnetz der Residuen der maximalen Blockierkraft für die Versuchsreihe $m_{RCU} = 595$ kg nach der Korrektur	73
Abbildung 4-12 Balkendiagramme zur Beurteilung signifikanter Effekte und Wechselwirkungen. Faktoren: A – vertikale Anregung; B – Reibwert; C – Ladelücke; Signifikanzniveau – $\alpha = 0,001$	73
Abbildung 4-13 Effektdiagramm für den Faktor vertikale Anregung	74
Abbildung 4-14 Wechselwirkungsdiagramm vertikale Anregung/ Reibwert/ Ladelücke für das Qualitätsmerkmal maximale Kraft $m_{RCU} = 595$ kg.....	75
Abbildung 4-15 Effektdiagramm mit Konfidenzintervall (Signifikanzniveau $\alpha = 0,001$) der vertikalen Anregung mit Antirutschmatten und ohne Ladelücke	75
Abbildung 4-16 Versuchsaufbau der Versuchsreihe Niederzurren. (1) RCU; (2) Zurrigurt; (3) Zugratsche; (4) Kraftmessdose; (5) Sperrbalken	77
Abbildung 4-17 Ausschnitt der Beschleunigungsverläufe für die Versuchsreihe Niederzurren	80
Abbildung 4-18 Residuen vs. Beobachtungsreihenfolge des Qualitätsmerkmals der Verschiebung der RCU.....	81

Abbildung 4-19 Wahrscheinlichkeitsnetz (links) und Histogramm (rechts) für die Residuen des Qualitätsmerkmals Verschiebung der RCU	81
Abbildung 4-20 Balkendiagramm zur Beurteilung signifikanter Effekte und Wechselwirkungen. Faktoren: A – vertikale Anregung; B – Zurrhöhe; Signifikanzniveau – $\alpha = 0,01$	82
Abbildung 4-21 Effektdiagramm des Faktors vertikale Anregung.....	82
Abbildung 4-22 Versuchsaufbau RCU ohne Sicherung. (1) RCU; (2) Sperrbalken	83
Abbildung 4-23 Residuen der Verschiebung (links) und maximale Geschwindigkeit des Prüfschlittens (rechts) über der Beobachtungsreihenfolge der Versuche	85
Abbildung 4-24 Residuen der Verschiebung über Beobachtungsreihenfolge (links) und Residuen der Verschiebung im Wahrscheinlichkeitsnetz (rechts) der korrigierten Versuchsdaten	86
Abbildung 4-25 Effektdiagramm der vertikalen Anregung mit Konfidenzintervall (Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$).....	86
Abbildung 4-26 Versuchsaufbau Sackware Kaliumsulfat	90
Abbildung 4-27 Gemittelter Kraftverlauf der Zurrgurte während der Prüfung, Versuchspunkt 3 der Ladeinheit 2	91
Abbildung 4-28 Versuchsaufbau Stahlspundfässer(links) und gemessene Verschiebungen (rechts).....	92
Abbildung 4-29 Versuchsaufbau Kunststofffässer mit Antirutschmatte (links) und gemessene Verschiebungen (rechts).....	94
Abbildung A-1 Technische Zeichnung des Anregungsprofils 3.....	100
Abbildung A-2 Technische Zeichnung des Anregungsprofils 4.....	101
Abbildung A-3 Versuchsaufbau zur Schwerpunktbestimmung der RCU, lange Seite der RCU	102
Abbildung A-4 Versuchsaufbau zur Schwerpunktbestimmung der RCU, kurze Seite der RCU	102
Abbildung A-5 Auswertung Zugversuch unter Verwendung von Antirutschmatten zwischen der an der RUC befestigten Europalette und der Ladefläche des Prüftisches.....	104
Abbildung A-6 Umsetzung Versuchsaufbau Blockieren mit DMS-Sperrbalken auf dem HULK ..	105
Abbildung A-7 Beschleunigungsverlauf Versuch Blockieren.....	106
Abbildung A-8 Effektdiagramm des Versuchs Blockieren, $m_{RCU} = 595$ kg	109
Abbildung A-9 Effektdiagramm des Versuchs Blockieren, $m_{RCU} = 398$ kg	109
Abbildung A-10 Versuchsdaten der maximalen Blockierkraft RCU mit Sperrbalken ($m_{RCU} = 398$ kg, N=24). Residuen vs. Beobachtungsreihenfolge (links); Wahrscheinlichkeitsnetz der Residuen (rechts).....	110
Abbildung A-11 Wechselwirkungsdiagramm vertikale Anregung/ Reibwert/ Ladelücke für das Qualitätsmerkmal maximale Kraft $m_{RCU} = 398$ kg.....	110
Abbildung A-12 Versuchsaufbau Niederzurren, untere Zurrhöhe $l_v = 772$ mm	112
Abbildung A-13 Versuchsaufbau Niederzurren, obere Zurrhöhe $l_v = 1400$ mm.....	112
Abbildung A-14 Beschleunigungsverlauf Versuch RCU ohne Sicherung	116
Abbildung A-15 Beschleunigungsverlauf Versuch Sackware Kaliumsulfat.....	118
Abbildung A-16 Beschleunigungsverlauf Versuch Stahlspundfässer	119
Abbildung A-17 Beschleunigungsverlauf Versuch Kunststofffässer	120

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht formschlüssiger/ kraftschlüssiger Ladungssicherungsmittel	8
Tabelle 2 Übersicht der Anregungsprofile	27
Tabelle 3 Ladehilfsmittel unterteilt nach ihrer Funktion	34
Tabelle 4 Ladungssicherung von Packgütern ⁶³	34
Tabelle 5 Anforderungsliste Konzeptionierung und Konstruktion Research Cargo Unit	36
Tabelle 6 Versuchsplan mit zwei Faktoren A und B und je zwei Stufen	48
Tabelle 7 Beispielhafter vollfaktorieller Versuchsplan mit 2 Faktoren (je 2 Stufen) mit Auswertung der Effekte und Wechselwirkungen	51
Tabelle 8 Faktorenliste Versuch RCU mit Sperrbalken	69
Tabelle 9 Versuchsplan Niederzurren	79
Tabelle 10 Übersicht Versuchsergebnisse RCU	88
Tabelle 11 Versuchsergebnisse relative Verschiebungen Stahlspundfässer	93
Tabelle 12 Versuchsergebnisse relative Verschiebungen Kunststofffässer L-Ring	94
Tabelle 13 Gemessene Winkel und daraus berechnete Schwerpunktlage der RCU ohne Gewichtsplatten/Plattenträger	103
Tabelle 14 Berechnete Schwerpunktlage der RCU mit $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$ und $m_P = 214 \text{ kg}$	103
Tabelle 15 Tabelle mit t-Werten. ($S = 1 - \alpha$)	104
Tabelle 16 Vergleich und Auswertung der Geschwindigkeit und Beschleunigungen des Versuchs Blockieren	106
Tabelle 17 Versuchsplan Blockieren mit Sperrbalken; RCU $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$	107
Tabelle 18 Versuchsplan Blockieren mit Sperrbalken; RCU $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$	108
Tabelle 19 Übersicht der Effekte mit p-Wert des Versuchs Blockieren mit Sperrbalken	109
Tabelle 20 Vergleich der gemessenen Blockierkräfte mit den berechneten Blockierkräften nach der DIN 12195-1:2010	111
Tabelle 21 Versuchsplan Niederzurren; RCU $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$	113
Tabelle 22 Reduzierter Versuchsplan Niederzurren. ($m_{RCU} = 595 \text{ kg}$)	114
Tabelle 23 Versuchsplan RCU ohne Sicherung	115
Tabelle 24 Vergleich und Auswertung der Geschwindigkeit und Beschleunigungen Versuch Sperrbalken	116
Tabelle 25 Versuchsergebnisse relative Verschiebung der Sackware Kaliumsulfat zwischen den jeweiligen Versuchen	117
Tabelle 26 Übersicht Beschleunigungskennwerte Versuch Sackware Kaliumsulfat	118
Tabelle 27 Übersicht Beschleunigungskennwerte Versuch Stahlspundfässer	119
Tabelle 28 Übersicht Beschleunigungskennwerte Versuch Stahlspundfässer	120

1 Einleitung

In Deutschland stellt der Gütertransport durch Lastkraftwagen (Lkw) mit über 70 % den größten Anteil am gesamten Güterverkehr dar. Dabei wurden im Jahr 2017 rund 3,1 Milliarden Tonnen Güter durch inländische Lkw in Deutschland transportiert.¹ Im Vergleich zum Vorjahr ist dies eine Steigerung um 1,6 %². In Anbetracht der steigenden Masse täglich transportierter Güter ist eine wirtschaftliche und zuverlässige Ladungssicherung von zunehmender Bedeutung.

1.1 Motivation

Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb untersucht, ob die vertikalen Anregungen bei der horizontalen Ladungssicherungsprüfung Auswirkungen haben und in den für die Ladungssicherung relevanten Normen und Richtlinien eine ausreichende Berücksichtigung finden. Für die experimentelle Untersuchung der vertikalen Anregungen steht dem Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt ein Forschungsschlitten zur Prüfung von Ladungssicherungssystemen zu Verfügung. Dieser besitzt im Gegensatz zu herkömmlichen Beschleunigungsschlittenprüfständen die Besonderheit, dass neben der horizontalen Verzögerung auch die Möglichkeit einer simultanen vertikalen Anregung des Prüftisches besteht.

Die rechtliche Grundlage für die Ladungssicherung bildet dabei unter anderem der Paragraph § 22 „Ladung“ der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO). Im § 22 Absatz 1 heißt es:

„Die Ladung einschließlich Geräte zur Ladungssicherung sowie Ladeeinrichtungen sind so zu verstauen und zu sichern, dass sie selbst bei Vollbremsung oder plötzlicher Ausweichbewegung nicht verrutschen, hin- und herrollen, herabfallen oder vermeidbaren Lärm erzeugen können. Hierbei sind die Regeln der Technik zu beachten.“³

Die beiden Werke DIN EN 12195-1 und VDI 2700 entsprechen den in Paragraph § 22 genannten „Regeln der Technik“ in Deutschland⁴. Die DIN EN 12195-1 befasst sich im Wesentlichen mit Berechnungsverfahren und der experimentellen Prüfung von Ladungssicherungen. Die VDI Reihe 2700 befasst sich ebenfalls mit der Berechnung von Sicherungskräften und enthält darüber hinaus Richtlinien für spezielle Ladeeinheiten⁵.

Bei den Berechnungsverfahren zur Ladungssicherung in den zuvor genannten Normen und Richtlinien werden vertikale Anregungen nur bedingt berücksichtigt^{4, 5}. Untersuchungen haben jedoch bereits gezeigt, dass vertikale Anregungen einen signifikanten Einfluss auf das Verhalten bei der Ladungssicherungsprüfung haben⁶. In Ländern wie Australien und Kanada werden diese vertikalen

¹ KBA: Gütergewicht im Versand mit deutschen Lastkraftfahrzeugen im Jahr 2017.

² DESTASIS: Beförderungsmenge nach Hauptverkehrsrelationen und Verkehrsträgern 2017.

³ BMJV: Straßenverkehrs-Ordnung § 22 Ladung (2018).

⁴ DIN: 12195-1:2010 (2011), S. 2.

⁵ VDI: LaSi auf Straßenfahrzeugen - Sicherungskräfte.

⁶ Kamil, K.: Diss., Entw. einer Prüf- & Bewertungsmeth. für LaSiSysteme (2017), S. 95.

Kraftschwankungen durch eine Entlastung vom 0,2-fachen der Erdbeschleunigung berücksichtigt.^{7, 8}

Um ein tieferes Verständnis für die Auswirkungen von vertikalen Anregungen bei der horizontalen Ladungssicherungsprüfung zu erhalten, werden im Rahmen dieser Arbeit mögliche Einflüsse untersucht und diskutiert.

1.2 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit ist es, die Auswirkungen der vertikalen Anregungen bei der horizontalen Ladungssicherungsprüfung aufzuzeigen. Dazu ist durch geeignete Versuche ein direkter Vergleich mit einer experimentellen Prüfstandsuntersuchung sowohl mit als auch ohne vertikale Anregung durchzuführen. Die Durchführung der Experimente erfolgt mit dem speziell dafür konzipierten hydraulischen Untersuchungswerkzeug für Ladungssicherungskonzepte (HULK). Dieser Prüfstand ermöglicht eine simultane Prüfung einer horizontalen Verzögerung und einer vertikalen Anregung.

Für die experimentellen Untersuchungen sind im Rahmen dieser Arbeit zunächst Literaturrecherchen zum Thema Ladungssicherungsprüfung durchzuführen sowie geeignete Ladeeinheiten und Prüfparameter, die in der Praxis von Relevanz sind, festzulegen. Anschließend wird eine ausführliche Versuchsplanung mit Variationsparametern und Messgrößen angefertigt. Im Rahmen der Experimente besteht die Forderung, sowohl unterschiedliche Ladeeinheiten als auch unterschiedliche Anregungen zu untersuchen. Auf der Grundlage der Versuchsplanung werden die experimentellen Untersuchungen am HULK durchgeführt und die relevanten Messdaten aufgezeichnet. Die gesammelten Messdaten werden anschließend ausgewertet und analysiert. Abschließend sind alle gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse ausführlich zu dokumentieren.

1.3 Methodik des Vorgehens

In Abbildung 1-1 sind die einzelnen Schritte der Methodik des Vorgehens visualisiert. Zu Beginn der Arbeit erfolgt die Einarbeitung in die Thematik der Ladungssicherung und ihrer bestehenden Normen und Richtlinien. Dabei wird besonderer Fokus auf die Berücksichtigung der vertikalen Anregung gelegt. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden Bewertungskriterien für die Beurteilung der Versuchsergebnisse abgeleitet.

⁷ CCMTA: NSC Cargo Securement Standard (2013), S. 13.

⁸ NTC: LOAD RESTRAINT GUIDE (2018), S. 240.



Abbildung 1-1 Methodik des Vorgehens

Durch Fahrversuche werden Messdaten von vertikalen Anregungen gesammelt. Diese Messdaten bilden zusammen mit Werten aus der Literatur die Anregungsamplituden für die Prüfstandsversuche. Ziel ist es, für die mechanische Anregung des Prüftisches Anregungsprofile zu entwickeln, um die gemessenen vertikalen Beschleunigungswerte für die Anregung am Prüfstand umzusetzen. Das Übertragungsverhalten ist dabei experimentell zu bestimmen.

Auf der Grundlage der Literaturrecherche wird eine Klassifizierung von Ladeeinheiten vorgenommen, um Stellvertreter für die experimentelle Untersuchung am Prüfstand zu generieren. Durch diese Klassifizierung besteht die Möglichkeit, den benötigten Prüfaufwand zu reduzieren. Detaillierte Untersuchungen an ausgewählten Stellvertretern ermöglichen anschließend weitere Erkenntnisse über die Auswirkungen der vertikalen Anregungen.

In einem nächsten Schritt erfolgt eine ausführliche Versuchsplanung unter Berücksichtigung der abgeleiteten Stellvertreter der Ladeeinheiten und der Anregungsprofile sowie die Festlegung der notwendigen Messtechnik. Dabei werden die Methoden der statistischen Versuchsplanung verwendet. Zusätzlich sind die Versuche chronologisch so angeordnet, dass die Erkenntnisse aus Vorversuchen bereits Optimierungen der detaillierten Versuchspläne ermöglichen.

Nach erfolgter Versuchsdurchführung werden die daraus resultierenden Ergebnisse analysiert und diskutiert.

2 Stand der Technik und Forschung der Ladungssicherung

Der folgende Abschnitt gibt einen Einblick in die Grundlagen der Ladungssicherung. Außerdem werden die unterschiedlichen Möglichkeiten der Prüfverfahren von Ladungssicherungssystemen und die hier verwendeten Sicherungstechniken näher beschrieben. Anschließend wird anhand einer Literaturrecherche der bestehende Forschungsstand zu vertikalen Anregungen zusammengefasst sowie die Berücksichtigung von vertikalen Anregungen in bestehenden Normen und Richtlinien dargestellt. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels beschäftigt sich mit dem Untersuchungswerkzeug zur Durchführung der Versuche.

2.1 Grundlagen

Wie bereits in Abschnitt 1 erläutert, bildet Paragraf § 22 der StVO die rechtliche Grundlage der Ladungssicherung. Die darin erwähnten Regeln der Technik sind die europäische Norm DIN EN 12195-1 und die Richtlinie VDI 2700. Darüber hinaus werden sowohl die alte Auflage der EN 12195-1:2003 als auch die neue Auflage der EN 12195-1:2010 je nach Rechtslage verwendet. Welches der genannten Regelwerke in einem Schadensfall zum Tragen kommt, hängt von vielen Faktoren ab und wird aufgrund ihrer Komplexität nicht weiter erläutert.⁹

Im Rahmen dieser Arbeit wird die aktuelle Fassung der DIN EN 12195-1:2010 für die Berechnung der Sicherungskräfte angewendet. Diese findet auch in der Verordnung für den Straßentransport von Gefahrgütern Anwendung¹⁰.

Die Ladungssicherung dient dazu, die beim Transport auftretenden Beschleunigungen und die damit verbundenen Massenkräfte aufzufangen, sodass ein sicherer Transport gewährleistet wird. Als Grundlage für die Berechnung dienen die maximal zu erwartenden Längs- bzw. Querbeschleunigungswerte. In Abbildung 2-1 sind die Beträge der maximalen horizontalen Beschleunigungen bei Fahrmanövern im Straßentransport dargestellt.

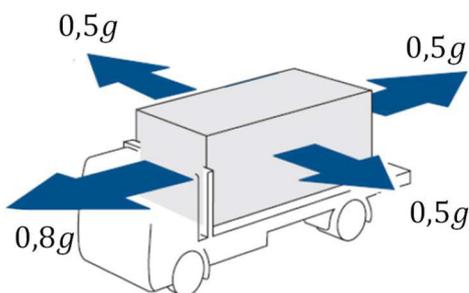


Abbildung 2-1 Richtung und Amplitude von Prüfbeschleunigungen beim Straßentransport¹¹

⁹ DIN: 12195-1:2010 (2011), S. 2.

¹⁰ UNECE/ EU: Gefahrgutbeförderung im Straßenverkehr (ADR), Abschnitt 7, S.19.

¹¹ Northern Territory Government: MVR Information Bulletin V64 - Load Restraint, S. 2.

Im Folgenden werden die entsprechenden Fahrmanöver kurz erläutert. Nach DIN EN 12195-1:2010 sind bezüglich dieser Längs- und Quereschleunigungen folgende Prüfungen durchzuführen^{12a, 13}:

- Prüfung in Längsrichtung
 - Nach vorne mit einer Bremsverzögerung von $7,85 \text{ m/s}^2$ (0,8 g)
Fahrmanöver: Vollbremsung
 - Nach hinten mit einer Bremsverzögerung von $4,91 \text{ m/s}^2$ (0,5 g)
Fahrmanöver: Rückwärtige Bremsung
- Prüfung in Querrichtung
 - Quereschleunigung von $4,91 \text{ m/s}^2$ (0,5 g)
Fahrmanöver: Spurwechsel, Kehrtwende

2.2 Prüfverfahren zur Beurteilung von Ladungssicherung

Die Überprüfung einer ausreichenden Ladungssicherung nach DIN EN 12195-1:2010 ist durch die Berechnung der Sicherungskräfte durchzuführen. Ist eine Berechnung für die gewählte Sicherungstechnik nicht möglich, ist die Überprüfung durch eine Neigungsprüfung oder eine dynamische Fahrprüfung nach EN 12642:2006 zu ersetzen.^{12b}

Des Weiteren besteht die Möglichkeit einer dynamischen Überprüfung auf einem Beschleunigungsschlitten, welche in den entsprechenden Normen allerdings nicht als „Stand der Technik“ gilt und keine Erwähnung findet.

Neigungsprüfung

Bei der Neigungsprüfung wird die Ladung sowie deren Ladungssicherung auf einer Ladefläche platziert, die die Möglichkeit bietet, die Neigung zu verstellen. Anschließend wird die Ladefläche langsam um den Winkel φ geneigt, den es zu bestimmen gilt. Der Neigungswinkel φ wird anhand einer Tabelle in Abhängigkeit der zu überprüfenden Beschleunigung a , des Reibwertes μ und der Ladungsgeometrie gewählt. Das Prüfverfahren gilt als bestanden, wenn die Ladung bei dem gewählten Neigungswinkel φ nicht oder nur eingeschränkt verrutscht.^{12c}

Bei der Neigungsprüfung handelt es sich um ein statisches Prüfverfahren, das dynamische Effekte nicht berücksichtigt^{12d}. Da sich die Neigungsprüfung nicht für die Untersuchung der Einflüsse vertikaler Anregung eignet, wird diese hier nicht weiter beschrieben.

Dynamische Fahrprüfung

Bei der dynamischen Fahrprüfung wird die Ladung mit ihrer zu prüfenden Sicherungstechnik auf der Ladefläche eines Lastkraftwagens platziert. Anschließend werden folgende definierte Fahrversuche durchgeführt: Vollbremsung, Kehrtwende, Spurwechsel mit anschließender Vollbremsung

¹² DIN: 12195-1:2010 (2011), a S. 12, b S. 29, c S. 42-46, d S. 3.

¹³ DIN: EN 12642:2006, S. 17-21.

sowie rückwärtige Vollbremsung. Die Prüfung erfolgt dabei nach der DIN 12642:2006, dessen Inhalt die Prüfung von Fahrzeugaufbauten von Lastkraftwagen und Anhängern ist. Bei dem jeweiligen Fahrmanöver sind vorgegebene Brems- bzw. Querschleunigungen zu erreichen, die sich mit den Beschleunigungen bei der Berechnung von Sicherungskräften nach DIN 12195-1:2010 aus dem vorherigen Abschnitt 2.1 überdecken.^{14, 15}

Untersuchungen im Rahmen der Dissertation von Kamil Klonecki bei FZD haben gezeigt, dass die Position der Ladung auf der Ladefläche, der Beladungszustand des Lkw, der FahrerIn und seine/ihre Fahrweise, die Wahl des Transportfahrzeugs, die Wahl des Testgeländes sowie weitere Faktoren einen Einfluss auf die auftretenden Beschleunigungen bei der dynamische Fahrprüfung haben. Dadurch kommt es zu Variationen in den Beschleunigungsverläufen.¹⁶

Aufgrund der begrenzten Reproduzierbarkeit und dem hohen zeitlichen Aufwand im Vergleich zu Prüfstandsversuchen eignet sich der Fahrversuch nicht für die Untersuchung von Einflüssen vertikaler Anregungen.

Prüfung mit Beschleunigungsschlitten

Eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung von Ladungssicherungssystemen bieten Prüfstände in Form von Beschleunigungsschlitten. Diese bieten die Möglichkeit, Ladungssicherungssysteme auf der Ladefläche des Schlittens zu platzieren und anschließend mit einer Beschleunigung durch das horizontale Verfahren des Schlittens zu prüfen. Dabei kann die Prüfung während der Beschleunigungsphase mit anschließender geringerer Verzögerung durchgeführt werden. Alternativ ist auch eine Prüfung während der Verzögerungsphase mit vorheriger geringerer Beschleunigung des Prüfschlittens möglich.^{17a}

Die Überprüfung von Ladungssicherungssystemen durch Beschleunigungsschlitten findet weder in der DIN 12195 noch in der VDI 2700 Beachtung. Somit ist eine Ladungssicherungsprüfung durch Beschleunigungsschlitten nach den gesetzlichen „Regeln der Technik“ nicht möglich. Allerdings eignen sich die Prüfstandsversuche zur Optimierung von Ladungssicherungssystemen^{17b}. Prüfstandsversuche bieten im Gegensatz zu dynamischen Fahrversuchen eine reproduzierbare Testumgebung und sind gleichzeitig mit einem „geringeren“ Aufwand durchführbar, wie beispielsweise durch ortsfeste Messtechnik. Im Vergleich zu der Neigungsprüfung werden bei der Prüfung mittels Beschleunigungsschlitten dynamische Effekte berücksichtigt.

Eine Richtlinie für den Aufbau und die Prüfbedingungen von Beschleunigungsschlitten stellt die EUMOS 40509 dar. Außerdem sind in der Richtlinie Grenzwerte von zulässigen Deformationen von Ladeeinheiten durch die Ladungssicherungsprüfung beschrieben, die eine Beurteilung der geprüften Ladeeinheiten erlauben.¹⁸

¹⁴ DIN: 12195-1:2010 (2011), S. 12.

¹⁵ DIN: EN 12642:2006, S. 17 -21.

¹⁶ Kamil, K.: Diss., Entw. einer Prüf- & Bewertungsmeth. für LaSiSysteme (2017), S. 21–31.

¹⁷ Juwet, M. et al.: Acceleration test machine, a S. 141, b S. 143.

¹⁸ EUMOS: EUMOS 40509 - Test method for unit rigidity (2012).

Aufgrund der Bauart des Prüfschlittens steht eine begrenzte Schienenstrecke für die Beschleunigung und Verzögerung zur Verfügung. Daraus folgt, dass die Einwirkdauer der Prüfbeschleunigung auf die Ladeeinheit ebenfalls begrenzt ist. Untersuchungen haben gezeigt, dass bereits nach einer Einwirkdauer von 275 ms die Verformungseffekte erreicht sind¹⁹. Die EUMOS 40509 fordert eine Einwirkdauer der Prüfbeschleunigung von mindestens 300 ms sowie das Erreichen der Prüfbeschleunigung in 50 ms^{20a}.

Überprüfungen im Straßenverkehr

Zusätzlich zu den genannten Prüfverfahren zur Überprüfung von Sicherungstechniken bietet die europäische Richtlinie 2014/47/EU für technische Unterwegskontrollen der Verkehrs- und Betriebssicherheit eine Beurteilungsgrundlage im Straßenverkehr. In dieser Richtlinie werden die Umsetzung und die Kontrolle der angewandten Sicherungstechniken beschrieben.^{21a}

Darin wird auf die EUMOS 40509 verwiesen, die auch die Prüfbedingungen für Beschleunigungsschlitten regelt^{20b}. Wie bereits erläutert werden darin auch Grenzwerte für die zulässigen Deformationen von Ladungen festgelegt. Die elastische Verformung der Ladung darf dabei nicht größer als 10 % und die permanente Verformung nicht größer als 5 % der Höhe der Ladung sein. Werden Ladungen kleiner als 120 cm betrachtet, darf die permanente Verformung nicht größer als 6 cm sein. Außerdem darf die permanente Verformung der unteren 20 cm der Ladung nicht größer als 4 cm sein. Handelt es sich bei der Ladung um übereinander geschichtete Ladegüter, darf die Verformung zwischen den einzelnen Schichten nicht größer als 2 % der Höhe der Ladung sein.^{20b}

2.3 Sicherungstechniken

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Sicherungstechniken von Ladeeinheiten und deren zugehörige Sicherungsmittel vorgestellt. Dabei wird auf die Berechnungsmethoden der Sicherungswirkung in der DIN 12195-1:2010 eingegangen.

Grundsätzlich wird bei den Sicherungsarten zwischen Formschluss und Kraftschluss unterschieden. Beim Formschluss wird die Ladung gegen eine Verschiebung mittels einer Blockade in ihrer Bewegungsrichtung gehindert. Zu den formschlüssigen Sicherungstechniken gehören neben dem Blockieren auch das Direktzurren. Der Kraftschluss dagegen hindert die Ladung gegen eine Verschiebung durch Erhöhung der Anpresskraft der Ladung auf die Ladefläche. Die erhöhte Anpresskraft führt zu einer Reibkraftherhöhung, die die Ladung sichert. Die kraftschlüssige Sicherungstechnik wird durch das Niederzurren umgesetzt. Des Weiteren sind auch Kombinationen aus beiden Sicherungsarten möglich. Bei den formschlüssigen Sicherungstechniken wird die Sicherungswirkung der Reibkraft ebenfalls berücksichtigt. Die Sicherungstechniken Blockieren und Niederzurren werden in den Abschnitten 2.3.2 und 2.3.3 erläutert.^{22, 23}

¹⁹ Juwet, M. et al.: Acceleration test machine, S. 141.

²⁰ EUMOS: EUMOS 40509 - Test method for unit rigidity (2012), a S. 5, b S. 6.

²¹ Europäische Union: Techn. Unterwegskontrolle d. Verkehrs- und Betriebssicherheit von Nfz (2014), L127/ a S. 200-206. b S. 200.

²² VDI: LaSi auf Straßenfahrzeugen - Sicherungskräfte, S. 13.

Zur Anwendung der verschiedenen Sicherungsarten stehen eine Vielzahl von Ladungssicherungsmitteln zur Verfügung. Die gängigsten Ladungssicherungsmittel sind in Tabelle 1 aufgeführt. Es besteht dabei die Möglichkeit, die Zurrmittel sowohl für die kraftschlüssige Ladungssicherung im Fall des Niederzurrens als auch für die formschlüssige Ladungssicherung in Form des Direktzurrens einzusetzen.

Tabelle 1 Übersicht formschlüssiger/ kraftschlüssiger Ladungssicherungsmittel^{24, 25}

Formschlüssig	Kraftschlüssig/ Formschlüssig
Ladebalken	Zurrgurte
Sperrstangen	Zurrketten
Keile	Zurrdrahtseile
Stirnwand	Zurrnetze
Einsteckungen	Planen
Trennwände	
ausfüllende Ladehilfsmittel	

Außerdem stehen für die formschlüssige Ladungssicherung durch Blockieren ebenfalls unterschiedlichste Sicherungsmittel zu Verfügung, die ebenfalls in Tabelle 1 aufgeführt sind. Sie sind meist Bestandteil des Lkw-Aufbaus bzw. des Aufliegers oder sind durch ein Baukastensystem entsprechend der zu transportierenden Ladung individuell an diese anzupassen²⁶.

Die zu sichernde horizontale Trägheitskraft $F_{x,y}$ der Ladung mit der Masse m ergibt sich mit der Erdbeschleunigung g dabei in Fahrzeuginnenrichtung (Index x) bzw. quer zur Fahrtrichtung (Index y) nach (2-1)²⁷:

$$F_{x,y} = m \cdot g \cdot c_{x,y} \quad (2-1)$$

Der Beschleunigungsbeiwert $c_{x,y}$ nimmt dabei die Werte entsprechend der bei den Fahrmanövern auftretenden horizontalen Beschleunigungen an, z.B. $c_x = 0,8$ für die Prüfung der Längsverzögerung nach vorne (vergleiche Abschnitt 2.1).

Die durch die Ladung aufgebrachte Vertikalkraft F_z (Index z) ergibt sich nach (2-2)²⁷ aus der Masse der Ladung m , der Erdbeschleunigung g und dem Beschleunigungsbeiwert c_z :

$$F_z = m \cdot g \cdot c_z \quad (2-2)$$

²³ DIN: 12195-1:2010 (2011).

²⁴ Dolezych GmbH & Co. KG: Ladungssicherungsmittel und Hebetchnik.

²⁵ SpanSet GmbH & Co. KG: Ladungssicherungsmittel.

²⁶ Fahrzeugwerk Bernard KRONE GmbH & Co. KG: Multi Safe System.

²⁷ DIN: 12195-1:2010 (2011), S. 8–9.

Der Beschleunigungsbeiwert c_z bietet dabei die Möglichkeit eine Verminderung der Gewichtskraft der Ladung durch vertikale Trägheitskräfte zu berücksichtigen^{28a}. Die Reibkraft F_R zwischen Ladung und Ladefläche ergibt sich nach (2-3)^{28b} anschließend aus der Vertikalkraft F_Z und dem Reibwert μ :

$$F_R = F_Z \cdot \mu = m \cdot g \cdot c_z \cdot \mu \quad (2-3)$$

2.3.1 Standsicherheit/Stabilität

Zunächst wird in der DIN EN 12195-2 definiert, ob eine Ladung gegen Kippen zu sichern ist. Gilt eine Ladeinheit als standsicher, wird das in der Norm als „Stabilität“ bezeichnet. Gilt eine Ladung als instabil, müssen zusätzliche Maßnahmen zur Vermeidung des Kippens getroffen werden. Die Stabilitätsbedingung einer Ladeinheit (2) ergibt sich dabei aus dem statischen Momentengleichgewicht um den Kippunkt (3) in Belastungsrichtung (siehe Abbildung 2-2). Die Ladeinheit gilt als standsicher, wenn Ungleichung (2-4)^{28c} mit der Vertikalkraft F_Z und der zu sichernden horizontalen Trägheitskraft $F_{x,y}$ erfüllt ist:

$$F_Z \cdot b_{x,y} > F_{x,y} \cdot d \quad (2-4)$$

Die Länge $b_{x,y}$ beschreibt dabei den horizontalen Abstand zwischen Kippkante (3) und dem Schwerpunkt (1). Die Länge d ist der vertikale Abstand zwischen Kippkante (3) und Schwerpunkt (1).

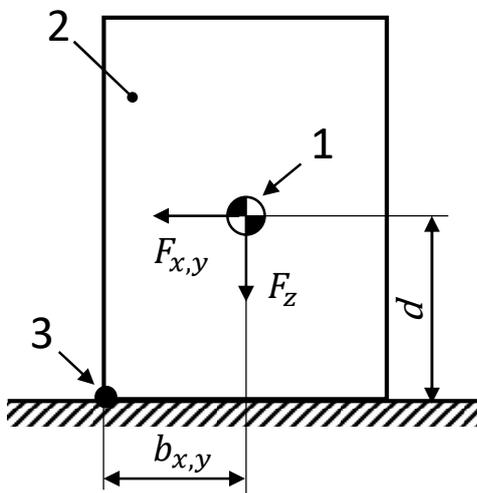


Abbildung 2-2 Skizze zur Stabilitätsberechnung nach DIN 12195-1:2010^{28c}. (1) Schwerpunkt Ladeinheit; (2) Ladeinheit; (3) Kippkante

²⁸ DIN: 12195-1:2010 (2011), a S. 8–9, b S.16, c S. 14-15.

2.3.2 Blockieren

Das Blockieren ist eine formschlüssige Sicherungstechnik, bei der die zu sichernde Ladeinheit durch eine bauliche Begrenzung in ihrer Bewegung gehindert wird^{29a}. Ist die Ladung nur in eine Richtung (längs oder quer zur Fahrtrichtung) durch Blockieren gesichert, besteht die Möglichkeit, die anderen Richtungen durch den Einsatz von Zurmitteln zu sichern³⁰.

Grundlage der Berechnung der Sicherungskräfte beim Blockieren ist die zulässige Belastbarkeit der Blockiervorrichtung. Die notwendige Rückhaltekraft F_B durch die Blockiervorrichtung darf die zulässige Blockierkraft BC der Blockiervorrichtung nicht überschreiten, woraus sich die Forderung (2-5)^{29b} ergibt:

$$BC \geq F_B \quad (2-5)$$

In Abbildung 2-3 sind die beim Blockieren angreifenden Kräfte nach DIN 12195-1:2010 dargestellt.

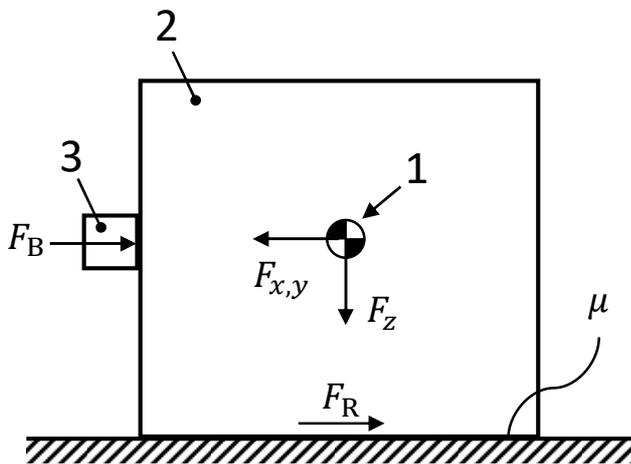


Abbildung 2-3 Darstellung der Ladungssicherung durch Blockieren. (1) Schwerpunkt Ladeinheit, (2) Ladeinheit, (3) Blockiervorrichtung

Für die notwendige Blockierkraft F_B der Blockiervorrichtung gilt der Zusammenhang (2-6)^{29b}:

$$F_B = F_{x,y} - F_R = m \cdot g \cdot (c_{x,y} - \mu \cdot c_z) \quad (2-6)$$

Wobei $F_{x,y}$ die Trägheitskraft ist, F_R die Reibkraft, $c_{x,y}$ der horizontale Beschleunigungsbeiwert, c_z der vertikale Beschleunigungsbeiwert und μ der Reibwert zwischen Ladung mit der Masse m und der Ladefläche.

Die Reibkraft F_R ist der Blockierkraft F_B gleichgerichtet und trägt somit zur Sicherungswirkung der Ladeinheit mit der Masse m bei. Erfüllt die berechnete Blockierkraft F_B die Bedingung aus Formel (2-5) ist eine Verwendung der betrachteten Blockiervorrichtung nach DIN 12195-1 geeignet.^{29b}

²⁹ DIN: 12195-1:2010 (2011), a S. 8, b S. 15-16.

³⁰ VDI: LaSi auf Straßenfahrzeugen - Sicherungskräfte, S. 13.

2.3.3 Niederzurren

Beim Niederzurren wird die Ladung durch eine Erhöhung der Reibkraft zwischen Ladeeinheit und Ladefläche gesichert. Dazu werden Sicherungsmittel zur kraftschlüssigen Ladungssicherung verwendet. Zusätzlich zur Gewichtskraft der Ladung wird über die Zurrmittel eine Kraft in vertikaler Richtung aufgebracht. Die dadurch erhöhte Gesamtkraft in vertikaler Richtung und die damit verbundene erhöhte Reibkraft zwischen Ladeeinheit und Ladefläche bildet die Sicherungskraft der Ladeeinheit gegen Verrutschen.³¹

Grundlage der Berechnung ist die erforderliche Vorspannkraft der Zurrmittel F_T . Da die maximale erreichbare Vorspannkraft S_{TF} eines Zurrmittels durch die an der Ratsche aufgebraachte Handkraft begrenzt ist³², werden weitere n_{Zurr} Zurrmittel eingesetzt, sofern es die Sicherung der Ladung erfordert. Zur Anbringung der Zurrmittel stehen bei einer Lkw- bzw. Anhängerladefläche fixe Anschlagpunkte zur Verfügung, sodass die Zurrmittel unter dem Winkel γ abgespannt werden (siehe Abbildung 2-4).

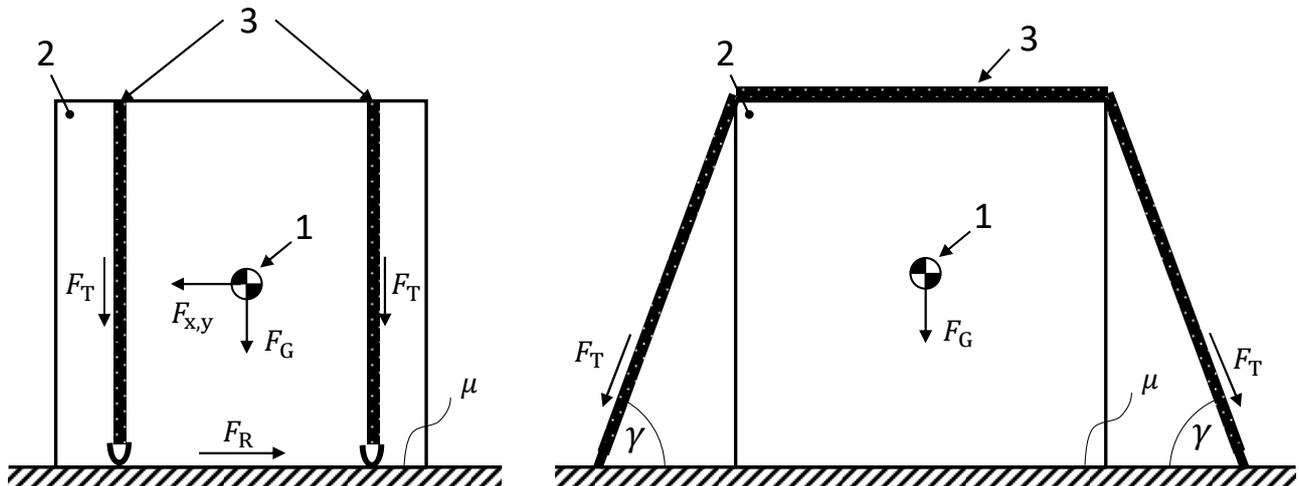


Abbildung 2-4 Darstellung vom Niederzurren einer Ladeeinheit. Links Seitenansicht, rechts Vorderansicht

Aufgrund der Überspannung wird pro Zurrmittel die Vorspannkraft F_T zweifach unter dem Abspannwinkel γ auf die Ladeeinheit aufgebracht. Die resultierende Reibkraft zwischen Ladung und Ladefläche F_R lässt sich mit (2-7)³³ berechnen:

$$F_R = \frac{2 \cdot n_{Zurr} \cdot F_T \cdot \mu \cdot \sin \gamma}{f_s} + m \cdot g \cdot \mu \cdot c_z \quad (2-7)$$

Der Anteil der Reibkraft durch die Zurrmittel wird zusätzlich durch den Sicherheitsbeiwert $f_s = 1,1$ ($f_s = 1,25$ für Sicherung in „Vorwärtsrichtung“) dividiert, der die Unbestimmtheit der Zurrkraftverteilung sowie eine Sicherheit bei einer Vollbremsung berücksichtigt³³.

³¹ VDI: LaSi auf Straßenfahrzeugen - Sicherungskräfte.

³² DIN: DIN EN 12195-2, S. 10.

³³ DIN: 12195-1:2010 (2011), S. 16–17.

Ist die resultierende Reibkraft größer als die zu sichernde Trägheitskraft, gilt die Ladung nach (2-8)^{34a} als gesichert:

$$F_R \geq F_{x,y} \quad (2-8)$$

Für die benötigte Vorspannkraft pro Zurrmittel F_T gilt (2-9)^{34a}:

$$F_T \geq \frac{m \cdot g \cdot c_{x,y} - m \cdot g \cdot \mu \cdot c_z}{2 \cdot n_{\text{Zurr}} \cdot \mu \cdot \sin \gamma} f_s \quad (2-9)$$

2.4 Vertikale Anregungen

In den folgenden beiden Abschnitten wird zum einen erläutert, inwieweit die vertikalen Anregungen bzw. vertikalen Beschleunigungen in den aktuellen Normen und Richtlinien national und international berücksichtigt werden. Zum anderen wird eine Zusammenfassung bestehender Forschungsergebnisse zum Thema der vertikalen Anregungen gegeben.

2.4.1 Berücksichtigung in Normen und Richtlinien

In der Norm DIN EN 12195-1:2010 wird das Thema der vertikalen Vibrationen und Schwingungen folgendermaßen aufgegriffen:

„Eine Überlagerung des Gewichtes der Ladung mit Beanspruchungen hoher Frequenz und gelegentlich auftretenden Stoßbelastungen von kurzer Dauer wird durch die Elastizität der Zurrmittel und das Stoßdämpfersystem der Lastkraftwagen und Anhänger ausgeglichen. Dabei treten keine wesentlichen Erhöhungen der Beanspruchung auf, so dass sie für die Anwendung dieser Europäischen Norm, die keinen wissenschaftlichen, sondern einen praktischen Ansatz vertritt, vernachlässigt werden kann.“^{34b}

Laut dieser Norm werden die Einflüsse vertikaler Anregungen beim Straßentransport als vernachlässigbar angenommen. In diesem Sinne wird der Beschleunigungsbeiwert für den Straßentransport $c_z = 1$ gewählt, wodurch nach Formel (2-2) die Vertikalkraft der Ladung F_z unvermindert wirkt. Daraus ergibt sich nach Formel (2-3) eine unverminderte Reibungskraft F_R zwischen Ladung und Ladefläche. Nach den formelmäßigen Zusammenhängen in Abschnitt 2.3 bleibt somit die Sicherungswirkung der Reibkraft F_R unbeeinflusst von vertikalen Beschleunigungen. Nach Formel (2-4) gilt dasselbe für die Stabilität gegenüber Kippen der Ladung.

Anders verhält es sich bei der Berechnung der Sicherungskräfte im See- und Schienentransport. So wird bei letzterem der Beschleunigungsbeiwert $c_z = 0,7$ zur Berechnung der Sicherungswirkung gegen Rutschen quer zur Fahrtrichtung gewählt, was einer Reduktion von 30 % entspricht. Beim Seetransport wird die Sicherungswirkung der Reibkraft durch das Eigengewicht der Ladung bis zu 80 % ($c_z = 0,2$) herabgesetzt.^{34b}

³⁴ DIN: 12195-1:2010 (2011), a S. 16–17, b S.12-13.

Durch den verminderten vertikalen Beschleunigungsbeiwert c_z wird die Vertikalkraft F_z und damit auch die Sicherungswirkung der Reibkraft F_R reduziert (siehe Abschnitt 2.3). Im Falle der Beurteilung der Standsicherheit führt ein geringer vertikaler Beschleunigungsbeiwert c_z dagegen zu einer reduzierten Stabilität gegenüber dem Kippen der Ladung (siehe Abschnitt 2.3.1).

Weiter heißt es in der DIN 12195-1:

„Auch bei Fracht ohne Risiko von Rutschen oder Kippen sind Maßnahmen (z. B. Blockieren oder Zurren) zu ergreifen, um eine wesentliche Verschiebung aufgrund von Schwingungen zu vermeiden.“³⁵

Trotz der in der Norm aufgegriffenen Passagen sind keine weiteren Sicherheitsbeiwerte zur Berücksichtigung von vertikalen Anregungen für den Straßentransport vorgesehen.

Bei der praktischen Überprüfung der Wirksamkeit der Ladungssicherungsmaßnahmen durch Fahrversuche nach DIN 12642:2006 wird eine Störstelle zur Anregung vertikaler Schwingung bei dem Fahrmanöver Vollbremsung vorgesehen:

Diese ist als „10 mm bis 20 mm hohe und 500 mm breite Schwelle unter 60° bis 80°“ auszuführen und unmittelbar vor der Vollbremsstrecke durch den Lkw zu überfahren. Sind dagegen „vergleichbare Fahrbahnunebenheiten“ vorhanden kann auf die Schwelle verzichtet werden.³⁶ Eine Erklärung warum bei den praktischen Fahrversuchen die vertikale Anregung zu berücksichtigen ist, wohingegen diese bei der Berechnung der Sicherungswirkung durch die „Elastizität der Zurrmittel und das Stoßdämpfersystem der Lastkraftwagen und Anhänger“³⁵ ausgeglichen werden, bleibt offen.

In der Richtlinie VDI 2700-2 wird ebenfalls der Einfluss von vertikalen Anregungen aufgegriffen. Darin heißt es:

„Die Fahrdynamik eines Fahrzeugs führt auch zu Vertikalkraftschwankungen (Vibrationen). Diese können zusammen mit horizontalen Massenkräften Verschiebewegungen (Wandern) des Ladeguts bewirken. Aufgrund dieser Vibrationen ist die Aufrechterhaltung der Haftreibung nicht gegeben, wie entsprechende Testreihen bestätigt haben. Die auftretenden Reibungskräfte im praktischen Fahrbetrieb werden am besten durch die Gleit-Reibbeiwerte beschreiben. Daher ist nur die Verwendung der Gleit-Reibbeiwerte als Berechnungsgrundlage der Sicherungskraft zulässig.“³⁷

Analog zur DIN EN 12195 wird ebenfalls ein Beschleunigungsbeiwert in vertikaler Richtung eingeführt, der allerdings in der gesamten Richtlinie auf den Wert 1 festgelegt wird und somit vertikale Einflüsse durch den Beschleunigungsbeiwert nicht weiter berücksichtigt.³⁷

³⁵ DIN: 12195-1:2010 (2011), S. 12–13.

³⁶ Vgl. DIN: EN 12642:2006, S. 18.

³⁷ VDI: LaSi auf Straßenfahrzeugen - Sicherungskräfte, S. 8.

Auch in der VDI 2700-2 ist eine alleinige Sicherung der Ladung durch das Eigengewicht der Ladung ausgeschlossen. Darin heißt es:

„Es hat sich gezeigt, dass auch für $\mu \geq f_{i,q}$ die vertikale Anpresskraft und somit die wirksame Reibung im Fahrbetrieb ohne zusätzliche Sicherungsmaßnahmen kurzzeitig gegen null gehen kann.“³⁸

Der Beschleunigungsbeiwert $f_{i,q}$ ist mit dem Beschleunigungsbeiwert $c_{x,y}$ aus der DIN EN 12195 gleichzusetzen. Die in den beiden Normen und Richtlinien aufgeführten Ladungssicherungstechniken nutzen die Sicherungswirkung der Reibkraft zwischen Ladung und Ladefläche durch die Masse der Ladung. Dabei wird nicht berücksichtigt, dass bei der gesicherten Ladung analog zur ungesicherten Ladung ebenfalls die „vertikale Anpresskraft [...] kurzzeitig gegen null gehen kann“³⁸ und somit die Sicherungswirkung der Reibkraft ebenfalls vermindert wird. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit einer verstärkten Kippneigung der Ladung durch vertikale Anregung.

Im Gegensatz zu den europäischen Normen und Richtlinien wird der Einfluss von vertikalen Anregungen bei der Berechnung von Sicherungskräften in Nordamerika und Australien bereits berücksichtigt. In Australien werden vertikale Beschleunigungen von $1,96 \text{ m/s}^2$ (0,2 g) aufgrund von Schlechtwegstrecke berücksichtigt^{39a}. Somit wird die verminderte Wirkung der Reibkraft in der Beurteilung der Sicherungswirkung beachtet. Wird die Ladung mittels Blockierens ohne weitere Sicherungsmaßnahmen, wie z.B. Niederzurren, gesichert, ist eine Verwendung der Reibkraft als Sicherungskraft nicht zulässig^{39b}.

Auch in Nordamerika ist die Ladung mit dem 0,2-fachen der Gewichtskraft in Richtung der Ladefläche zu sichern, sofern die Ladung nicht durch den Aufbau in ihrer Bewegung vollständig begrenzt wird⁴⁰.

³⁸ VDI: LaSi auf Straßenfahrzeugen - Sicherungskräfte, S. 15.

³⁹ NTC: LOAD RESTRAINT GUIDE (2018), a S. 4, b S. 250.

⁴⁰ CCMTA: NSC Cargo Securement Standard (2013), S. 13.

2.4.2 Untersuchungen und Forschung

Am Fachgebiet für Fahrzeugtechnik konnten bereits im Rahmen der Dissertation von Kamil Kloncki erste Ergebnisse zu den Auswirkungen der vertikalen Anregung bei der horizontalen Ladungssicherungsprüfung gesammelt werden. In einer ersten Versuchsreihe wurde eine Ladeeinheit mit einer Masse von 250 kg ungesichert auf dem Untersuchungswerkzeug positioniert und anschließend auf eine maximale Geschwindigkeit von $\bar{v}_{\max} = 2,22 \text{ m/s}$ beschleunigt. Nach dem Erreichen der maximalen Geschwindigkeit wurde der Prüfschlitten mit einer horizontalen Verzögerung von $\bar{a}_{x,\text{Verzögerung}} = 4,7 \text{ m/s}^2$ wieder abgebremst. Als Zielgröße wurde die Verschiebung der Ladeeinheit betrachtet. Bei der Hälfte der Versuche der Versuchsreihe wurde die Ladung mit einer vertikalen Anregung mit $\bar{a}_z = 2,57 \text{ m/s}^2$ beschleunigt. Bei den Versuchen mit vertikaler Anregung wurde eine 17 % größere Verschiebung der Ladeeinheit im Vergleich zu den Versuchen ohne vertikale Anregung festgestellt. In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Ladeeinheit mit einem speziellen Sperrbalken gesichert, der die Möglichkeit bietet, die Rückhaltekraft während der Verzögerungsphase zu messen. Zusätzlich wurde zwischen dem Sperrbalken und der Ladeeinheit eine Ladelücke von 25 mm frei gelassen. Auch bei dieser Versuchsreihe konnte eine 19 % höhere Rückhaltekraft mit vertikaler Anregung gemessen werden. Bei beiden Versuchsreihen wurde ein signifikanter Einfluss der vertikalen Anregung festgestellt.⁴¹

Im Bericht „Experimental evaluation of friction coefficients of typical loads and trailer decks under vertical vibration“ aus dem Jahre 1997 wurde der Einfluss von vertikalen Schwingungen auf die Reibkraft untersucht. Bei der Untersuchung wurden sowohl unterschiedliche Kombinationen von Ladeeinheiten und Ladeflächen als auch verschiedene Anregungsfrequenzen betrachtet. Durch die vertikalen Schwingungen blieben die Mittelwerte der Reibkraft nahezu unverändert zu den Mittelwerten der statischen Messung. In Abhängigkeit der wirkenden Beschleunigungsamplitude schwankten die Momentanwerte der Reibkraft jedoch um diesen Mittelwert. Die Reibkraft folgte dabei ohne Phasenverschiebung dem Beschleunigungsverlauf der vertikalen Anregung (siehe Abbildung 2-5). Das heißt, dass bei negativen vertikalen Beschleunigungen bzw. einer verminderten Erdbeschleunigung auch eine verminderte Reibkraft beobachtet werden konnte. Abhängig von der Frequenz wurde ein Anstieg der Amplituden der gemessenen Reibkraft bis zu einer Anregungsfrequenz von 2 Hz festgestellt. Bei einer weiteren Erhöhung der Anregungsfrequenz bis zu 12 Hz wurden dagegen in den meisten Fällen gleichbleibende Amplituden beobachtet. Außerdem ergab die Untersuchung, dass eine zunehmende Anregungsamplitude zu einer Zunahme der minimalen und maximalen Amplituden der Reibkraft führt. Unter den vertikalen Schwingungen wurde eine Verminderung der Reibkraft von bis zu 80 % der statisch gemessenen Reibkraft festgestellt.⁴²

⁴¹ Vgl. Kamil, K.: Diss., Entw. einer Prüf- & Bewertungsmeth. für LaSiSysteme (2017), S. 94–95.

⁴² Rakheja, S. et al.: Friction coefficients und vertical vibrations (1997), S. 130–131.

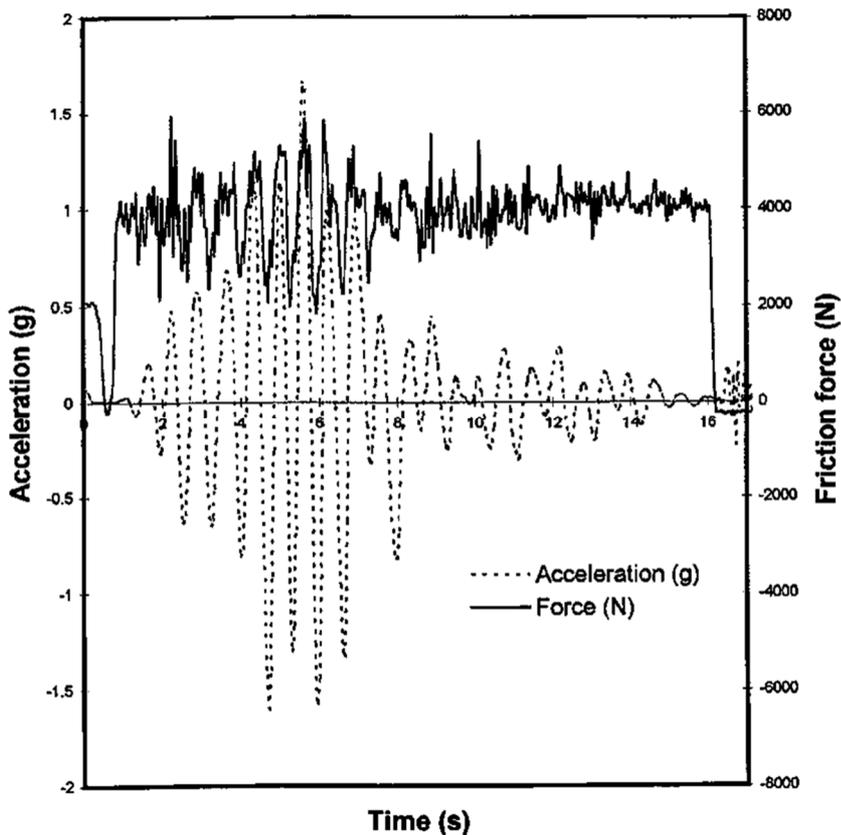


Abbildung 2-5 Zeitlicher Verlauf der Reibkraft und der vertikalen Beschleunigung⁴³

Ebenfalls im Jahr 1997 wurde die Veränderung der Vorspannkraft beim Niederzurren bei einer Testfahrt über 40 km auf einem nordamerikanischen Highway durch Vibrationen untersucht. Hierbei wurde ein fast vollständiger Verlust der Vorspannkraft in Abhängigkeit von der gewählten Vorspannkraft, den eingesetzten Kantenschonern und der Wahl des Zurrmittels festgestellt.⁴⁴

Auf Grund der festgestellten Verminderung der Reibkraft bei einer vermindert wirkenden Beschleunigungsamplitude der Erdbeschleunigung g durch vertikale Schwingungen wird gefolgert, dass in dieser Phase eine verstärkte Ladungssicherung notwendig ist, sofern die Ladungssicherungstechnik die Sicherungswirkung durch die Reibkraft berücksichtigt. In Abschnitt 2.3 wurde bereits gezeigt, dass in den bestehenden Normen und Richtlinien die Reibkraft für die Sicherungswirkung der darin beschriebenen Sicherungstechniken verwendet wird. Aus den genannten Gründen wird im Rahmen dieser Arbeit ein besonderer Fokus auf die vermindert wirkende vertikale Beschleunigung der Erdbeschleunigung g durch die vertikale Anregung gelegt.

⁴³ Rakheja, S. et al.: Friction coefficients und vertical vibrations (1997), S. 104.

⁴⁴ CCMTA: Effect of cargo and tiedown characteristics.

2.5 Untersuchungswerkzeug

Das Fachgebiet Fahrzeugtechnik verfügt über einen Prüfstand zur Untersuchung von Ladungssicherungssystemen. Dieser ist als Beschleunigungsschlitten zur horizontalen Ladungssicherungsprüfung ausgeführt, der zunächst die zu prüfende Ladung „langsam“ beschleunigt und anschließend mit der Prüfbeschleunigung verzögert. Die Besonderheit dabei ist, dass während der horizontalen Prüfung eine simultane vertikale Anregung durchgeführt werden kann. Abbildung 2-6 zeigt den Prüfstand, der den Namen „Hydraulisches Untersuchungswerkzeug für Ladungssicherungskonzepte“ (HULK) trägt.

2.5.1 Vorstellung HULK

Der Prüfstand verfügt über einen Prüftisch mit einer Länge und Breite von jeweils 2,5 m und einer Nutzlast von 30 kN. Dies ermöglicht eine Prüfung von bis zu vier Ladeeinheiten auf Europaletten⁴⁵, wodurch die Möglichkeit besteht, Ladekonstellation auf einem Lkw nachzustellen.

In Abbildung 2-6 ist die Endposition des Prüftisches nach einer erfolgten Prüfung dargestellt. Die Fahrtrichtung des Prüftisches erfolgt in positive x-Richtung.

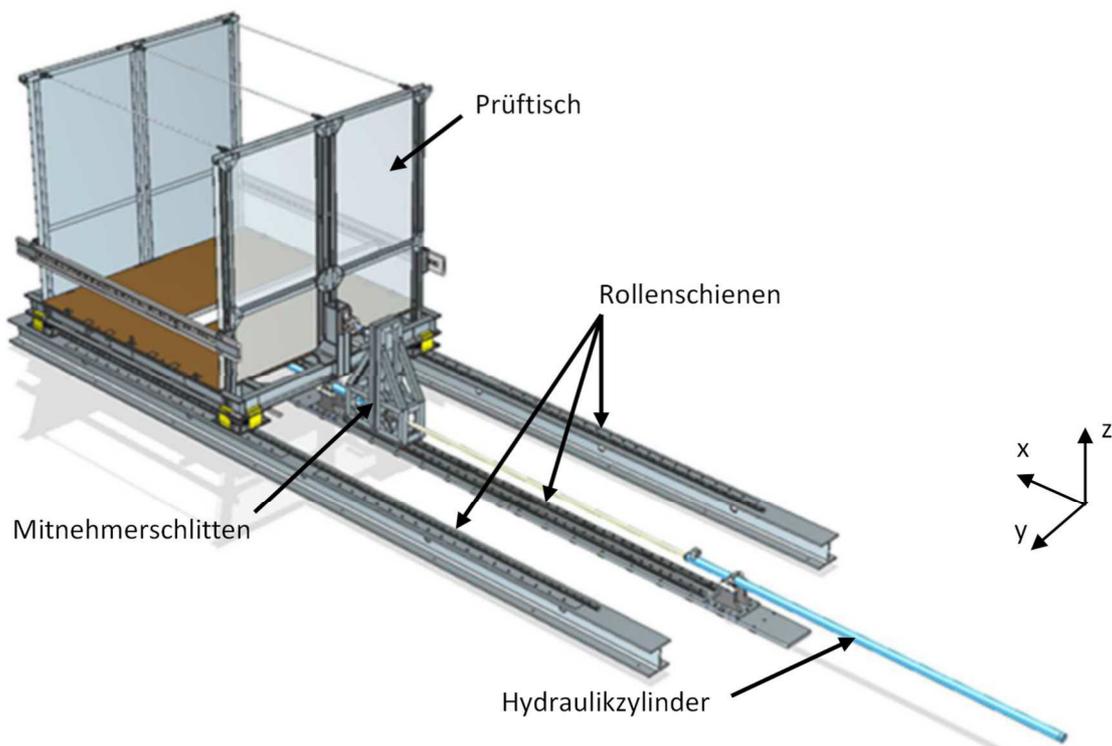


Abbildung 2-6 CAD Modell des hydraulischen Untersuchungswerkzeug für Ladungssicherungskonzepte (HULK)⁴⁶

⁴⁵ Maße einer Europoolpalette 1200 mm x 800 mm x 144 mm (Länge x Breite x Höhe)

⁴⁶ Kamil, K.: Diss., Entw. einer Prüf- & Bewertungsmeth. für LaSiSysteme (2017), S. 81.

Funktionsweise des Prüfstands

Der Beschleunigungsschlitten unterteilt sich in die beiden Baugruppen Prüftisch und Mitnehmerschlitten wie in Abbildung 2-6 zu sehen ist. Der Prüftisch nimmt die Ladung auf und ist mit vier Rollenwagen auf zwei Rollenschienen axial gelagert. Der Prüftisch wiederum ist über eine Schwinge mit dem Mitnehmerschlitten verbunden, der ebenfalls mit vier Rollenwagen auf zwei separaten Rollenschienen axial gelagert ist und die zweite Baugruppe darstellt. An dem Mitnehmerschlitten sind zwei Hydraulikzylinder über Gelenklager befestigt, die primär den Mitnehmerschlitten und sekundär den Prüftisch über die Schwinge antreiben (siehe Abbildung 2-7). Der Prüftisch wird dabei von dem Mitnehmerschlitten gezogen bzw. geschoben. Für den Antrieb werden einfach wirkende Hydraulikzylinder verwendet, die entgegengerichtet montiert sind, sodass beide Zylinder auf Zug belastet werden. Die Hydraulikzylinder werden über einen vorgeschalteten Druckspeicher versorgt, der einen maximalen Druck von 250 bar bereitstellen kann.^{47, 48}

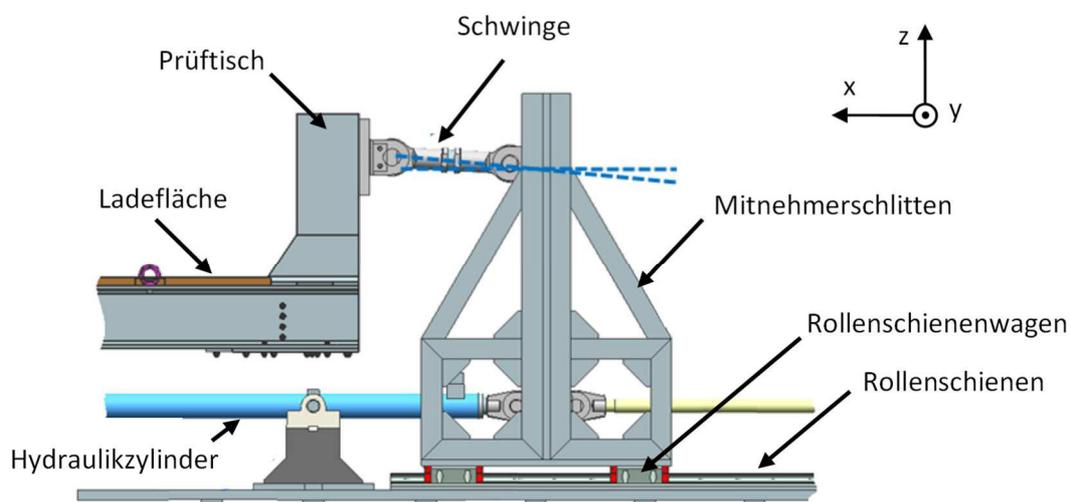


Abbildung 2-7 Anbindung des Mitnehmerschlittens an den Prüftisch am HULK⁴⁸

Vertikale Anregung

In der Abbildung 2-8 ist die Realisierung des vertikalen Freiheitsgrades des Prüftisches dargestellt. Diese erfolgt über vier Luftbalgzylinder, welche auf dem Rollenwagen angebracht sind. Durch die Verwendung von Luftbalgzylindern ist eine Anpassung der Federrate an den Beladungszustand möglich. Ein weiterer Vorteil ist der Neigungsausgleich des Prüftisches, da jeder Balgzylinder separat angesteuert werden kann. Die Erfassung der Höhe der drei Balgzylinder erfolgt dabei durch Seilzugsensoren. Die Höhe des vierten Balgzylinders wird anhand der drei gemessenen Höhen berechnet. Für die Verbesserung der Quersteifigkeit sowie für eine vertikale Höhenbegrenzung sind um jeden Balgzylinder vier Federbleche angebracht. Die Schwinge zwischen Prüftisch und Mitnehmerschlitten ermöglicht einen vertikalen Freiheitsgrad unabhängig vom Mitnehmerschlitten.⁴⁸

⁴⁷ Kamil, K.: Diss., Entw. einer Prüf- & Bewertungsmeth. für LaSiSysteme (2017), S. 85.

⁴⁸ Klonecki, K. Dr.; Winner, H. Prof. Dr. rer. nat.: Verfahren zur Untersuchung von Ladungssicherungsmaßnahmen (2014), S. 12–13.

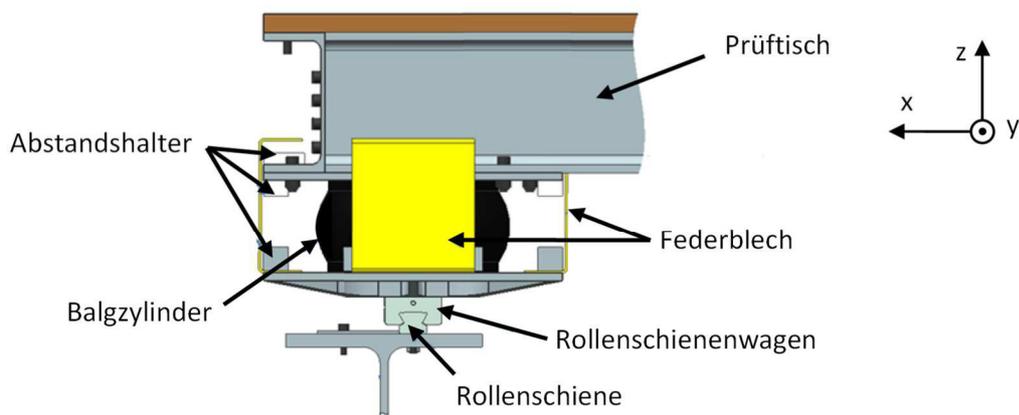


Abbildung 2-8 Lagerung des Prüftisches mit vertikalem Freiheitsgrad auf dem axialen Schienensystem⁴⁹

In Abbildung 2-9 ist die Vorrichtung zur vertikalen Anregung des Prüftisches dargestellt. Die vertikale Anregung erfolgt dabei über zwei Laufräder, die mittig unter dem Prüftisch angebracht und starr mit diesem verbunden sind. Während einer Prüfung rollen die beiden Laufräder auf zwei Doppel-T-Trägern, welche im Folgenden als Anregungsträger bezeichnet werden. Es besteht die Möglichkeit, auf dem Anregungsträger unterschiedliche Anregungsprofile aufzuschrauben, die bei der axialen Bewegung des Prüftisches von den Laufrädern überfahren werden. Überfahren die beiden Laufräder die Anregungsprofile, wird der Prüftisch dadurch vertikal angeregt.^{50a}

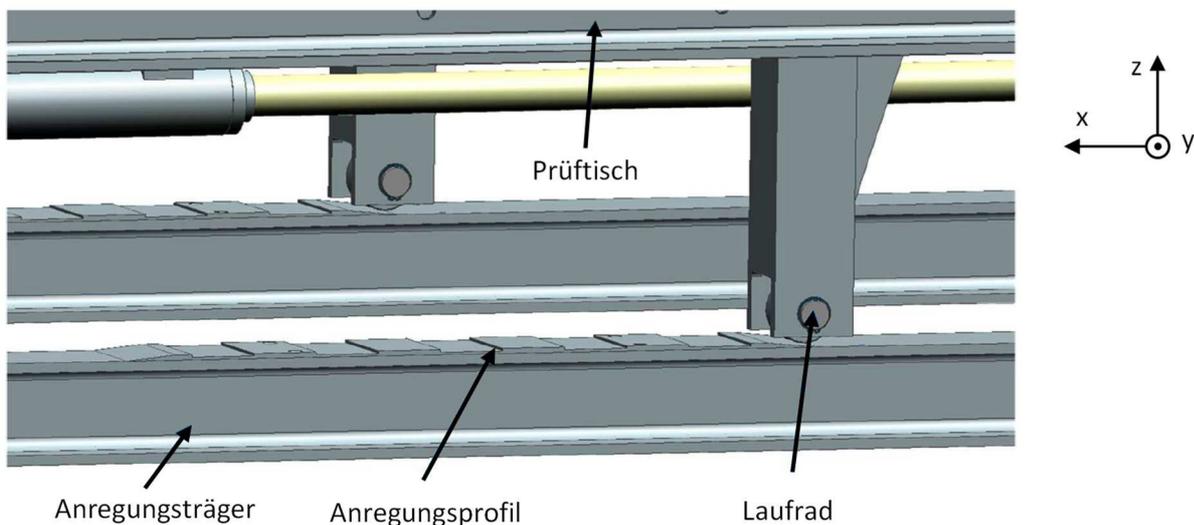


Abbildung 2-9 Funktionsweise der vertikalen Anregung des Prüftisch durch das Überfahren von Anregungsprofilen^{50b}

Es ist dabei vorgesehen, dass mehrere Anregungsprofile hintereinander auf dem Anregungsträger befestigt werden, um eine mehrfache Anregung des Prüftisches zu realisieren.

⁴⁹ Klonecki, K. Dr.; Winner, H. Prof. Dr. rer. nat.: Verfahren zur Untersuchung von Ladungssicherungsmaßnahmen (2014), S. 12.

⁵⁰ Kamil, K.: Diss., Entw. einer Prüf- & Bewertungsmeth. für LaSiSysteme (2017), a S. 82, b S. 94.

Ladungssicherung

Der Prüfstand bietet die Möglichkeit, unterschiedlichste Ladungssicherungstechniken einzusetzen. Durch zwei Stirnwände am vorderen und hinteren Ende des Prüftisches erfolgt eine formschlüssige Ladungssicherung. Zusätzlich besteht die Möglichkeit Sperrbalken, Ladebalken sowie auch Seitenlatten zu montieren. Für die kraftschlüssige Ladungssicherung sind seitlich am Prüftischboden Bohrungen für die Befestigung von Anschlagpunkten in einem Abstand von 300 mm angebracht. Zusätzlich sind zwei Sperrbalken mit angeschweißten Ringmuttern als Anschlagpunkte für ein flexibles Verzurren von Ladeeinheiten vorhanden.

Sensorik

Der HULK verfügt über insgesamt zwei Beschleunigungssensoren, wovon einer am Antriebsschlitten des Prüfstands befestigt ist und die horizontale Beschleunigung in Fahrtrichtung erfasst. Dieser Beschleunigungssensor wird mit dem Index 1 im Bedienprogramm bezeichnet. Ein weiterer Beschleunigungssensor ist mittig an der Unterseite des Prüftisches befestigt und erfasst neben der horizontalen Beschleunigung in Fahrtrichtung auch die vertikale Beschleunigung des Prüftisches. Dieser ist mit dem Index 2 spezifiziert. Die Beschleunigungssensoren werden mit einer Frequenz von 1000 Hz abgetastet. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich die Werte des Beschleunigungssensors 2 verwendet, da die untersuchten Ladeeinheiten sich ebenfalls auf dem Prüftisch befinden und mit den entsprechenden Beschleunigungen belastet werden. Auf die Angabe des Beschleunigungssensor-Indexes wird aus diesem Grund bei der Angabe von Beschleunigungen des Prüfstandes verzichtet.

Neben den Beschleunigungssensoren verfügt der Prüfstand über einen Lineargeber, über den die absolute Position des Prüftisches bestimmt wird. Mithilfe der einfachen Differenzierung des Wegsignals lässt sich die horizontale Geschwindigkeit messen. Die zweifache Differenzierung des Wegsignals liefert die horizontale Beschleunigung in Fahrtrichtung des Prüftisches.

2.5.2 Potentialanalyse HULK

Die Bedienung des HULK erfolgt durch eine bei FZD selbst entwickelte Benutzeroberfläche, die auf dem Programm LabVIEW aufgebaut ist. Der Prüfschlitten lässt sich damit mit einem Handbetriebsmodus in seiner Position verfahren. Außerdem besteht in einem Automatikmodus die Möglichkeit Beschleunigungsprofile abzufahren, die individuell anpassbar sind. Im Automatikmodus wird aus dem Beschleunigungsprofil ein zeitlich aufgelöster Ventilöffnungsverlauf des hydraulischen Regelventils berechnet. Der berechnete Ventilöffnungsverlauf wird als Soll-Vorgabe an das hydraulische Regelventil gesendet, welches den Ventilöffnungsquerschnitt entsprechend einstellt. Dadurch wird der Prüfschlitten beschleunigt und verzögert. Zur Messung des Hydraulikdrucks sind pro Hydraulikzylinder zwei Drucksensoren vorhanden. Davon befindet sich jeweils ein Sensor direkt nach dem Regelventil und jeweils ein Sensor am Anschluss der Arbeitsseite des Hydraulikzylinders. Untersuchungen des Ansprechverhaltens des Druckverlaufs haben gezeigt, dass bei einem sofortigen

Öffnen⁵¹ des Regelventils auf 15 % der Druck erst nach 100 ms einen Druck von 20 bar erreicht. Aufgrund dieses zeitverzögerten Druckanstiegs ist bei der aktuellen Ausbaustufe des Prüfstands keine funktionsfähige Regelung des Beschleunigungsverlaufs umsetzbar. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass sich Luft im Hydrauliksystem befindet, die zunächst komprimiert wird und einen verzögerten Druckanstieg bewirkt. Deshalb wird der Prüfstand nur durch ein Ventilöffnungsquerschnittprofil über der Zeit gesteuert. Dieses Steuerungsprofil ist an die zu prüfende Masse der Ladeeinheit sowie die gewünschte Verzögerung anzupassen und wird iterativ erstellt. Durch die fehlende Regelung besteht allerdings nicht die Möglichkeit, auf Veränderungen im Beschleunigungsverlauf zu reagieren, die beispielsweise durch das Verrutschen der Ladung auftreten.

Anregungsprofile

Im Rahmen der Dissertation von Kamil Klonecki ist ein Anregungsprofil zur vertikalen Anregung des Prüftisches entwickelt worden, welches mehrere Ausfräsungen besitzt. Dieses Anregungsprofil wird von dem Laufrad während der Prüfung überfahren und bewirkt somit eine mehrfache Anregung des Prüftisches (siehe Abbildung 2-10).⁵²

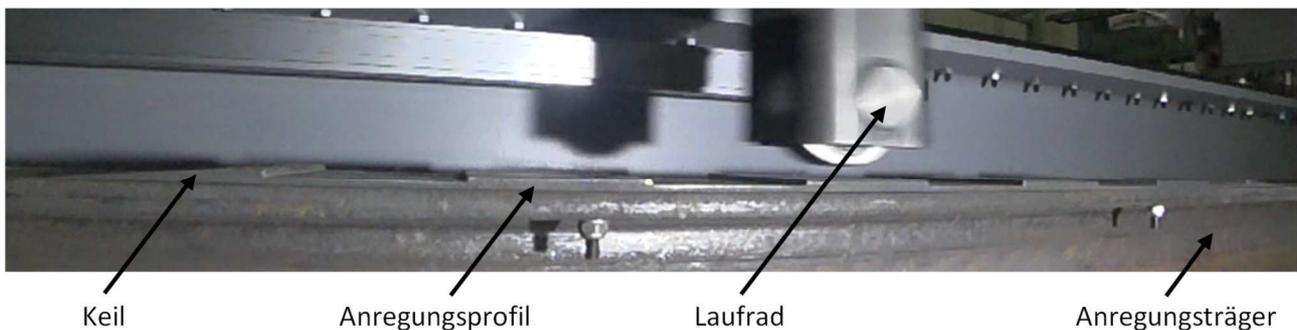


Abbildung 2-10 Anregungsprofil zur mehrfachen vertikalen Anregung des Prüftisches

Eine Videoanalyse des in Abbildung 2-10 dargestellten Anregungsprofils zeigte jedoch, dass das Laufrad nur den ersten Keil der Anregung überfährt und anschließend von dem Anregungsprofil sowie dem Anregungsträger abhebt. Der Kontakt zwischen Laufrad und dem Anregungsprofil findet erst nach einer horizontalen Wegstrecke von 500 mm wieder statt. Innerhalb dieser Wegstrecke kommt es zu keiner Anregung des Prüftisches durch die Anregungskanten. Außerdem wurde bei der Videoanalyse festgestellt, dass sich der Anregungsträger beim Überfahren des Anregungsprofils in Richtung Hallenboden durchbiegt.

Aus diesem Grund besteht die Forderung, geeignete Anregungsprofile für den Prüfstand zu gestalten, die die Transportbelastung mit dem bestehenden Prüfstandsaufbau darstellen sowie den Anregungsträger so umzubauen, dass eine Durchbiegung vermieden wird. Die Mehrfachanregung wird aufgrund der eingeschränkten Funktionsweise nicht weiterverfolgt.

⁵¹ Regelventil erreicht nach 10 ms den vorgegebenen Öffnungsquerschnitt. Betriebsdruck 190bar.

⁵² Kamil, K.: Diss., Entw. einer Prüf- & Bewertungsmeth. für LaSiSysteme (2017), S. 91–94.

2.6 Zielsetzung

Die durchgeführten Recherchen zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen der zur Sicherung genutzten Reibkraft und der vertikalen Anregung besteht. Darüber hinaus wurden bei bereits durchgeführten Versuchen am Prüfstand der Einfluss von vertikalen Anregungen beobachtet. Da zum einen in den europäischen Normen und Richtlinien der Einfluss nur begrenzt berücksichtigt wird und zum anderen der Einfluss auf Ladeeinheiten unerforscht ist, besteht die Forderung weitere Untersuchungen durch experimentelle Versuche durchzuführen.

Dazu sind im Rahmen dieser Arbeit zunächst Lkw-Fahrversuche durchzuführen, um mögliche vertikale Anregungen zu identifizieren. Anhand der ausgewerteten Messdaten sind anschließend Anregungsprofile zur vertikalen Anregung des Prüftisches des HULK zu entwickeln, die eine realitätsnahe Abbildung der bei den Fahrversuchen gemessenen vertikalen Beschleunigungen darstellen.

Des Weiteren ist eine Klassifizierung von Ladeeinheiten nach ihren Eigenschaften durchzuführen, um daraus Stellvertreter für die experimentelle Untersuchung zu ermitteln. Dies bildet die Grundlage zur Planung von geeigneten Versuchen, die eine Beurteilung der Auswirkung der vertikalen Anregung erlauben. Durch die Verwendung der Methoden der statistischen Versuchsplanung sind entsprechende Versuchspläne zu erstellen. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind zu dokumentieren und sofern möglich statistisch zu überprüfen.

3 Versuchsvorbereitung

In diesem Kapitel werden die Vorbereitungen für die Versuche geschildert. Diese umfassen Stadt- und Autobahnfahrten, sowie Fahrversuche mit unterschiedlichen Fahrmanövern. Anhand der daraus resultierenden Erkenntnisse werden anschließend geeignete Anregungsprofile für die vertikale Anregung des Prüftisches erarbeitet und umgesetzt. Des Weiteren wird eine Klassifizierung von Ladeeinheiten durchgeführt und eine Forschungsladeeinheit entwickelt. Abschließend werden die Methoden der statistischen Versuchsplanung erläutert.

3.1 Fahrversuche zur Identifizierung vertikaler Anregungen

Zur Identifizierung vertikaler Anregungen werden Fahrversuche mit einem Lastkraftwagen der Marke MAN vom Typ L2000 mit einer Gesamtmasse von 11 Tonnen durchgeführt.

Für die Messung der Beschleunigungen wird eine Messbox des Typs Automotive Dynamic Motion Analyzer (ADMA) der Firma GeneSys verwendet. Diese ist speziell für die Messung von fahrdynamischen Versuchen im Bereich Automobil entwickelt worden und zeichnet neben den Beschleunigungen in allen drei Raumachsen auch die Geschwindigkeit und Position des Fahrzeugs auf.⁵³

Die ADMA wird hierzu an der in Fahrtrichtung vorne befindlichen Stirnwand der Ladefläche fest verschraubt. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Beschleunigungen der Ladefläche direkt zu messen.

Bei den Messfahrten wurden eine Stadtfahrt, eine Autobahnfahrt, mehrere Vollbremsfahrmanöver sowie weitere Fahrmanöver auf dem Flugplatz in Griesheim durchgeführt und ausgewertet. Im folgenden Abschnitt werden dabei die gemessenen vertikalen Beschleunigungen der Messfahrten analysiert und diskutiert. Zur besseren Darstellung und Erläuterung wird im Rahmen dieser Arbeit der Offset der Erdbeschleunigung von $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ aus den gemessenen vertikalen Beschleunigungen entfernt. Die vertikalen Beschleunigungen sind im Text sowie in den Abbildungen entsprechend zu betrachten.

Abbildung 3-1 zeigt die vertikale Beschleunigung bei der Messfahrt durch Darmstadt. Dabei wurden positive vertikale Beschleunigungsspitzen bis zu $\hat{a}_z = 8 \text{ m/s}^2$ sowie negative Beschleunigungsspitzen bis zu $\hat{a}_z = -7 \text{ m/s}^2$ gemessen. Dabei sind Einzelereignisse, wie Störungen durch den Zustand der Straße, nicht auszuschließen.

⁵³ GeneSys Elektronik GmbH: ADMA-Familie GNSS/Inertialsystem Automotive/Bahn (2019).

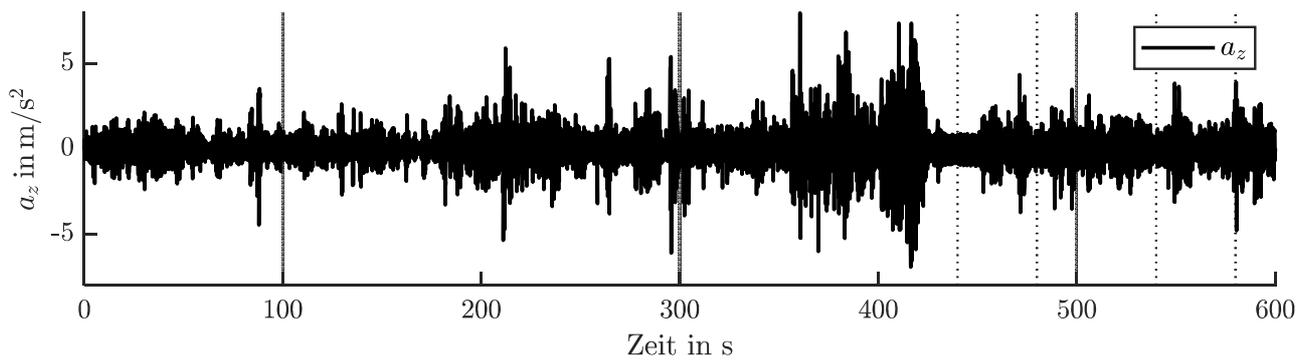


Abbildung 3-1 Ausschnitt der Messaufzeichnung der vertikalen Beschleunigung bei einer Stadtfahrt durch Darmstadt
 Die bei der Autobahnfahrt aufgezeichneten Beschleunigungsverläufe weisen geringere vertikale Beschleunigungsspitzen auf, als die der Stadtfahrt. Hier wurden Werte von maximal 4 m/s^2 und minimal -3 m/s^2 erreicht, was Abbildung 3-2 zu entnehmen ist. Unter Vernachlässigung der Beschleunigungsspitzen durch Einzelereignisse schwanken die gemessenen vertikalen Beschleunigungen mit Amplituden von ungefähr $1,5 \text{ m/s}^2$ um den Nullpunkt.

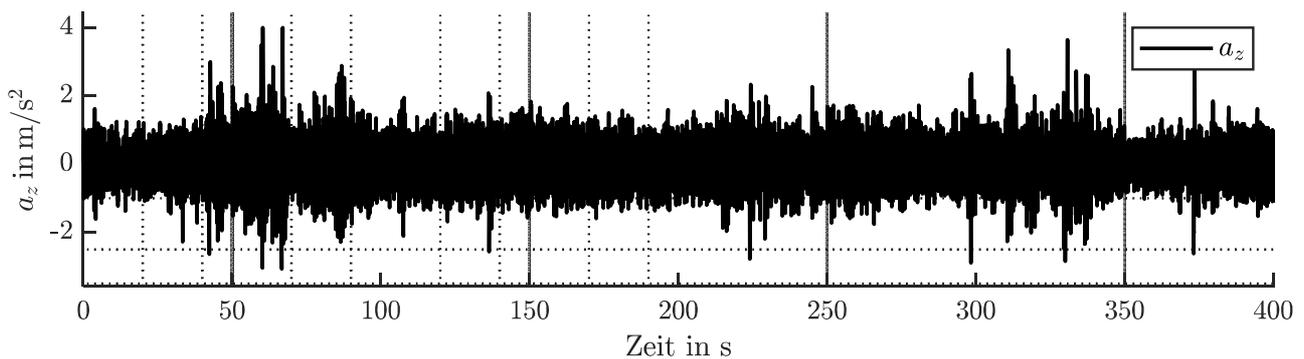


Abbildung 3-2 Ausschnitt der Messaufzeichnung der vertikalen Beschleunigung bei einer Autobahnfahrt
 Die Fahrversuche zur Untersuchung der vertikalen Beschleunigungen während Bremsmanövern werden auf der Start- und Landebahn des Flugplatzes in Griesheim durchgeführt. Dabei erfolgt eine Vollbremsung des Lkw bis zum Stillstand mit den Ausgangsgeschwindigkeiten 40 km/h , 60 km/h und 80 km/h . Bei allen betrachteten Ausgangsgeschwindigkeiten wurde eine abklingende Schwingung der vertikalen Beschleunigung beobachtet. In Abbildung 3-3 sind die Verläufe vertikalen und horizontalen Beschleunigung über die Zeit für die Ausgangsgeschwindigkeit von 40 km/h dargestellt. Bei dieser Ausgangsgeschwindigkeit betragen die maximalen Beschleunigungsamplituden 3 m/s^2 entsprechend Markierung (1) und die Minimalen -2 m/s^2 (Markierung (2)). Bei zunehmenden Ausgangsgeschwindigkeiten wurde eine Tendenz der Beschleunigungsamplituden zu größeren Werten festgestellt.

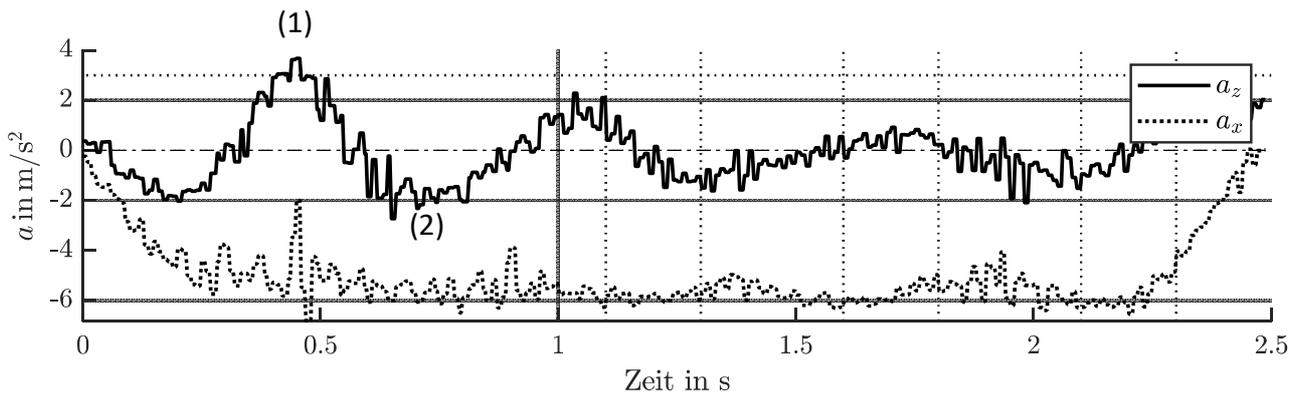


Abbildung 3-3 Beschleunigungsverlauf der vertikalen und longitudinalen Beschleunigung bei einer Vollbremsung aus 40 km/h

Bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 60 km/h wurden maximale vertikale Beschleunigungsamplituden von $+6 \text{ m/s}^2$ und -3 m/s^2 gemessen. Bei einer weiteren Steigerung der Ausgangsgeschwindigkeit auf 80 km/h wurden variierende vertikale Beschleunigungsamplituden festgestellt. Bei den insgesamt 15 durchgeführten Vollbremsmanövern mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 80 km/h betragen die maximalen positiven Beschleunigungsamplituden Werte zwischen $4,2 \text{ m/s}^2$ und 10 m/s^2 und die maximalen negativen Beschleunigungsamplituden Werte von $-1,5 \text{ m/s}^2$ bis $-5,9 \text{ m/s}^2$. Bleiben Ausreiser unberücksichtigt, so lag das arithmetische Mittel der negativen vertikalen Beschleunigung bei $-3,35 \text{ m/s}^2$.

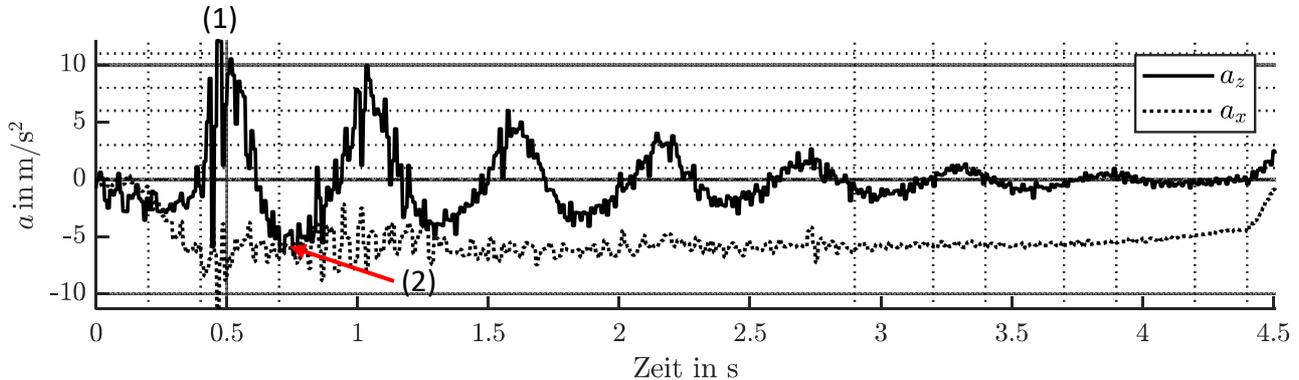


Abbildung 3-4 Beschleunigungsverlauf der vertikalen Beschleunigung a_z und der longitudinalen Beschleunigung a_x bei einer Vollbremsung aus 80 km/h

Abbildung 3-4 zeigt den Beschleunigungsverlauf bei einer Vollbremsung mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 80 km/h. Bei dieser Vollbremsung kam es zum geringsten Wert der negativen Beschleunigungsamplitude von weniger als $-5,5 \text{ m/s}^2$ (Markierung 2) und einer maximalen positiven Beschleunigungsamplitude von über 10 m/s^2 (Markierung 1).

Unabhängig von der Ausgangsgeschwindigkeit wurde stets ein abklingendes Schwingungsverhalten der vertikalen Beschleunigung mit einer Frequenz von im Mittel $1,9 \text{ Hz}$ beobachtet. Schwingungen

im Frequenzbereich zwischen 1-2 Hz sind sogenannte Aufbauschwingungen, die durch Fahr-
bahnunebenheiten angeregt werden⁵⁴.

Aus den Fahrversuchen der Stadtfahrt, der Autobahnfahrt und den Vollbremsmanövern folgt, dass negative vertikale Beschleunigung mit Amplituden von weniger als -5 m/s^2 auftreten können. Bei den Vollbremsmanövern wurde eine abklingende Beschleunigungsschwingung mit der Frequenz der Aufbauschwingung gemessen. Das arithmetische Mittel der negativen Beschleunigungsamplituden von $-3,35 \text{ m/s}^2$ entspricht einer Reduktion der wirkenden vertikalen Beschleunigung auf $a_z = 6,46 \text{ m/s}^2$, was einer prozentualen Verminderung um 34 % der Erdbeschleunigung g entspricht. Die beobachteten vertikalen Beschleunigungsschwingungen bei dem Fahrmanöver Vollbremsung sind zukünftig hinsichtlich des Fahrzeugtyps, der Fahrbahnunebenheiten, der Ausgangsgeschwindigkeit, der Beladung sowie weiteren Faktoren zu untersuchen. Dadurch besteht die Möglichkeit die festgestellten Variationen in den Beschleunigungsamplituden entsprechend der Ursache zuzuordnen.

Da es sich bei den Fahrmanövern wie beispielsweise der Vollbremsung um Worst-Case Szenarien in Gefahrensituationen handelt, wird für die Erstellung der Anregungsprofile des HULK eine negative Beschleunigungsamplitude von -4 m/s^2 angestrebt. Außerdem besteht die Forderung, auch das beobachtete abklingende Schwingungsverhalten durch den Prüfstand abzubilden.

3.2 Anpassungen der vertikalen Anregung des HULK

In Abschnitt 2.5.2 wurde bereits gezeigt, dass eine mehrfache vertikale Anregung mit dem betrachteten Prüfstands Aufbau nicht ohne Anpassungen umsetzbar ist. Zusätzlich wurde erläutert, dass der Doppel-T-Träger (Anregungsträger) sich beim Überfahren der Anregungsprofile in Richtung Hallenboden wegdrückt bzw. durchbiegt.

Anpassung des Anregungsträgers

Der Anregungsträger ist in der Ausgangskonfiguration mit 4 Klemmpratzen und je vier T-Nutenschrauben an zwei T-Nutenschienen am Hallenboden befestigt. Die beiden T-Nutenschienen sind dabei in das Fundament des Hallenbodens eingelassen. Zur Ausrichtung der Anregungsträger in der Höhe sind diese an Befestigungspunkten so unterbaut, dass sie parallel zu den Fahrschienen und somit parallel zu dem Prüfschlitten verlaufen. Durch diese Unterbauung sowie durch Unebenheiten des Hallenbodens liegen die Anregungsträger nicht flächig auf. Bei Wirken einer Normalkraft auf den Träger an diesen Stellen biegt sich dieser durch. Um die Durchbiegung zu reduzieren wurden mehrere Ausgleichsbleche angefertigt, die die Abstände zwischen Anregungsträger und Hallenboden schließen. Dadurch werden die Anregungsträger beim Überfahren der Laufräder in ihrer Bewegung nach unten gehindert, sodass die Anregungsprofile ordnungsgemäß überfahren werden.

In einem zweiten Schritt wurde die Ausrichtung der beiden Anregungsträger in horizontaler Fahr-
richtung des Prüfstands überprüft. Dazu wurden die Seilzugsensoren, die für die Regelung der Hö-

⁵⁴ Schaefer, N.: Diss., Ermittlung auftretender Fahrzeugschwingungen bei Nutzfahrzeugen (1983).

hennivellierung vorgesehen sind, ausgewertet. Aus der Auswertung ging hervor, dass eine Phasenverschiebung in der Anregungsphase der beiden Laufräder bestand. Durch eine Neuausrichtung der Anregungsträger wurde der festgestellte Phasenversatz beseitigt, sodass eine gleichzeitige Anregung durch die Laufräder erfolgt.

Anpassung der Anregungsprofile

Um die in Abschnitt 3.1 festgestellten Beschleunigungsamplituden des Fahrmanövers Vollbremsung am HULK umzusetzen, wird eine Analyse der Anregungsprofile durchgeführt. Durch die vorherigen Arbeiten stehen bereits die beiden Profile 1 und 2 zur Einfachanregung zur Verfügung und sind Tabelle 2 näher spezifiziert. Die Analyse des ungefilterten Signals der vertikalen Beschleunigung a_z des Prüftisches zeigte beim Überfahren der Anregungsprofile positive Amplituden bis zu 17 m/s^2 für Profil 1 sowie bis zu 35 m/s^2 für Profil 2⁵⁵. Da für die Auswirkungen der positiven vertikalen Beschleunigungsspitzen auf die Ladeeinheiten keine Untersuchungsergebnisse vorliegen und unerwünschte Störeffekte zu unterbinden sind, sind diese Beschleunigungsspitzen während der Anregungsphase zu reduzieren. Dazu wurden zwei neue modifizierte Profile (Profil 3 und 4) angefertigt. Bei diesen beiden Anregungsprofilen beträgt die Länge der Anregungsrampe 100 mm statt 50 mm der Ausgangsvariante, siehe Tabelle 2. Die technischen Zeichnungen der Anregungsprofile 3 und 4 sind im Anhang A1.1 bzw. A1.2 zu finden.

Tabelle 2 Übersicht der Anregungsprofile

Anregungsprofil	Rampenhöhe in mm	Länge der Rampe in mm	Rampenwinkel in °
Profil 1	5	50	5,7
Profil 2	10	50	11,3
Profil 3	5	100	2,9
Profil 4	10	100	5,7

Aus der experimentellen Erprobung der neuen Anregungsprofile mit verlängerter Anregungsrampe ging hervor, dass die positiven Beschleunigungsspitzen bei einer Rampenhöhe von 10 mm von 35 m/s^2 auf 19 m/s^2 reduziert wurden. Bei einer Rampenhöhe von 5 mm wurde eine Reduzierung der Beschleunigungsspitzen von 17 m/s^2 auf 10 m/s^2 durch die Verlängerung der Anregungsrampe erreicht. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Fahrversuche aus Abschnitt 3.1 zeigt, dass mit Profil 3 eine gute Näherung zu den darin gemessenen positiven vertikalen Beschleunigungsamplituden erreicht wird.

Durch den verkleinerten Rampenwinkel sowie die längere Rampe des Profils 3 ergibt sich an den vorderen 20 mm der Rampe eine Materialdicke kleiner 1 mm. Da die Anregungsprofile spanend hergestellt werden, ist das Profil 3 bereits an der Grenze Fertigbarkeit mit den am Lehrstuhl ge-

⁵⁵ Die ermittelten Beschleunigungsspitzen wurden bei einer fixierten Ladung mit der Masse von 585 kg ermittelt. Das Offset der Erdbeschleunigung g wurde analog zu den bisherigen Betrachtungen entfernt.

benen Möglichkeiten⁵⁶. Eine weitere Reduzierung des Rampenwinkels bei einer Profilhöhe von 5 mm wird daher nicht weiterverfolgt.

Umbau des Anregungskonzepts

Durch die Verwendung von Profil 3 wurde die Beschleunigungsspitze durch die Anregung bereits reduziert. Wie auch bei den Profilen 1 und 2 wurde ein Abheben vom Anregungsträger des Laufrads beim Überfahren des Anregungsprofils beobachtet, wie in Abschnitt 2.5.2 beschrieben. Beim Wiederauftreffen des Laufrads auf den Anregungsträger wird der Prüftisch, einschließlich darauf befindlicher Ladung, stoßartig in seiner vertikalen Bewegung abgebremst⁵⁷. Dieses Auftreffen des Laufrades führt zu Spitzen im vertikalen Beschleunigungsverlauf, welche in Abbildung 3-5 markiert sind. Die erste Amplitude (1) entspricht der Anregung durch das Überfahren des Anregungsprofils. Die Amplituden (2) bis (5) sind dagegen auf das stoßartige Wiederauftreffen des Laufrades auf den Anregungsträger zurückzuführen. Da, wie bereits erläutert, keine Erfahrungen über die Auswirkungen von Beschleunigungsspitzen auf die Ladung vorliegen, besteht auch hier die Forderung, diese Beschleunigungsspitzen zu reduzieren.

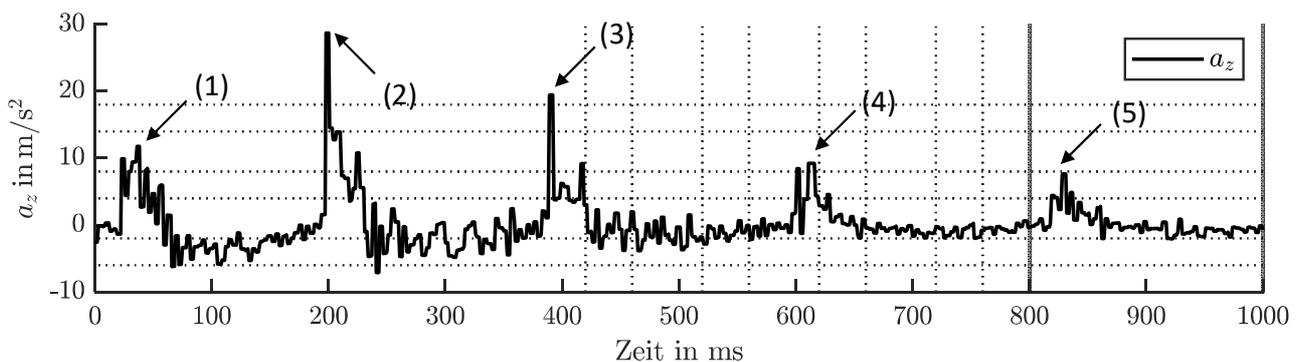


Abbildung 3-5 Auswirkungen der vertikalen Beschleunigung beim Auftreffen auf den Anregungsträger (Anregungsprofil 3)

Mit dem bisher dargestellten vertikalen Anregungskonzept des Prüftisches lässt sich das Auftreffen des Laufrades auf den Anregungsträger nicht vermeiden, wodurch die beschriebenen Beschleunigungsspitzen entstehen. Aus diesem Grund wird das bisherige Anregungskonzept abgeändert, um der Forderung nach einer Reduzierung der vertikalen Beschleunigungsspitzen nachzukommen.

Die überarbeitete Anregung ist in Abbildung 3-6 dargestellt. Bei der überarbeiteten Anregung wird der Prüftisch pro Prüffahrt nur einmalig durch eine Rampe vertikal angeregt. Der Anregungsträger wird unmittelbar nach dem Anregungsprofil so eingekürzt, dass das Laufrad nach dem Abheben an der Rampe nicht mehr auf den Anregungsträger auftrifft. Dadurch werden die vertikalen Beschleunigungsspitzen reduziert. Die Dämpfung der Federbälge bewirkt ein Abklingen der Schwingung des Prüftisches.

⁵⁶ Nach Rücksprache mit dem Werkstattmeister Herr Korndörfer ist eine weitere Reduzierung der Materialdicke nicht in einem vertretbaren Aufwand zu fertigen.

⁵⁷ Das Laufrad ist starr mit dem Prüftisch verschraubt

Um den Anregungsträger auch weiterhin mit den Klemmpratten am Hallenboden zu verschrauben, verbleibt der untere Teil des T-Trägers bestehen, sodass das Laufrades in seiner vertikalen Bewegung nach der Anregung nicht gehindert wird (siehe Abbildung 3-6).

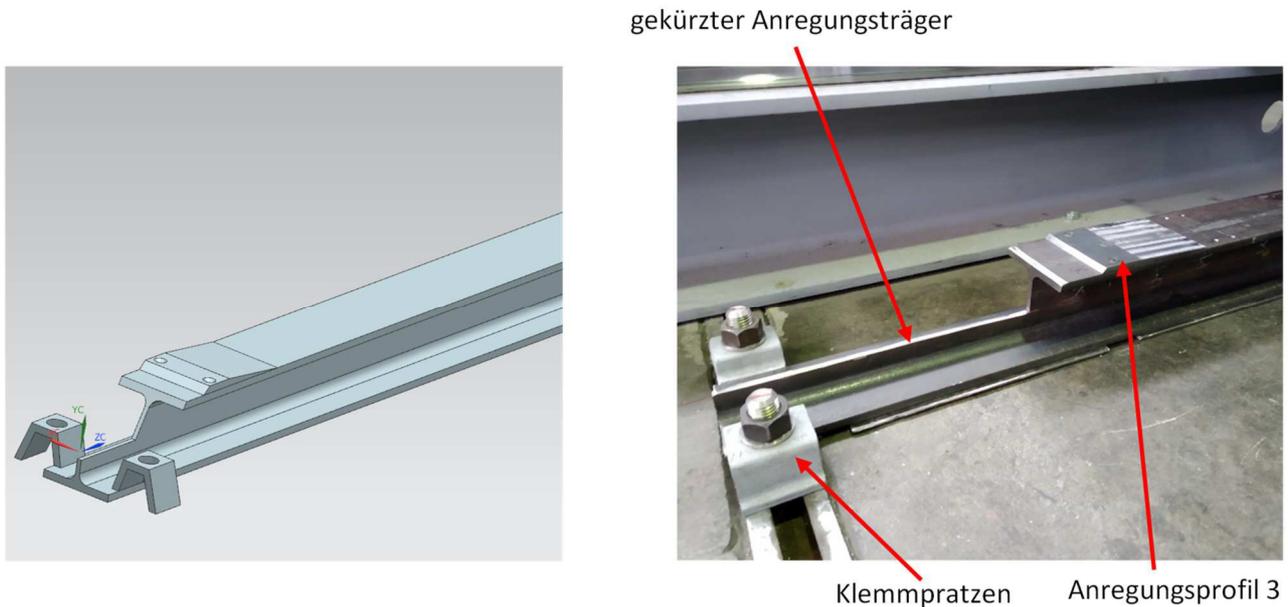


Abbildung 3-6 CAD Modell (links) und Umsetzung (rechts) des überarbeiteten Anregungsträgers

In Abbildung 3-7 ist der vertikale Beschleunigungsverlauf des Prüftisch beim Überfahren des Anregungsprofils (1) nach dem Umbau entsprechen dem zuvor beschriebenen Konzept dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Beschleunigungsspitzen (2) bis (5) aus Abbildung 3-5 durch das Wiederauftreffen des Laufrads auf dem Anregungsträger nicht mehr auftreten. Nur die bereits reduzierte Anregungsspitze (1) durch das Überfahren des Anregungsprofils ist noch vorhanden.

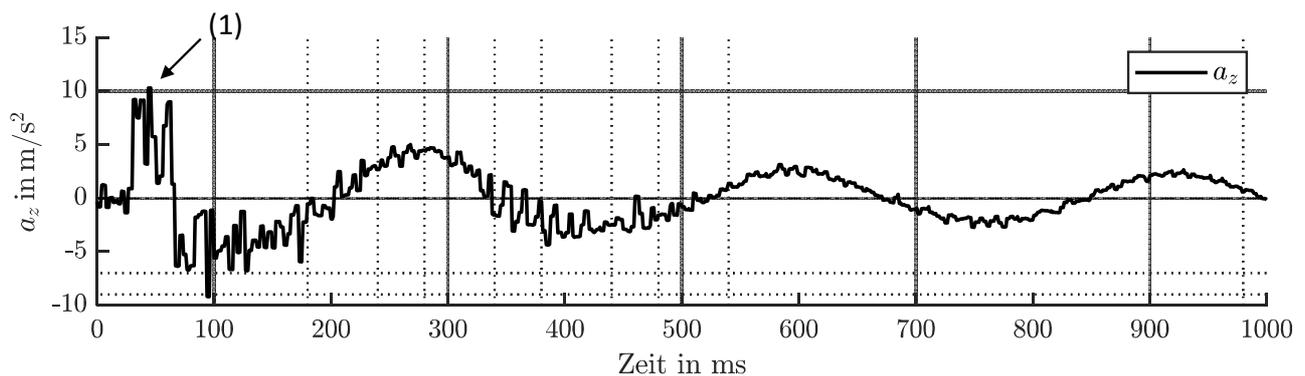


Abbildung 3-7 Vertikale Beschleunigung mit überarbeitetem Anregungsträger

Durch die Umsetzung des neuen Konzepts wird die formulierten Forderungen erfüllt. Für weitere Optimierungsvorhaben sind die Anregungsprofile bzw. das Anregungskonzept so umzugestalten, dass deren Fertigbarkeit verbessert wird.

3.3 Beschleunigungsverlauf HULK

Im folgenden Abschnitt wird der vertikale und horizontale Beschleunigungsverlauf des Prüfstands näher betrachtet. Hierbei wird auf die relevanten Kenngrößen eingegangen sowie ein Vergleich zwischen den am Prüfstand darstellbaren Beschleunigungen und der bei dem Lkw-Fahrmanöver Vollbremsung gemessenen Beschleunigungen durchgeführt.

In Abbildung 3-8 sind die beiden Beschleunigungsverläufe einer Versuchsfahrt des Prüftisches dargestellt. Bei der Betrachtung des horizontalen Beschleunigungsverlaufs wird dort zunächst der Prüftisch auf seine maximale Geschwindigkeit beschleunigt (siehe Markierung (I)). Diese Beschleunigung dient nicht zur Prüfung des Ladungssicherungssystems, sondern ausschließlich dazu, die zur Prüfung erforderliche Geschwindigkeit des Prüftisches aufzubauen. Aus diesem Grund ist diese Beschleunigung betragsmäßig zu minimieren bzw. die Ladung entsprechend so abzusichern, dass die Beschleunigungsphase keine negativen Auswirkungen auf die Ladung hat wie beispielsweise Setzungserscheinungen bei Schüttgut. Nach der Beschleunigungsphase erfolgt der Aufbau der Prüfbeschleunigung (II). Diese Phase wird auch als Beschleunigungsgradient oder „Ruck“ bezeichnet. Der Beschleunigungsgradient gibt dabei die Änderung der Beschleunigung pro Zeiteinheit an. Untersuchungen mit Fahrversuchen und Simulationen nach Klonecki haben gezeigt, dass der über die Zeit gemittelte Gradient der Beschleunigung bei dem Fahrmanöver Vollbremsung bei ca. 30 m/s^3 lag⁵⁸. Auch eine Auswertung der Fahrversuche mit dem Fahrmanöver Vollbremsung aus Abschnitt 3.1 bestätigt dieses Ergebnis. Die dabei festgestellten Gradienten der Beschleunigung lagen zwischen 25 m/s^3 und 35 m/s^3 . Dagegen wird, wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt, in der Richtlinie EUMOS 40509 ein Erreichen der Prüfbeschleunigung in 50 ms gefordert⁵⁹, was einem Beschleunigungsgradienten von 157 m/s^3 bei einer Prüfverzögerung von $7,85 \text{ m/s}^2$ entspricht. Da zu den Einflüssen des Beschleunigungsgradienten keine empirischen Studien vorliegen und die Forderung der EUMOS Richtlinie unbegründet bleibt^{58, 59}, wird im Rahmen dieser Arbeit angestrebt, einen Beschleunigungsgradienten von 30 m/s^3 beim Erreichen der Prüfbeschleunigung zu erzielen.

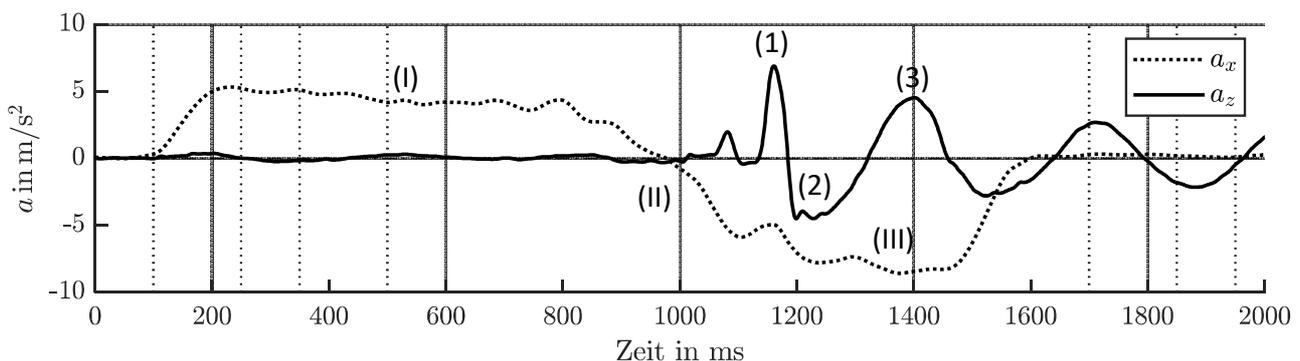


Abbildung 3-8 Beschleunigungsverlauf des Prüftisches mit relevanten Kenngrößen

Markierung (III) in Abbildung 3-8 zeigt die Verzögerungsphase des Prüfschlittens mit der Prüfbeschleunigung. Als Folge des festgestellten Schwingungsverhaltens bei dem Fahrmanöver Vollbrem-

⁵⁸ Kamil, K.: Diss., Entw. einer Prüf- & Bewertungsmeth. für LaSiSysteme (2017), S. 68–69.

⁵⁹ EUMOS: EUMOS 40509 - Test method for unit rigidity (2012), S. 5.

sung (siehe Abschnitt 3.1) besteht die Forderung, die Untersuchungen der Auswirkung von vertikalen Anregungen am Prüfstand ebenfalls mit der in DIN 12195-1 geforderten Prüfverzögerung des Fahrmanövers von $7,85 \text{ m/s}^2$ durchzuführen. Außerdem wird in der EUMOS 40509 eine Einwirkzeit von mindestens 300 ms für die zu prüfende Beschleunigung vorausgesetzt⁵⁹.

In Abbildung 3-8 ist neben der horizontalen Beschleunigung auch der vertikale Beschleunigungsverlauf dargestellt. Markierung (1) stellt dabei die vertikale Anregung durch das Überfahren des Anregungsprofils 3 dar. Nach der Anregung erreicht die vertikale Beschleunigung eine negative Amplitude, was durch die Entfernung des Offsets einer Verminderung der wirkenden Erdbeschleunigung g entspricht. Markierung (3) zeigt analog zu Markierung (2) eine Erhöhung der wirkenden Erdbeschleunigung g durch die positive Amplitude in der vertikalen Beschleunigung. Außerdem ist zu erkennen, dass sowohl die erhöhte als auch die verminderte Erdbeschleunigung in der Phase der maximalen Verzögerung liegen.

Zur besseren Darstellung und Veranschaulichung der vertikalen Bewegung des Prüftisches und der damit verbundenen vertikalen Beschleunigung sind in Abbildung 3-9 ein Ausschnitt der beiden Verläufe der Größen über der Zeit zum Zeitpunkt der vertikalen Anregung dargestellt. Die vertikale Bewegung wird dabei über die Auswertung der Seilzugsensoren, die zur Niveauregelung des Prüftisches genutzt werden, erfasst. Wird der vertikale Weg als harmonische Sinusschwingung $w_z(t)$ mit der Zeit τ , der Kreisfrequenz ω und der Wegamplitude \hat{w}_z betrachtet,

$$w_z(\tau) = \hat{w}_z \cdot \sin(\omega \cdot \tau) \quad (3-1)$$

dann ergibt sich der Beschleunigungsverlauf durch die zweifache zeitliche Ableitung des vertikalen Weges mit der Amplitude der Beschleunigung $\hat{a}_z = -w_z \cdot \omega^2$:

$$a_z(\tau) = -w_z \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot \tau) \quad (3-2)$$

Aufgrund der sinusförmigen Verläufe ohne Phasenverschiebung erfolgen die Nulldurchgänge der beiden Signale jeweils zur gleichen Zeit. Außerdem weisen dadurch die beiden Verläufe ein umgekehrtes Vorzeichen auf. Ein Vergleich der Amplituden des vertikalen Weges und der Beschleunigung ermöglicht das Beschleunigungssignal zu plausibilisieren. Mit der Frequenz der beiden Schwingung von ca. $f = 3,5 \text{ Hz}$ ergibt sich die Beschleunigungsamplitude über:

$$\hat{a}_z = -\hat{w}_z \cdot \omega^2 \quad (3-3)$$

Wird beispielsweise die Amplitude des vertikalen Weges bei $\tau = 270 \text{ ms}$ mit $\hat{w}_z = -9,4 \text{ mm}$ betrachtet, ergibt sich entsprechend der Formel (3-3) eine vertikale Amplitude von $\hat{a}_z = 4,54 \text{ m/s}^2$ (gemessen $\hat{a}_z = 4,7 \text{ m/s}^2$). Somit sind die Werte für die vertikale Beschleunigung des Prüftisches plausibel.

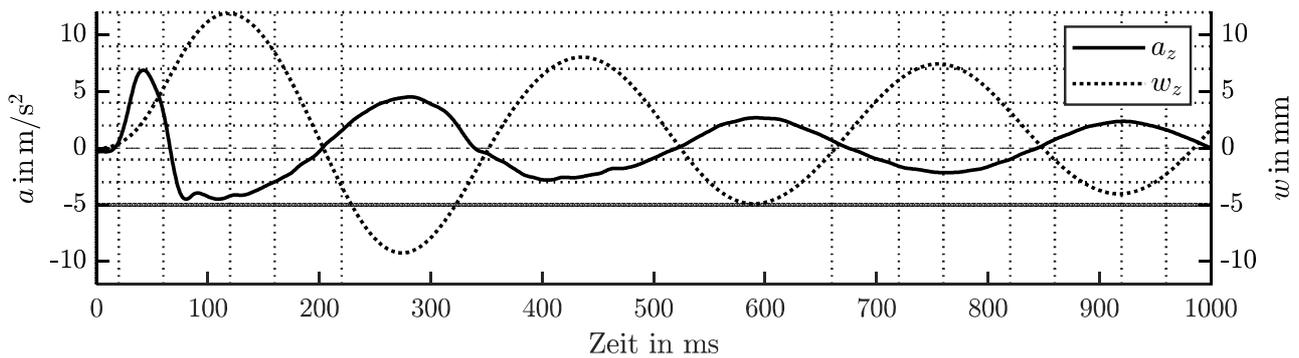


Abbildung 3-9 Vergleich des vertikalen Weges w_z und des vertikalen Beschleunigungsverlaufs a_z

Das Zustandekommen der Verläufe in Abbildung 3-9 lässt sich mit der Mechanik des Prüftisches erklären. Während des Überfahrens (pos. Amplitude \hat{a}_z) des Anregungsprofils wird der Prüftisch zunächst nach oben beschleunigt. Danach wird durch die Federkraft der Luftbälge der Prüftisch abgebremst und in Richtung Hallenboden beschleunigt (neg. Amplitude \hat{a}_z). Nach dem Nulldurchgang der vertikalen Beschleunigung wird der Prüftisch erneut von der Federkraft der Luftbälge in seiner Abwärtsbewegung abgebremst und wieder nach oben beschleunigt. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis durch die Dämpfung der Federbälge die vertikale Bewegung zum Stillstand kommt.

Vergleich Prüfstand/Fahrversuche

Durch den Umbau des Anregungskonzepts des Prüfstands schwingen die vertikalen Beschleunigungsverläufe mit abklingender Amplitude. Dieses Verhalten ist ähnlich dem der vertikalen Beschleunigungsverläufe der Vollbremsmanöver aus Abschnitt 3.1, was anzustreben ist. Unterschiede herrschen hier in den gemessenen Frequenzen der Schwingungen. Im Fahrversuch liegen diese bei 1,9 Hz, wohingegen die des Prüfstands ca. 3,5 Hz betragen. Durch die höhere Schwingungsfrequenz des Prüftisches sind die Phasen einer erhöht bzw. vermindert wirkenden Erdbeschleunigung kürzer im Vergleich zu den Fahrversuchen, wodurch die Phasen einer verminderten Reibkraft ebenfalls kürzer ausfallen.

Durch die Reduzierung der Beschleunigungsspitzen in den positiven vertikalen Amplituden stellt dieser Teil des vertikalen Beschleunigungsverlaufs eine gute Näherung an die bei den Fahrversuchen festgestellten maximalen positiven Amplituden dar. Die Verzögerungsphase des Prüfstandes ist aufgrund seiner begrenzten Baugröße mit etwa 300 ms kürzer als die gemessene Verzögerungsphase bei den Fahrversuchen. Dennoch wird in der Phase der maximalen Verzögerung eine vollständige vertikale Schwingungsperiode durchlaufen, was Abbildung 3-8 zu entnehmen ist.

3.4 Klassifizierung von Ladeeinheiten

Ziel der Klassifizierung von Ladeeinheiten (LE) ist es, die Anzahl der zu untersuchenden Ladeeinheiten zu reduzieren bzw. einzugrenzen, jedoch gleichzeitig möglichst viele Rückschlüsse auf andere Ladeeinheiten mit ähnlichen Eigenschaften zu ziehen. Dazu wird zunächst der Aufbau mit den einzelnen Komponenten einer Ladeeinheit betrachtet, welcher in Abbildung 3-10 schematisch dargestellt ist.

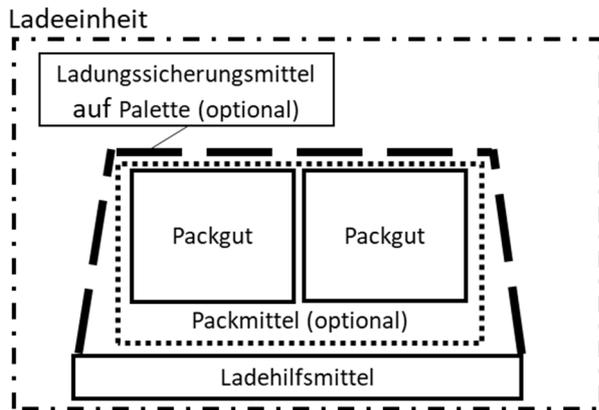


Abbildung 3-10 Aufbau und Komponenten einer Ladeeinheit⁶⁰

Eine Ladeeinheit besteht in der Regel aus einem oder mehreren Packgütern (Stückgut, Schüttgut, Flüssigkeit oder Gas). Die Packgüter sind durch eine geeignete Wahl von weiteren Komponenten so zu einer Ladeeinheit zusammenzufassen, sodass die Handhabungsvorgänge Transport und Lagerung gewährleistet sind.^{60, 61}

Außerdem besteht die Möglichkeit, die Packgüter unter der Verwendung von Packmitteln, wie z.B. Kartonagen zu verpacken oder zu umhüllen⁶². Ein weiterer Bestandteil der LE sind die Ladehilfsmittel (LHM). Diese lassen sich wiederum nach ihrer Funktion in tragende, umschließende sowie abschließende Ladehilfsmittel unterteilen⁶⁰, siehe Tabelle 3. Jede Untergliederung stellt dabei nochmal eine eigene Produktgruppe dar.

⁶⁰ Hompel, M. ten; Heidenblut, V.: Taschenlexikon Logistik (2011), S. 164–165.

⁶¹ DIN: DIN 30781-1, S. 1–2.

⁶² DR. THOMAS + PARTNER GmbH & Co. KG: Packmittel - Logistik KNOWHOW (2013).

Tabelle 3 Ladehilfsmittel unterteilt nach ihrer Funktion⁶³

Ladehilfsmittel	Untergliederung
tragende	Einweg Paletten
	Mehrweg Paletten
umschließende	Gitterboxen
	Holzaufsetzrahmen
	Cargoboxen
	Behälter
	Palettenboxen
abschließende	Intermediate Bulk Container
	Fässer
	Kanister
	Big Bags

Um die Packgüter auf den Ladehilfsmitteln zu sichern, besteht die Möglichkeit unterschiedliche Ladungssicherungen zu verwenden, siehe Tabelle 4. Diese sind nicht mit der Ladungssicherung auf der Ladefläche zu verwechseln, sondern dienen vielmehr dazu, die Packgüter auf den Ladehilfsmitteln zu sichern.

Tabelle 4 Ladungssicherung von Packgütern⁶³

Bezeichnung	Untergliederung
Umreifungsbänder	-
Folien	Schrumpffolien
	Stretchfolien
Hilfsmittel	Antirutschpapier
	Antirutschmatten
	Kantenschutzwinkel

Aus der Anzahl der einzelnen Komponenten einer Ladeinheit sowie zusammen mit deren jeweiligen Kombinationsmöglichkeiten folgt, dass durch den zeitlich begrenzten Umfang der Arbeit nur eine Überprüfung von ausgewählten Ladeeinheiten zur Identifizierung der Auswirkung von vertikalen Anregungen möglich ist. Deshalb wird eine Klassifizierung anhand der Verformbarkeit der Ladeeinheiten vorgenommen. Die Ladeeinheiten werden hierzu unterschieden in:

- starre Ladeeinheiten
- flexible Ladeeinheiten

⁶³ Hompel, M. ten; Heidenblut, V.: Taschenlexikon Logistik (2011).

Als starre Ladeeinheiten werden diejenigen Ladeeinheiten bezeichnet, bei denen keine bzw. nur eine geringe äußere Verformung durch die Prüfbeschleunigung und damit verbundene Trägheitskräfte zu erwarten ist. Dazu gehören zum einen Packgüter in umschließenden Ladehilfsmitteln, wie beispielsweise Gitterboxen oder Cargoboxen und zum anderen starre Packgüter, die auf tragenden Ladehilfsmitteln fixiert sind. Durch die Fixierung wird eine Bewegung der Packgüter auf dem Ladehilfsmittel unterbunden. Als flexible Ladeeinheiten werden Ladeeinheiten bezeichnet, bei denen aufgrund der Prüfbeschleunigung flexibles oder plastisches Verhalten zu erwarten ist. Dazu gehören beispielsweise Ladegüter, die durch Folien gesichert sind.

Eine Zuordnung in eine der beiden Klassen ist meistens nicht eindeutig möglich, dennoch bietet die Klassifizierung eine Grundlage für die Untersuchung der Auswirkungen von vertikalen Anregungen. Besonders die starre Ladeeinheiten bieten dabei die Möglichkeit, grundlegende Untersuchungen durchzuführen, da der zusätzliche Freiheitsgrad der Verformung unberücksichtigt bleibt bzw. nicht auftritt. Unter der Annahme, dass die Verzögerungsprüfung zu keiner Veränderung der Form und Eigenschaften der Ladeeinheit führt, lassen sich Rückschlüsse auf die verwendete Sicherungstechnik ziehen. Eine Verzögerungsprüfung von flexiblen Ladeeinheiten dagegen gibt Rückschlüsse über die Ladeeinheit selbst bzw. deren Kombination mit der verwendeten Ladungssicherungstechnik. Außerdem haben Versuche mit flexiblen Ladeeinheiten in bisherigen Untersuchungen gezeigt, dass sich diese für Versuchsreihen nicht eignen, da durch die unterschiedlichen Verformungen bei den Versuchen keine ausreichende Reproduzierbarkeit gegeben ist⁶⁴.

Für die Untersuchung der Auswirkungen von vertikalen Anregungen auf die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Sicherungstechniken wird deshalb eine starre Ladeeinheit verwendet. Weitere im Anschluss durchgeführte Prüfungen ausgewählter Ladeeinheiten bieten die Möglichkeit, auch das Verhalten der Ladeeinheiten selbst zu untersuchen.

3.5 Research Cargo Unit

Die geschilderte Klassifizierung der verschiedenen Ladeeinheiten zeigt, dass die Kombinationsmöglichkeiten von Ladegütern, Ladehilfsmitteln und Sicherungsmitteln vielfältig sind. Wie bereits erläutert, eignet sich für die Untersuchung der betrachteten Sicherungstechniken eine starre Ladeeinheit, um die grundlegenden Einflüsse durch experimentelle Versuche zu erarbeiten. Hierzu wird eine starre Ladeeinheiten benötigt, die es ermöglicht mehrere Versuchsreihen mit mehreren Einzelversuchen ohne eine unkontrollierte Veränderung ihrer Eigenschaften, durchzuführen.

Deshalb wird eine Ladeeinheit zu Forschungszwecken konzipiert, entwickelt und anschließend gefertigt, die im Rahmen dieser Arbeit als Research Cargo Unit (RCU) bezeichnet wird. Ziel der RCU ist es, möglichst viele Eigenschaften von starren Ladeeinheiten abzubilden. Es besteht die Forderung, die Eigenschaften der RCU gezielt anzupassen und somit als Stellvertreter für unterschiedliche starre Ladeeinheiten zu dienen. Darüber hinaus sind die betrachteten Sicherungstechniken so-

⁶⁴ Expertengespräch mit Betreuer Maximilian Herold sowie aus eigenen Erfahrungen im Rahmen von Versuchen mit BigBags zur Einarbeitung in die Bedienung des HULK

wie ein einfaches Handling der RCU auf dem Prüfstand zu berücksichtigen. Deshalb wird zunächst eine Anforderungsliste (Tabelle 5) erstellt, um die geforderten Ziele zu konkretisieren.

Tabelle 5 Anforderungsliste Konzeptionierung und Konstruktion Research Cargo Unit

Professor Dr. rer. nat. Hermann Winner Institut für Fahrzeugtechnik		Anforderungsliste Konzeptionierung und Konstruktion der Research Cargo Unit	Master Thesis	
Technische Universität Darmstadt			Matthias Müller	
Organisationsdaten		Anforderungen	Sollerfüllung	Einheit
Nummer	Art			
1		Eigenschaften		
1.1	F	Masse	400 - 1500	kg
1.2	F	Einstellbare Schwerpunkthöhe	500 – 1200	mm
1.3	F	Grundmaße LxB	1200 x 800	mm
1.4	F	Austauschbare Palettentypen		
1.5	F	Feste Verbindung mit Palette		
2		Sicherungstechniken		
2.1	F	Unterschiedliche Zurrhöhen Niederzurren		
2.2	W	Möglichkeit zum Direktzurren		
2.3	W	Anschlagpunkte zum Direktzurren		
2.4	W	Unterschiedliche Zurrhöhen Direktzurren		

Entsprechend der Anforderung 1.1 in Tabelle 5 ist die RCU so zu gestalten, dass die Masse im vorgegebenen Bereich variierbar ist. Dadurch besteht zum einen die Möglichkeit, unterschiedliche Ladeeinheiten zu vertreten und zum anderen erlaubt es eine Untersuchung der Auswirkungen von unterschiedlichen Massen. Zur Erstellung von Beschleunigungsprofilen für die Prüfung von flexiblen Ladeeinheiten auf dem HULK bietet die RCU die Möglichkeit, dies ohne eine Vorkonditionierung der zu prüfenden Ladeeinheit durchzuführen. Die Variation der Schwerpunkthöhe erlaubt es, die Kippeigenschaften der RCU im Zusammenhang mit der vertikalen Anregung zu untersuchen.

Als Grundfläche für die RCU werden die Maße einer Europalette mit 1200 mm x 800 mm gewählt. Zusätzlich besteht die Forderung nach der Austauschbarkeit der Palettentypen. Dadurch ist es möglich, den Einfluss von unterschiedlichen Palettentypen bei der Ladungssicherungsprüfung zu untersuchen sowie defekte oder verschlissene Paletten auszutauschen. Eine feste Verbindung zwischen RCU und der Palette ist vorzusehen.

Bezüglich den Sicherungstechniken besteht die Anforderung, dass das Niederzurren mit zwei unterschiedlichen Höhen umsetzbar ist. Um die RCU auch für zukünftige Untersuchungen verwenden zu können, sind zusätzlich die Anschlagpunkte zum Direktzurren zu berücksichtigen. Weiterhin besteht die Forderung einer einfachen Handhabung der RCU.

3.5.1 Umsetzung

In Abbildung 3-11 ist das CAD Modell der RCU dargestellt, welches die Grundlage zu deren Fertigung bildet.

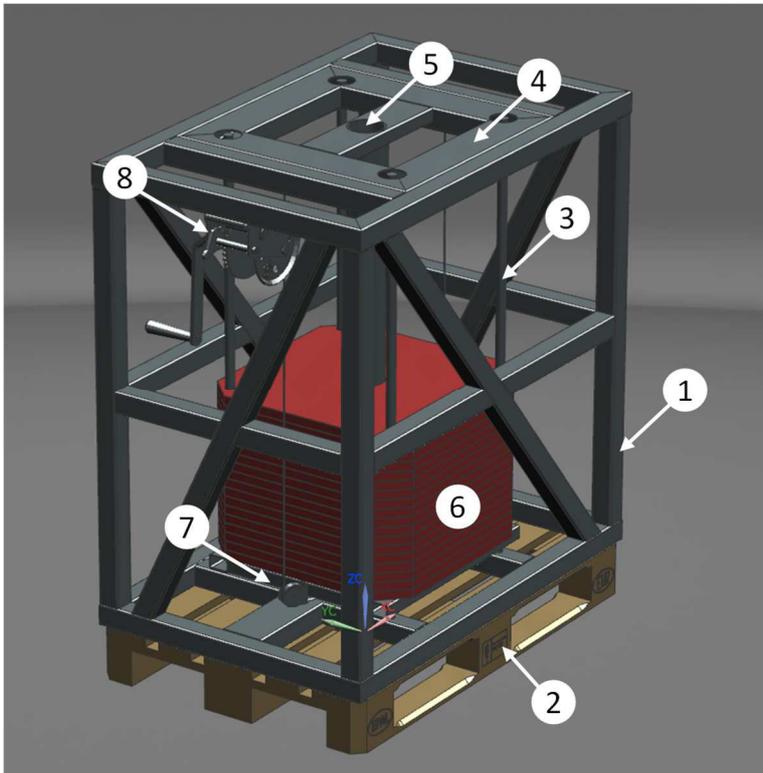


Abbildung 3-11 CAD Modell der RCU

Aufbauend auf der Grundfläche der Europalette (2) ist eine Fachwerkkonstruktion (1) aus Stahlbauhohlprofilen vorgesehen, sodass eine hohe Steifigkeit der Ladeeinheit erzielt wird. Die Europalette wird dabei mit der Fachwerkkonstruktion verschraubt. Um möglichen Durchbiegungen vorzubeugen, wird ein Rechteckrohr-Profil mit den Maßen 60 mm x 60 mm x 4 mm verwendet. Die Fachwerkkonstruktion wird dabei so gestaltet, dass zwei Zurrhöhen für das Niederzurren vorhanden sind. Zur Variation der Masse werden Gewichtsplatten (6) aus Stahl mit einem durchschnittlichen Gewicht von ca. 63 kg je Platte verwendet. Die Gewichtsplatten haben jeweils eine zentrale Bohrung mit einem Durchmesser von 100 mm sowie vier weitere Bohrungen im Bereich der Ecken von 32 mm. Dabei besteht die Möglichkeit einzelne Platten aus der RCU zu entnehmen bzw. hinzuzufügen. Hierzu ist auf der Oberseite der RCU ein abnehmbarer Deckel (4) angebracht, wodurch die Platten nach oben entnommen/ eingeführt werden können. Die Gewichtsplatten werden mit der zentralen Bohrung auf einem Führungsrohr (5) platziert, welches die horizontal wirkenden Kräfte bei der Ladungssicherungsprüfung aufnimmt. Dieses Führungsrohr ist zum einen unten mit dem Rahmen verschweißt und zum anderen wird es durch den Deckel an der Oberseite fixiert. Die vertikale Fixierung der Platten erfolgt durch vier Gewindestangen mit dem Gewindemaß M24 (3), die durch die vier Bohrungen der Platten verlaufen, sowie acht Schraubenmuttern. Das Führungsrohr bietet darüber hinaus die Möglichkeit die Platten vertikal in der Höhe zu verschieben. Um den

Schwerpunkt der RCU zu verstellen werden die Platten auf einem Plattenträger (7) angebracht, der ebenfalls auf dem Führungsrohr verschiebbar gelagert ist.

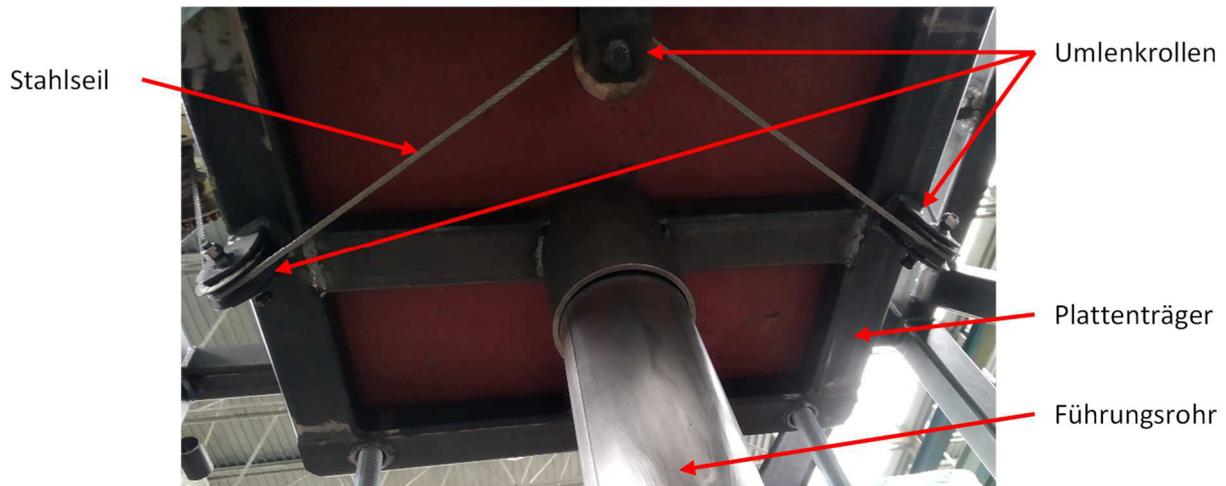


Abbildung 3-12 Plattenträger der RCU. Ansicht von unten.

Der Plattenträger lässt sich durch eine Seilwinde (8) in der Höhe verstellen. Hierzu verläuft ein Stahlseil ausgehend von der Seilwinde an der Oberseite der RCU zum Plattenträger. An diesem sind drei Umlenkrollen verbaut, sodass das Seil auf der Unterseite des Trägers umgelenkt wird und auf der Seilwinde abgewandten Seite wieder herausgeführt wird, was in Abbildung 3-12 zu sehen ist. Das Stahlseil wird anschließend in Richtung Oberseite der RCU geführt und dort am Rahmen fixiert. Durch die Seilwinde besteht somit die Möglichkeit den Plattenträger sowie die darauf aufliegenden Platten in der Höhe zu verstellen und damit den Schwerpunkt der RCU zu verstellen. In Abbildung 3-13 sind zwei unterschiedlich eingestellte Schwerpunkthöhen der RCU dargestellt.



Abbildung 3-13 Umsetzung Schwerpunktverstellung der RCU

Eckdaten RCU:

- Maße (L x B x H): 1200 mm x 800 mm x 1400 mm
- Masse: zwischen 398 kg und 1446 kg
- Zurrhöhen Niederzurren/Direktzurren: 772 mm & 1400 mm
- Einstellbare Schwerpunkthöhe
- Palettentypen: Beliebig austauschbar

3.5.2 Bestimmung des Schwerpunkts der RCU

Der Schwerpunkt der RCU wird experimentell ermittelt. Auf eine Berechnung durch das CAD Modell wird aufgrund von Anpassungen während der Aufbauphase und der im CAD-Modell nicht berücksichtigten Materialmassen wie beispielsweise Schweißnähten verzichtet. Im Folgenden wird die Messung und Berechnung der Schwerpunktlage der RCU im dreidimensionalen Raum erläutert.

Um den Schwerpunkt zu bestimmen, wird die RCU entsprechend Abbildung 3-14 an je zwei Anschlagpunkten (2) am oberen Rand des Rahmens aufgehängt, wovon sich der zweite Anschlagpunkt in der Zeichnungsebene befindet. Nach dem Anheben der RCU liegt Schwerpunkt (1) zusammen mit den beiden Anschlagpunkten (2) in yz-Ebene entsprechend dem Koordinatensystem in Abbildung 3-14. Dabei stellt sich der Winkel β'_1 zwischen der xy-Ebene und der oberen Kante der RCU ein. Dieser Winkel wird mit einem digitalen Winkelmesser gemessen und dokumentiert. Bei den gegenüberliegenden Anschlagpunkten (3) wird analog vorgegangen. Der genaue Versuchsaufbau zur Bestimmung des Schwerpunkts ist im Anhang A2.1 dokumentiert.

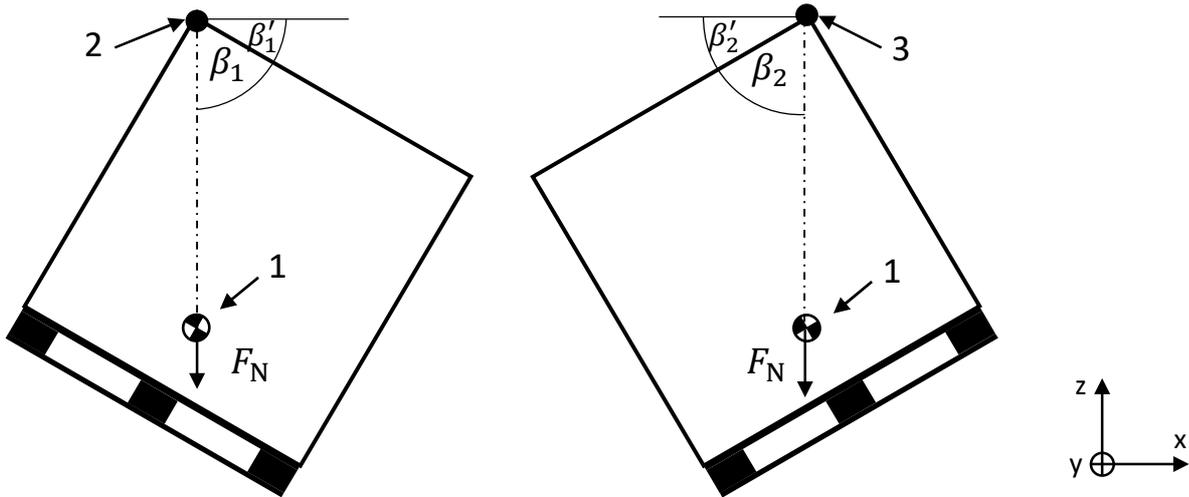


Abbildung 3-14 Bestimmung des Schwerpunkts der RCU. (1) Schwerpunkt; (2), (3) Anschlagpunkte

In Abbildung 3-15 ist die Konstruktion der Schwerpunktlage in der xz -Ebene des RCU festen Koordinatensystems dargestellt, die sich durch die Schnittpunkte der beiden Geraden g_1 und g_2 ergibt. Zur Vereinfachung wird für die folgenden Berechnungen der Winkel β_i verwendet, der sich über (3-4) berechnen lässt:

$$\beta_i = 90^\circ - \beta'_i \quad (3-4)$$

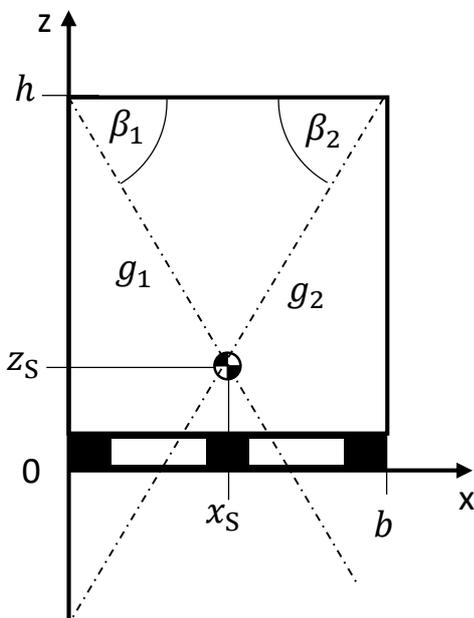


Abbildung 3-15 Konstruktion der Schwerpunktlage der RCU

Die Geradengleichung für Gerade g_1 ergibt sich dabei mit dem vertikalen Abstand h zwischen Anschlagpunkt (2) bzw. (3) und der Unterseite der RCU:

$$g_1(x) = -\tan(\beta_1) \cdot x + h \quad (3-5)$$

Die Geradengleichung der Geraden g_2 lässt sich mit der zu bestimmenden Konstante C aufstellen:

$$g_2(x) = \tan(\beta_2) \cdot x + C \quad (3-6)$$

Mit der Randbedingung $g_2(b) = h$ und dem horizontalen Abstand der beiden Anschlagpunkte b wird die Unbekannte C über bestimmt:

$$C = h - \tan(\beta_2) \cdot b \quad (3-7)$$

Somit lautet die Geradengleichung der Geraden g_2 :

$$g_2(x) = \tan(\alpha_2) \cdot (x - b) + h \quad (3-8)$$

Der Schnittpunkt der beiden Gerade g_1 und g_2 liefert anschließend die Schwerpunktlage x_S und z_S in der xz -Ebene des RCU festen Koordinatensystems in Abbildung 3-15. Damit ergibt sich ein Gleichungssystem aus zwei Gleichungen und zwei Unbekannten, woraus resultiert:

$$x_S = \frac{b}{1 + \frac{\tan(\alpha_1)}{\tan(\alpha_2)}} \quad (3-9)$$

$$z_S = -\frac{b \cdot \tan(\alpha_1)}{1 + \frac{\tan(\alpha_1)}{\tan(\alpha_2)}} + h \quad (3-10)$$

Durch einen horizontalen Versatz der Anschlagpunkte (2) bzw. (3) um 10 mm nach außen gegenüber dem Rahmen der RCU, ist die Lage in x -Richtung des berechneten Schwerpunkts x_S entsprechend zu korrigieren. Dadurch bezieht sich anschließend die Lage des Schwerpunkts auf die Außenseite des Rahmens der RCU und nicht auf die Anschlagpunkte.

Die Schwerpunktbestimmung der RCU nach dem beschriebenen Verfahren erfolgt zunächst ohne die höhenverstellbaren Gewichtsplatten und deren Träger. Um das Plattenpaket und dessen Platten-träger mit zu berücksichtigen, werden Gleichungen (3-9) und (3-10) wie folgt erweitert:

$$z_{S,RCU} = \frac{m_S \cdot z_S + m_P \cdot z_P}{m_S + m_P} \quad (3-11)$$

$$x_{S,RCU} = \frac{m_S \cdot x_S + m_P \cdot x_P}{m_S + m_P} \quad (3-12)$$

Darin ist m_P die Plattenpaketmasse inklusive Träger und z_P deren Schwerpunkthöhe bezüglich des Koordinatensystems aus Abbildung 3-15. Die horizontale Position der Platten x_P wird entsprechend der mittigen Lage des Führungsrohrs der RCU mittig angenommen. Das Plattenpaket wird hierbei als Punktmasse angenommen, deren Schwerpunkt im Zentrum des Plattenpakets liegt.

Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, dass der Schwerpunkt der RCU ohne verbaute Plattenpakete nur einmalig über die Winkelmessung zu bestimmen ist und anschließend der Gesamtschwerpunkt der RCU abhängig von der Masse und der eingestellten Höhe der Platten berechnet werden kann. Die Dokumentation der durchgeführten Winkelmessung und Schwerpunktbestimmung ist in Anhang A2.2 zu finden.

3.6 Voruntersuchungen

Die im folgenden behandelten Voruntersuchungen bieten die Grundlage für die Versuchsreihen in Abschnitt 4. Dazu wird zum einen der Reibwert μ zwischen Ladefläche und RCU durch einen Zugversuch abgeschätzt und zum anderen wird ein spezieller Sperrbalken zur Messung der Blockierkraft F_B in Kombination mit der RCU überprüft. Für die Kraftmessungen werden sowohl für die Voruntersuchungen als auch für die weiteren Experimente Wägezellen vom Typ U2A mit einer Nennlast von 10 kN verwendet⁶⁵, die im Rahmen dieser Arbeit als Kraftmessdosen bezeichnet werden.

3.6.1 Reibwert Abschätzung

Der Reibwert zwischen Ladeinheit und Prüftischboden hat, wie bereits in Abschnitt 2.3 gezeigt, einen Einfluss auf die erforderlichen Sicherungskräfte bei den betrachteten Sicherungstechniken. Insbesondere bei der Berechnung der erforderlichen Vorspannkraft beim Niederzurren hat die Größe des Reibwerts einen großen Einfluss, was im Folgenden kurz erläutert wird. Wird das Verhältnis zweier Vorspannkkräfte $F_{T,1}$ und $F_{T,2}$ entsprechend Formel (2-9) mit den beiden Reibwerten μ_1 und μ_2 betrachtet, ergibt sich mit dem horizontalen Beschleunigungsbeiwert $c_x = 0,8$ und dem vertikalen Beschleunigungsbeiwert $c_z = 1$ folgender formelmäßiger Zusammenhang:

$$\frac{F_{T,1}}{F_{T,2}} = \frac{\mu_2 \cdot (c_x - \mu_1 \cdot c_z)}{\mu_1 \cdot (c_x - \mu_2 \cdot c_z)} = \frac{\mu_2 \cdot (0,8 - \mu_1)}{\mu_1 \cdot (0,8 - \mu_2)} \quad (3-13)$$

Wird beispielsweise der Reibwert von $\mu_1 = 0,2$ mit einem Reibwert von $\mu_2 = 0,6$ verglichen, ergibt sich eine um den Faktor 9 größere Vorspannkraft.

Für die Auswahl des Reibwerts stehen für unterschiedliche Palettentypen/ Materialien und Ladeflächeböden Reibwert-Tabellen in den Normen und Richtlinien für die Berechnung der Sicherungskräfte zur Verfügung. Um den vorliegenden Reibwert zwischen RCU und Prüftisch abzuschätzen, wird eine Zugprüfung auf dem Prüftisch des HULKS durchgeführt. Die Ladefläche des Prüftisches bildet dabei eine 25 mm starke Siebdruckplatte mit der rauen Seite in Richtung Ladung.

⁶⁵ HBM: Datenblatt Wägezelle U2A.

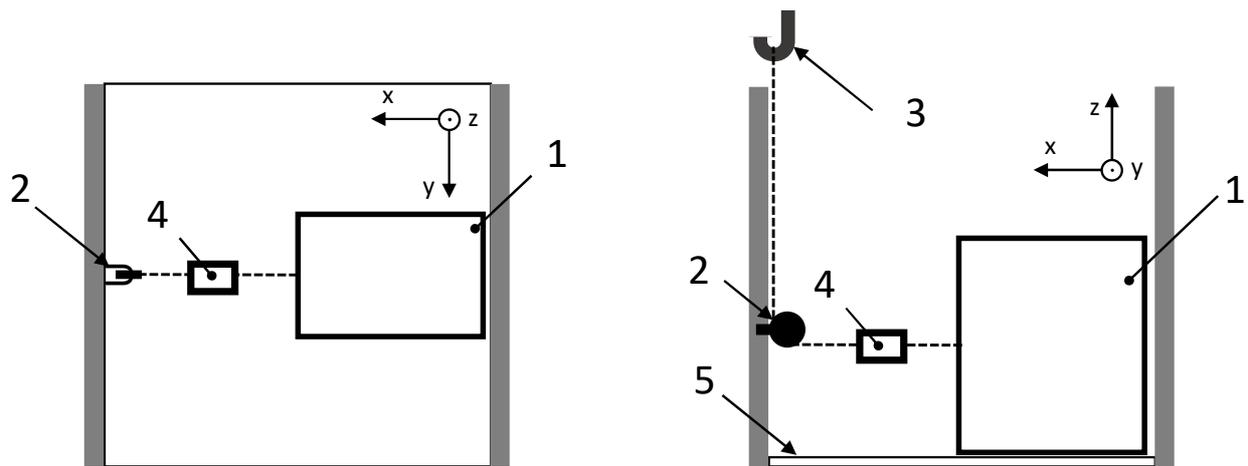


Abbildung 3-16 Aufbau zur Zugprüfung auf der Ladefläche des Prüftisches des HULK. (1) RCU; (2) Umlenkrolle Seil; (3) Hallenkran; (4) Kraftmessdose; (5) Ladefläche

Die RCU (1) in Abbildung 3-16 wird mit einem Seil gezogen, welches zum einen an der RCU selbst und zum anderen am Haken des Hallenkrans (3) befestigt ist. Das Seil wird durch eine Umlenkrolle (2) um 90° umgelenkt, sodass die vertikale Zugkraft des Hallenkrans die RCU horizontal über die Ladefläche (5) des Prüftisches zieht. In dem Bereich zwischen RCU und Umlenkrolle wird eine Kraftmessdose zwischengeschaltet, um die Zugkraft während der Zugprüfung zu messen und aufzuzeichnen.

In der DIN 12195-1 sind neben den Sicherungstechniken auch die Voraussetzungen für die Zugprüfung beschrieben. Da der Versuchsaufbau die geforderte Zuggeschwindigkeit von 100 mm pro Minute sowie weiteren Vorgaben nicht erfüllt^{66a}, dienen die gewonnen Versuchsergebnisse einer reinen Abschätzung der Reibwerte. Der Reibwert μ_{Norm} wird nach DIN 12195-1 mit der Zugkraft F_{Zug} , der Masse m und der Erdbeschleunigung g mit (3-14)^{66a, 67} berechnet:

$$\mu_{Norm} = \frac{F_{Zug} \cdot 0,95}{m \cdot g \cdot 0,925} \quad (3-14)$$

In Abbildung 3-17 ist die Auswertung des Zugversuchs für die Kombination RCU mit Europalette/Ladefläche dargestellt. Über das Intervall zwischen den markierten Stellen in Abbildung 3-17 wurde der arithmetische Mittelwert des Reibwerts, entsprechend der Auswertung nach DIN 12195-1, gebildet^{66b}. Dabei wurde ein Reibwert $\mu_{Norm} = 0,33$ festgestellt. Der gemessene Reibwert stellt eine gute Annäherung für den in der Norm verwendeten Reibwert für die Kombination „Hobelholz – Schichtholz/Sperrholz“ mit $\mu_{Norm} = 0,3$ dar^{66c}. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit für die weiteren Versuche der Reibwert $\mu_{Norm} = 0,3$ für die Kombination RCU mit Europalette/Ladefläche des Prüftisches verwendet.

⁶⁶ DIN: 12195-1:2010 (2011), a S. 38, b S.39, c S. 40.

⁶⁷ Fehlen der Erdbeschleunigung g in der Formel der Norm DIN 12195-1:2010. Für die Konsistenz der Einheiten wurde die Erdbeschleunigung g in der der Formel entsprechend ergänzt.

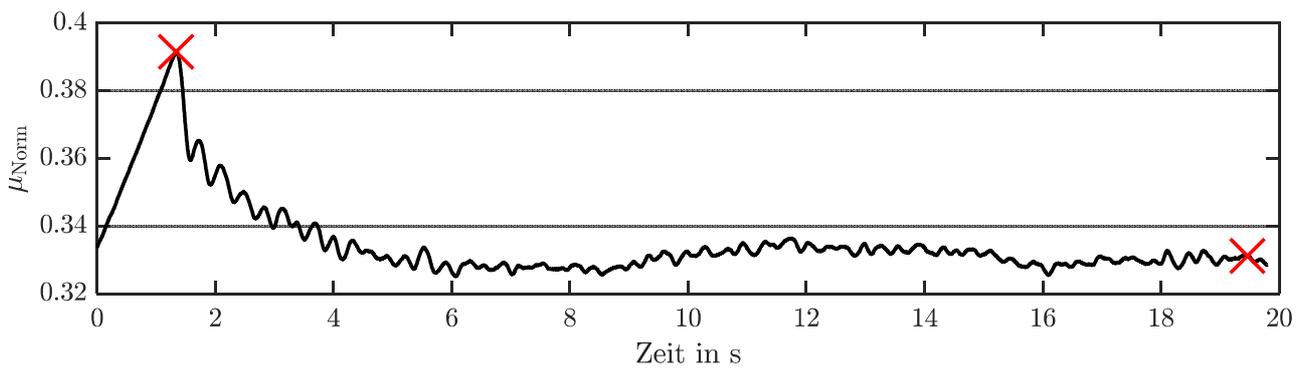


Abbildung 3-17 Auswertung Zugversuch RCU mit Europalette/ Ladefläche des Prüftisches $m_{RCU} = 398$ kg)

In Anhang A3 ist die Auswertung für den Zugversuch bei der Verwendung von Antirutschmatten zwischen der an der RCU befestigten Europalette und der Ladefläche dargestellt. Dabei wurde ein Reibwert von $\mu_{Norm} = 0,52$ gemessen. Dieser Wert ist um 0,08 geringer als der in DIN 12195-1 angegebene Wert für die Verwendung von Antirutschmatten. Da der geringere Reibwert beim Niederzurren eine höhere Vorspannkraft der Zurrmittel verlangt und somit eine erhöhte Sicherungswirkung darstellt, wird für die weiteren Untersuchungen der Reibwert von $\mu_{Norm} = 0,5$ bei der Benutzung von Antirutschmatten verwendet.

Für zukünftige Untersuchungen von Ladeeinheiten bietet es sich an, den Prüfstand entsprechend zu erweitern, sodass Zugversuche zur Bestimmung des Reibwerts direkt auf der Ladefläche des Prüftisches unter Einhaltung der geforderten Vorgaben⁶⁸ nach DIN 12195-1 durchgeführt werden können. Dies bietet die Möglichkeit, neben der Ladungssicherungsprüfung das Prüfangebot zu ergänzen.

3.6.2 Überprüfung des DMS-Sperrbalkens

Bei den geplanten Versuchen mit der Sicherungstechnik Blockieren wird ein spezieller DMS-Sperrbalken zur Messung der wirkenden Blockierkraft verwendet, der aus der Masterarbeit von Toni Reinicke bei FZD hervorging^{69a}. Auf dem Sperrbalken des Typs KAT AJS 1100 (maximal zulässige Blockierkraft von $BC = 11000$ N)⁷⁰ sind Dehnmessstreifen (DMS) angebracht. Dadurch besteht die Möglichkeit, die lokalen Dehnungen des DMS-Sperrbalkens während eines Versuchs zu messen und dadurch die anliegende Blockierkraft durch eine Auswertungssoftware zu berechnen. Da der beschriebene DMS-Sperrbalken nur mit einer Einzellast in der Mitte des Sperrbalkens kalibriert wurde^{69b}, erfolgt im nachfolgenden Abschnitt eine Überprüfung der Messwerte in Verbindung mit der RCU als Linienlast und somit der Anwendbarkeit auf die geplanten Versuchsreihen.

⁶⁸ DIN: 12195-1:2010 (2011), S. 38.

⁶⁹ Toni Reinicke: Masterarbeit, Messen von formschlüssiger Ladungssicherungsmaßnahmen (2016), a, b S. 76-77.

⁷⁰ allsafe GmbH & Co. KG: Datenblatt KAT AJS 1100.

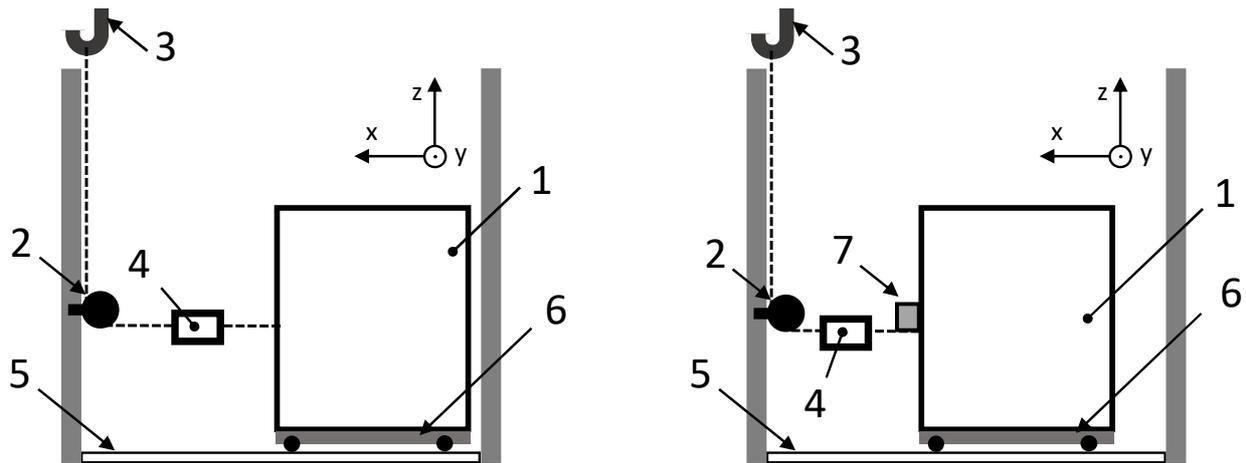


Abbildung 3-18 Zugkraft Offsetbestimmung Hubwagen (links). Aufbau zur Überprüfung des DMS-Sperrbalkens (rechts). (1) RCU; (2) Umlenkrolle Seil; (3) Hallenkran; (4) Kraftmessdose; (5) Ladefläche; (6) Hubwagen; (7) DMS-Sperrbalken

Für die Überprüfung des DMS-Sperrbalkens wird ein ähnlicher Versuchsaufbau wie für die Abschätzung des Reibwerts in Abschnitt 3.6.1 verwendet. Wie in Abbildung 3-18 dargestellt, wird die RCU (1) auf einem Hubwagen (6) platziert, welcher auf der Ladefläche (5) in x-Richtung rollt. Um zunächst dem Offset der Zugkraft durch die Rollreibung des Hubwagens zu bestimmen, wird die auf dem Hubwagen platzierte RCU über die Ladefläche gezogen, wie in Abbildung 3-18 links zu sehen ist. Die Zugkraft F_{Zug} wird mit der Kraftmessdose (4) gemessen.

Zur Überprüfung des DMS-Sperrbalkens (7) wird dieser anschließend unmittelbar oberhalb der Befestigungspunkte des Seils vor der RCU platziert, was in Abbildung 3-18 rechts dargestellt ist. Anschließend wird die auf dem Hubwagen (6) befindliche RCU (1) in x-Richtung gegen den DMS-Sperrbalken gezogen. Die vom DMS-Sperrbalken gemessene Blockierkraft F_B wird anschließend mit der gemessenen Zugkraft F_{Zug} der Kraftmessdose (4) verglichen. Somit besteht die Möglichkeit den Sperrbalken auf einen Messfehler der Blockierkraft, unter Verwendung der RCU, zu überprüfen. Der zuvor bestimmte Offset in der Zugkraft durch die Rollreibung des Hubwagens wird hierzu entfernt.

Im oberen Diagramm der Abbildung 3-19 sind die beim Zugversuch gemessenen Kraftverläufe über der Zeit zu sehen. Bei den Werten der Kraftmessdose ist der Offset durch den Hubwagen von ca. 40 N bereits abgezogen, sodass eine Vergleichbarkeit der beiden Messverfahren gegeben ist. Im unteren Teil der Abbildung 3-19 ist die relative Abweichung der beiden Messgrößen dargestellt. Bis zur Sekunde 7 wird die RCU auf dem Hubwagen nur über den Prüftisch gezogen, ohne dass diese am DMS-Sperrbalken anliegt. Die Schwankung des Signals um den Nullpunkt ist auf die Beschaffenheit der Rollen, bei dem es zu einem mehrfachen Wechsel zwischen Haften und Gleiten (Stick-Slip-Effekt) kommt, zurückzuführen. Anschließend liegt die RCU am DMS-Sperrbalken an und wird in ihrer Rollbewegung unterbrochen bis eine gewisse Kraftschwelle aufgebaut ist, was den kurzen Einbruch der relativen Abweichung bei Sekunde 10 erklärt. Hinzu kommt, dass nach der Masterarbeit von Reinicke ein erhöhter Messfehler des DMS Sperrbalkens bei Kräften unterhalb

von 500 N vorliegt, was aus der Kalibrierung der Einzellast hervorging⁷¹. Im weiteren Verlauf der relativen Abweichung ist ein linearer Anstieg zu erkennen, was auf einen prozentualen Messfehler hindeutet.

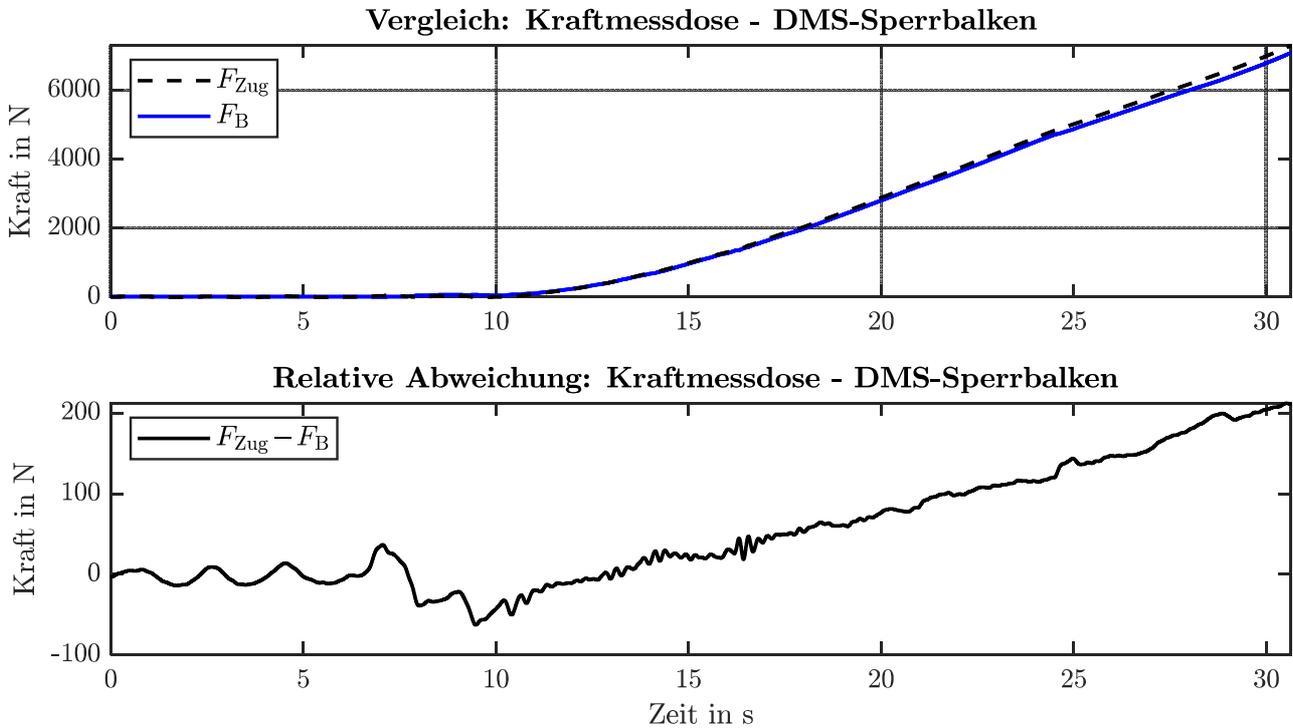


Abbildung 3-19 Überprüfung des Sperrbalkens auf systematische Messfehler

Der systematische Fehler ergibt sich dabei über den Quotienten der relativen Abweichung ($F_{Zug} - F_B$) und der Blockierkraft F_B . Um diesen zu bestimmen wurde, das arithmetische Mittel des systematischen Fehlers in dem Intervall zwischen Sekunde 15 und 30 bestimmt. Dabei wurde im Mittel ein Fehler von 2,85 % festgestellt. In Abbildung 3-20 ist die relative Abweichung des korrigierten Kraftverlaufs der Blockierkraft dargestellt, wobei zu erkennen ist, dass der lineare Anstieg entfernt wurde. Für die weiteren Untersuchungen wird der festgestellte Fehler bei der Verwendung des DMS-Sperrbalkens entsprechend korrigiert.

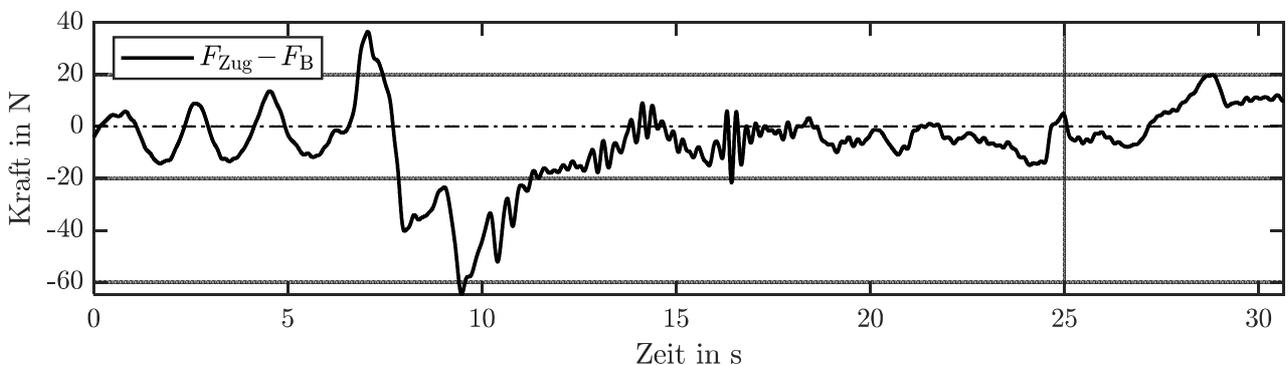


Abbildung 3-20 Korrigierter Kraftverlauf des Sperrbalkens

⁷¹ Toni Reinicke: Masterarbeit, Messen von formschlüssiger Ladungssicherungsmaßnahmen (2016), S. 76–77.

3.7 Statistische Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung, auf Englisch Design of Experiments (DoE), ist eine Methode zur effizienten Planung, Durchführung und anschließender statistischen Auswertung von Versuchen. Ziel der DoE ist es, einen hohen Erkenntnisgewinn bei gleichzeitig möglichst geringem Aufwand zu erreichen^{72a}.

Der statistischen Versuchsplanung steht die „One-Factor-at-a-Time Methode“ gegenüber. Dabei werden die verschiedenen Einstellmöglichkeiten eines Prozessparameters nacheinander getestet und das beste Ergebnis der betrachteten Zielgröße als Grundlage für die weitere Untersuchung des nächsten Prozessparameters genutzt. Bei dieser Methode bleiben jedoch viele Konstellationen unberücksichtigt, sodass das Optimum eines Prozessparameters nur unter einer bestimmten Testumgebung ermittelt wird.^{73a}

Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb die statistische Versuchsplanung genutzt, um Einflussfaktoren auf die Auswirkungen von vertikalen Anregungen zu identifizieren. Des Weiteren bietet sie eine strukturierte Herangehensweise für experimentelle Versuche von der Planung bis hin zur Auswertung. Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über die wichtigsten Fachbegriffe und Methoden der statistischen Versuchsplanung gegeben.

3.7.1 Systemgrenzen, Parameter, Faktoren und Qualitätsmerkmale

Zu Beginn der statistischen Versuchsplanung sind die Systemgrenzen des Versuchs zu definieren. Dazu wird zunächst eine vollständige Liste aller Eingangsgrößen erstellt, die sogenannte Parameterliste. Anschließend werden die für den Versuchsplan relevanten und gezielt einstellbaren Eingangsgrößen aus der Parameterliste ausgewählt, bei denen eine Veränderung der Ausgangsgrößen erwartet wird. Diese ausgewählten Parameter werden als Faktoren bezeichnet. Die nicht ausgewählten Parameter gilt es nach Möglichkeit konstant zu halten.^{73b}

Störgrößen sind einerseits in der Parameterliste unberücksichtigte Größen, die einen Einfluss auf die Ausgangsgröße bzw. das System haben. Andererseits sind dies Größen, die in der Parameterliste aufgeführt sind, sich aber nicht beeinflussen lassen. Bei diesen Eingangsgrößen ist mit Variationen zu rechnen. Weitere Störgrößen sind Einstellfehler der gewählten Faktorgrößen, Bedienfehler sowie Messfehler.^{72b}

Zusätzlich werden im Rahmen der Systembetrachtung die Ausgangsgrößen bzw. Zielgrößen ermittelt, die sogenannten Qualitätsmerkmale. Qualitätsmerkmale sind Messwerte oder aus Messwerten abgeleitete Größen. In einem Versuchsplan ist es möglich, mehrere Qualitätsmerkmale zu betrachten. Ein Blockschaubild bietet die Möglichkeit, Einflussgrößen zu identifizieren und ein besseres Verständnis des betrachteten Systems zu erhalten (siehe Abbildung 3-21).^{73c}

⁷² Prof. Dr.-Ing. Mario Adam: Versuchsplanung und Auswertung (2017), a S. 7, b S. 9.

⁷³ Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017), a S. 7, b S. 3-5, c S. 5.

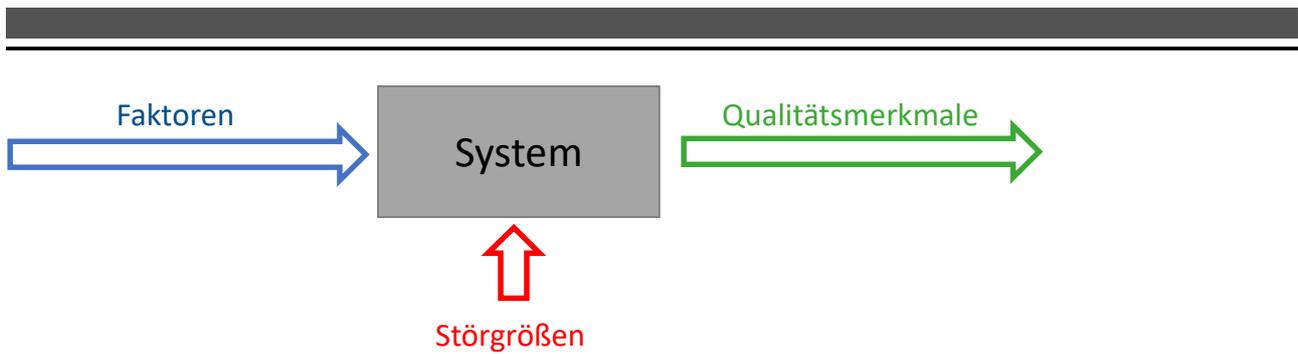


Abbildung 3-21 Blockschaubild der Systemgrenzen mit Eingangs- und Ausgangsgrößen^{74a}

3.7.2 Versuchspläne

Ist das System analysiert, die Faktoren und die Qualitätsmerkmale festgelegt, wird im nächsten Schritt der Versuchsplan erstellt.

Der Versuchsplan ist ein strukturierter, systematisch aufgebauter Plan mit unterschiedlichen Versuchspunkten und Wiederholungen. Im Versuchsplan werden die Faktoren in verschiedenen festgelegten Einstellmöglichkeiten untersucht, den sogenannten Stufen. Eine untere Stufe stellt dabei beispielsweise eine minimale Einstellung des Faktors und eine obere Stufe eine maximale Einstellung des betrachteten Faktors dar. Für die Durchführbarkeit eines Versuchsplans werden mindestens zwei Faktoren mit je zwei Stufen benötigt. Zur übersichtlicheren und kompakten Darstellung der Faktorstufen werden die Stufen kodiert. Typische Stufen-Kodierungen sind $-/+$ oder $-1/1$. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Stufenkodierung in der Form $-1/1$ verwendet. Ein beispielhafter Versuchsplan mit zwei Faktoren und jeweils zwei Stufen sowie einem Qualitätsmerkmal y_i , ist in Tabelle 6 dargestellt.^{74b}

Tabelle 6 Versuchsplan mit zwei Faktoren A und B und je zwei Stufen

Faktoren		Qualitätsmerkmal
A	B	y
-1	-1	y_1
-1	1	y_2
1	-1	y_3
1	1	y_4

Es ist dabei zu beachten, dass die Faktoren unabhängig voneinander einstellbar sind und nicht die Einstellung eines Faktors von der Stufeneinstellung eines anderen Faktors abhängig ist. Darüber hinaus ermöglicht die Betrachtung von zweistufigen Faktoren eine Beurteilung von ausschließlich linearen Zusammenhängen. Nicht lineare Zusammenhänge erfordern dagegen drei oder mehr stufige Faktoreinstellungen. Da im Rahmen dieser Arbeit die grundlegenden Auswirkungen der vertika-

⁷⁴ Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017), a S. 4, b S. 6.

len Anregung untersucht werden, werden zweistufige Versuchspläne betrachtet. Des Weiteren erlaubt die Auswertung der Versuchspläne nur eine Beurteilung des Verhaltens innerhalb der Stufenbereiche der Faktoren.^{75a}

Die Anzahl q der Faktorstufenkombinationen bei einem vollfaktoriellen Versuchsplan mit n_1 Stufen und k Faktoren ergibt sich nach (3-15)^{76a}:

$$q = n_1^k \quad (3-15)$$

Vollfaktoriell bedeutet in diesem Zusammenhang, dass alle Faktorstufenkombinationen untersucht werden. Werden die einzelnen Faktorstufenkombinationen n_q -fach (Umfang der Stichprobe) wiederholt, ergibt sich der Versuchsumfang N über (3-16)^{75b}:

$$N = n_q \cdot q \quad (3-16)$$

Für das Beispiel aus Tabelle 6 ergeben sich mit den beiden Faktoren A und B vier Faktorstufenkombinationen. Diese haben jeweils zwei Stufen und die Faktorstufenkombinationen werden nicht wiederholt.

Das Durchführen von mehreren Wiederholungen ermöglicht eine zunehmend genauere Abschätzung des Mittelwertes, da das Versuchsaussehen vermindert wird und somit überhaupt erst eine Aussage über die Streuung einer Faktorstufenkombinationen möglich ist. Bei den Wiederholungen besteht die Forderung, dass es sich um echte Wiederholungen handelt und nicht nur um eine erneute Messung des durchgeführten Versuchspunktes, die nur die Streuung des Messsystems widerspiegelt. Wird das Experiment einer Faktorstufenkombinationen unmittelbar aufeinanderfolgend mehrfach durchgeführt, wird dies als Wiederholung bezeichnet⁷⁷. Werden dagegen andere Faktorstufenkombinationen dazwischen untersucht, wird dies als Replikationen bezeichnet^{77, 76b}.

Je nach Aufgabenstellung stehen unterschiedlichste Versuchspläne zur Verfügung, die im Gegensatz zu den vollfaktoriellen Versuchsplänen eine verminderte Anzahl von Versuchspunkten berücksichtigen. Trotz der reduzierten Versuchspunkte ist eine Aussage über das Systemverhalten möglich. Die Wahl eines geeigneten Versuchsplans ist von der Anzahl der Faktoren und Stufen sowie dem Versuchsumfang und der gewünschten Genauigkeit der Ergebnisse abhängig.^{76c}

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden zunächst grundlegende Einflüsse der vertikalen Anregung untersucht. Daher werden nur zwei Stufen je Faktor betrachtet. Durch eine begrenzte Anzahl der Faktoren eignet sich der vollfaktorielle Versuchsplan für die Untersuchung der Wirkung und Wechselwirkung der vertikalen Anregung. Auf eine weitere Ausführung der unterschiedlichen Versuchspläne wird an dieser Stelle verzichtet.

⁷⁵ Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren (2011), a S. 25–28, b S. 120.

⁷⁶ Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017), a S. 6, b S. 96-99, c S. 27-57.

⁷⁷ Minitab GmbH: Wiederholungen und Replikationen (2019).

Randomisierung

Bei der Abarbeitung eines Versuchsplans besteht die Möglichkeit, dass trendbehaftete Störgrößen auftreten, wie beispielsweise eine kontinuierliche Temperaturveränderung, die zu einer trendbehafteten Beeinflussung des Qualitätsmerkmals führt. Aus diesem Grund wird die Durchlaufreihenfolge eines Versuchsplans randomisiert, um eine Fehlinterpretation der Wirkung einzelner Faktoren zu vermeiden. Außerdem bietet die Randomisierung die Möglichkeit, Trends zu erkennen.^{78a}

3.7.3 Effekte

Ein Effekt ist im Kontext der statistischen Versuchsplanung die Wirkung eines Faktors auf das Qualitätsmerkmal mit den Einzelwerten y_i . Das heißt ein Effekt beschreibt, wie groß die Veränderung des Mittelwerts \bar{y} des Qualitätsmerkmals über den Wechsel der Stufeneinstellung von -1 nach 1 des Faktors ist.⁷⁹ Die Berechnung des Effekts E_A des Faktors A aus Tabelle 7 erfolgt mit (3-17)⁷⁹:

$$E_A = \bar{y}(A(1)) - \bar{y}(A(-1)) = \frac{y_4 + y_3}{2} - \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (3-17)$$

Dabei ist $\bar{y}(A(1))$ der Mittelwert des Faktors A unter der Stufeneinstellung 1 bzw. $\bar{y}(A(-1))$ unter der Stufeneinstellung -1. Zur Veranschaulichung ist in Tabelle 7 ein Zahlenbeispiel gegeben.

Für einen Versuchsumfang N ergibt sich der Effekt E für einen beliebigen Faktor mit zwei Stufen nach (3-18)^{78b}:

$$E = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (\text{Vorzeichen}_i \cdot y_i) \quad (3-18)$$

Das Vorzeichen ist für den betrachteten Faktor aus der entsprechenden Spalte des kodierten Versuchsplans zu entnehmen.

⁷⁸ Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren (2011), ^a S. 31–32, ^b S. 115.

⁷⁹ Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017), S. 12.

Tabelle 7 Beispielhafter vollfaktorieller Versuchsplan mit 2 Faktoren (je 2 Stufen) mit Auswertung der Effekte und Wechselwirkungen

	Faktoren/ Wechselwirkungen			Qualitätsmerkmal
	A	B	AB	y
	-1	-1	1	$y_1 = 1$
	-1	1	-1	$y_2 = 2$
	1	-1	-1	$y_3 = 5$
	1	1	1	$y_4 = 10$
$\bar{y} (1)$	7,5	6	5,5	
$\bar{y} (-1)$	1,5	3	3,5	
Effekt	6	2,5	2	

Zur Visualisierung der Effekte besteht die Möglichkeit, diese in einem Effektdiagramm darzustellen. Werden mehrere Qualitätsmerkmale ausgewertet, erhält jedes Qualitätsmerkmal ein separates Diagramm. Auf der Abszisse sind die Faktorstufen der Faktoren aufgetragen und auf der Ordinate das Qualitätsmerkmal in seiner Einheit. Der Startwert des Effektdiagramms ist der Mittelwert des Qualitätsmerkmals auf der unteren Stufe der Faktoreinstellung, der Endwert ergibt sich entsprechend dem Mittelwert des Qualitätsmerkmals auf der oberen Stufe. In Abbildung 3-22 ist das Effektdiagramm für den beispielhaften Versuchsplan aus Tabelle 7 dargestellt.⁸⁰

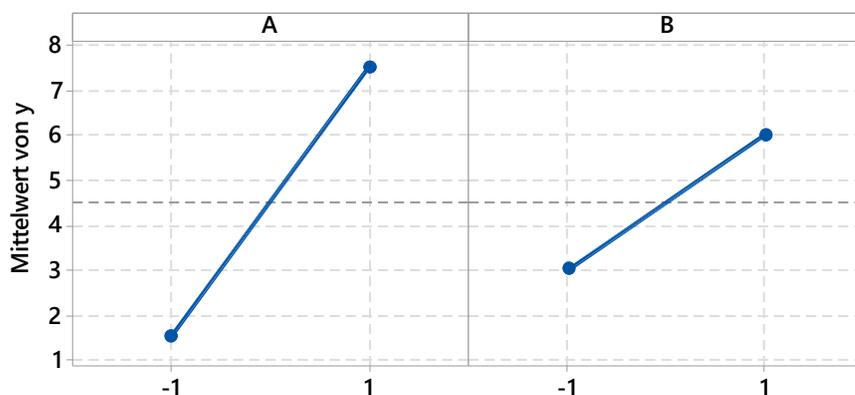


Abbildung 3-22 Effektdiagramm zum beispielhaftem Versuchsplan aus Tabelle 7

Das Vorzeichen des Effekts lässt sich wie folgt interpretieren:

- **Positives Vorzeichen:** Erhöhung des Qualitätsmerkmals beim Stufenwechsel von -1 nach 1
- **Negatives Vorzeichen:** Abnahme des Qualitätsmerkmals beim Stufenwechsel von -1 nach 1

Werden mehrere Effekte eines Qualitätsmerkmals in einem Diagramm betrachtet, so lassen sich die Sensitivitäten des Qualitätsmerkmals bzgl. den verschiedenen Effekten durch die unterschiedlichen Steigungen direkt vergleichen. So weist der Faktor A in Abbildung 3-22 einen größeren Effekt auf

⁸⁰ Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017), S. 12–15.

das Qualitätsmerkmal auf, wobei ein Faktorstufenwechsel von -1 auf 1 des Faktors A zu einer Erhöhung des Qualitätsmerkmals führt.

3.7.4 Wechselwirkungen

Im vorherigen Abschnitt wird der Effekt bzw. die Wirkung eines Faktors auf ein Qualitätsmerkmal erläutert. Ist der Effekt eines Faktors von der Stufeneinstellung eines weiteren Faktors (oder mehrerer Faktoren) abhängig, wird dies als Wechselwirkung bezeichnet. Besteht eine Abhängigkeit des Effekts von Faktor A beispielsweise von der Stufeneinstellung des Faktors B, dann wird dies als Wechselwirkung AB bezeichnet. Zur Bestimmung der Wechselwirkung wird für jede Wechselwirkung eine weitere Spalte im Versuchsplan angelegt. Diese Spalte ergibt sich aus dem Produkt der Vorzeichen der an der Wechselwirkung beteiligten Spalten. In Tabelle 7 ist dies exemplarisch für die Wechselwirkung AB dargestellt. Der Wechselwirkungseffekt E_{AB} lässt sich anschließend analog zum Effekt in Formel (3-18) berechnen.^{81a}

Durch den Wechselwirkungseffekt E_{AB} besteht anschließend die Möglichkeit den Effekt des Faktors A und der Stufeneinstellung des Faktors B zu betrachten. Der Effekt $E_{A(B(-1))}$ des Faktors A unter der Stufeneinstellung -1 des Faktors B ergibt sich nach (3-19)^{81b}:

$$E_{A(B(-1))} = E_A - E_{AB} \quad (3-19)$$

Analog ergibt sich der Effekt $E_{A(B(1))}$ unter der Stufeneinstellung 1 des Faktors B nach (3-20)^{81b}:

$$E_{A(B(1))} = E_A + E_{AB} \quad (3-20)$$

Abbildung 3-23 zeigt die grafische Darstellung des Effekts des Faktors A unter den jeweiligen Stufeneinstellungen des Faktors B. Die Stufeneinstellung 1 des Faktors B führt dabei zu einer Verstärkung des Effekts des Faktors A. Der Start- und Endwert der beiden Effektklinien lassen sich direkt aus Tabelle 7 ablesen.

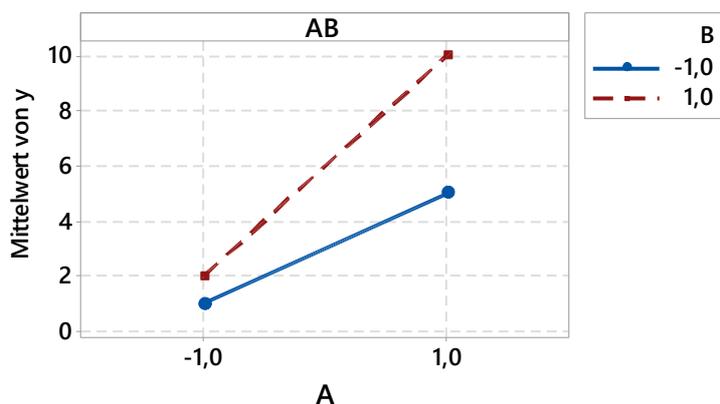


Abbildung 3-23 Wechselwirkungsdiagramm zum beispielhaftem Versuchsplan aus Tabelle 7

⁸¹ Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017), a S. 15–21, b S. 18.

Der Wechselwirkungseffekt E_{AB} gibt an, wie stark die beiden Effektlinien im Wechselwirkungsdiagramm von dem Haupteffekt des Faktors A abweichen. Sind die Effektlinien im Wechselwirkungsdiagramm parallel, liegt keine Wechselwirkung vor.⁸²

3.7.5 Grundlagen der Statistik

Aufgrund von zufälligen Unterschieden führen Experimente unter scheinbar gleichen Randbedingungen zu unterschiedlichen Messergebnissen der betrachtenden Zielgröße. Eine Stichprobe entspricht im Zusammenhang mit einem Versuchsplan der mehrfachen Wiederholung einer Faktorstufenkombination. Eine Stichprobe ist somit nur ein Auszug aus der Grundgesamtheit, die die streuungsbedingte Menge aller möglichen Ergebnisse bei einer unendlichen Anzahl von Versuchen darstellt. Die in der Stichprobe ermittelten Werte bilden Schätzwerte für die wahren Werte der Grundgesamtheit.⁸³

Der arithmetische Mittelwert \bar{y} für die ermittelten Messwerte y_i aus einer Stichprobe mit n_q Messwerten ist ein Schätzwert für den wahren Mittelwert μ der Grundgesamtheit der Stichprobe und wird berechnet über (3-21)⁸⁴:

$$\bar{y} = \frac{1}{n_q} \sum_{i=1}^{n_q} y_i \quad (3-21)$$

Die Varianz s^2 der Stichprobe nach (3-22)⁸⁴ ist ein Schätzwert für die wahre Varianz σ^2 der Grundgesamtheit. Sie ist ein Maß für die Streuung des Mittelwerts \bar{y} .⁸⁴

$$s^2 = \frac{1}{n_q - 1} \sum_{i=1}^{n_q} (y_i - \bar{y})^2 \quad (3-22)$$

Mit steigendem Stichprobenumfang n_q werden zufällige Unterschiede ausgeglichen und es erfolgt eine Annäherung der Schätzwerte an den wahren Wert⁸⁴. Der Schätzwert für die Standardabweichung s der wahren Standardabweichung σ ergibt sich nach (3-23)⁸⁴ wie folgt:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (3-23)$$

Häufigkeitsverteilungen

Die ermittelten Einzelwerte y_i einer Stichprobe liegen in einem bestimmten Wertebereich der Grundgesamtheit. Nach Kleppmann⁸⁵ treten dabei Werte im Bereich des Mittelwerts häufiger auf als Werte am Randbereich. Zur Auswertung der Messergebnisse einer Stichprobe besteht die Möglichkeit, diese in einer Häufigkeitsverteilung darzustellen. Es wird dabei zwischen der absoluten Häufigkeitsverteilung und der relativen Häufigkeitsverteilung unterschieden. Zur Erstellung der

⁸² Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017), S. 18.

⁸³ Prof. Dr.-Ing. Mario Adam: Versuchsplanung und Auswertung (2017), S. 13.

⁸⁴ Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren (2011), S. 76.

⁸⁵ Vgl. Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren (2011), S. 66.

Häufigkeitsverteilung werden zunächst Wertebereiche gleicher Größe festgelegt, die sogenannten Klassen. Diesen Klassen werden anschließend die Messwerte zugeordnet. Die absolute Häufigkeitsverteilung gibt dabei an, mit welcher Häufigkeit Messwerte in einer bestimmten Klasse auftreten. Bei der relativen Häufigkeitsverteilung wird die Auftrittshäufigkeit in den Klassen zusätzlich in das Verhältnis zum Stichprobenumfang n gesetzt. In Abbildung 3-24 ist im linken Diagramm eine Häufigkeitsverteilung dargestellt. Die linke Ordinate gibt die absolute Häufigkeit und die rechte Ordinate die relative Häufigkeit der Verteilung an.^{86a}

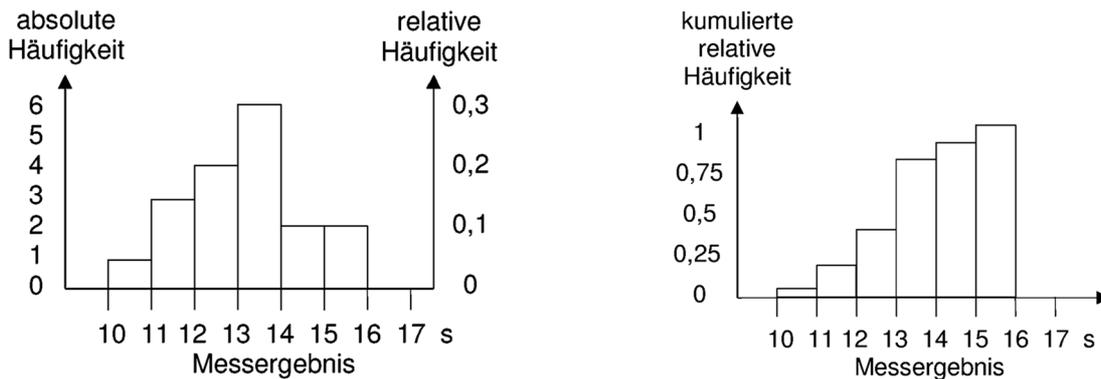


Abbildung 3-24 Absolute und relative Häufigkeitsverteilung (links), kumulierte relative Häufigkeitsverteilung (rechts)⁸⁶

Eine weitere Darstellungsmöglichkeit bietet die relative kumulierte Häufigkeitsverteilung, welche rechts in Abbildung 3-24 zu sehen ist. Sie stellt die aufsummierte relative Häufigkeit bis zu einem gewissen Schwellwert der jeweiligen Klasse dar.^{86a}

Die absoluten, relativen und kumulierten Häufigkeitsverteilungen lassen sich in Verteilungsfunktionen überführen, indem der Stichprobenumfang n_q vergrößert wird und die Wertebereiche der Klassen schmaler gewählt werden. Die Verteilungsfunktion wird auch als Häufigkeitsdichte bezeichnet.^{87a}

Normalverteilung

Messergebnisse technischer Systeme, die mit Zufallsstreuung behaftet sind, lassen sich häufig in guter Näherung durch die Normalverteilung darstellen. Die Häufigkeitsdichte der dimensionsbehafteten Normalverteilung (siehe Abbildung 3-25) wird mit der Funktion $g(y)$ angenähert, für welche der Zusammenhang (3-24) gilt.^{87b, 86b}

$$g(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-24)$$

⁸⁶ Prof. Dr.-Ing. Mario Adam: Versuchsplanung und Auswertung (2017), a S. 14, b S. 15.

⁸⁷ Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren (2011), a S. 67, b S. 70.

Die Standardabweichung σ beschreibt dabei die Breite der Normalverteilung. Wertet man das Integral zwischen zwei symmetrisch gewählten Grenzen um den Mittelwert μ aus, erhält man die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Messwert innerhalb dieses Intervalls liegt.⁸⁸

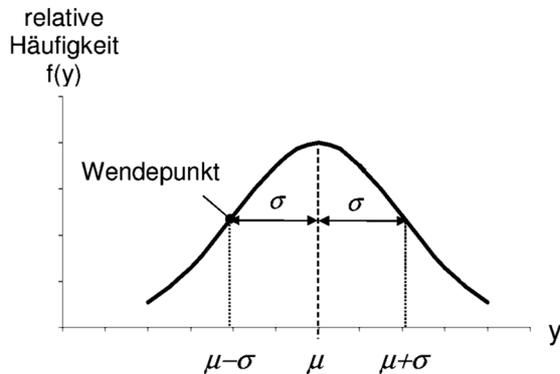


Abbildung 3-25 Dimensionsbehaftete Normalverteilung⁸⁸

Wahrscheinlichkeitsnetz

Das Wahrscheinlichkeitsnetz ist eine spezielle Darstellung der relativen kumulierten Häufigkeitsdichte der Normalverteilung. Die Ordinate wird dabei so skaliert, dass die relative kumulierte Häufigkeitsdichte als Gerade anstelle einer S-Kurve dargestellt wird. Diese Darstellung ermöglicht eine grafische Überprüfung, ob die ermittelten Messwerte einer Normalverteilung folgen. In Abbildung 3-26 ist beispielhaft ein Wahrscheinlichkeitsnetz von normalverteilten Messwerten dargestellt. Die darin dargestellte Gerade ergibt sich durch die Dichtefunktion der Normalverteilung (Formel (3-24)) mit der Standardabweichung s und dem Mittelwert \bar{y} der Messwerte. Folgen die aufgetragenen Werte dieser Geraden, deutet das auf eine normalverteilte Grundgesamtheit hin. Zusätzlich lassen sich dadurch Ausreißer identifizieren. Der in der Abbildung 3-26 markierte Wert im oberen rechten Bereich folgt nicht der Geraden der Normalverteilung und wird dadurch als möglicher Ausreißer identifiziert.^{88, 89}

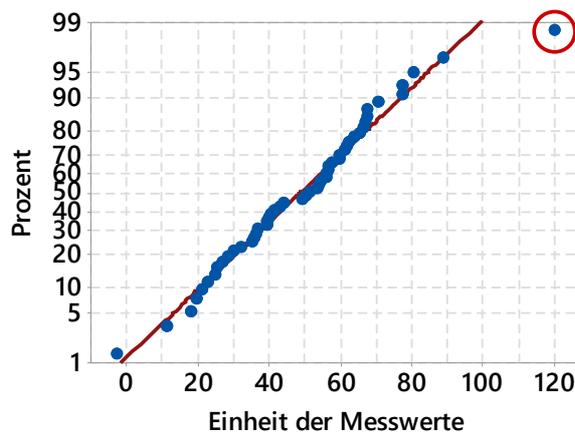


Abbildung 3-26 Beispielhaftes Wahrscheinlichkeitsnetz mit Ausreißer

⁸⁸ Prof. Dr.-Ing. Mario Adam: Versuchsplanung und Auswertung (2017), S. 14–15.

⁸⁹ Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017), S. 69–70.

Residuum^{90a, 90b}

Wie bereits erläutert, bietet das Wahrscheinlichkeitsnetz eine Möglichkeit zu überprüfen, ob eine Stichprobe normalverteilt ist. Da sich die Mittelwerte der einzelnen Stichproben unterscheiden können, sind die Messwerte aller Stichproben eines Versuchs nicht normalverteilt. Trotzdem ist eine gemeinsame Überprüfung aller Messwerte auf Normalverteilung durch die Bildung von Residuen möglich. Das Residuum eines Messwerts r_i ergibt sich dabei aus der Differenz des Messwerts y_i und des Mittelwerts \bar{y}_i der betrachtenden Stichprobe:

$$r_i = y_i - \bar{y}_i \quad (3-25)$$

Liegen die im Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragenen Residuen der Messwerte näherungsweise auf einer Geraden, so ist das ein Indiz dafür, dass die Messwerte aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammen.

Sind die Versuchspunkte eines Versuchsplans randomisiert, so besteht die Möglichkeit, die Versuchsergebnisse graphisch auf Trends zu überprüfen. Hierzu sind die Residuen über die Beobachtungsreihenfolge in Diagramme einzutragen, wie in Abbildung 3-27 veranschaulicht. Tendieren die Residuen mit zunehmender Reihenfolge zu kleineren bzw. größeren Werten, so ist dies ein Indiz für einen Trend in den Messwerten des Versuchs. Dies ist im linken Diagramm in Abbildung 3-27 zu sehen. Ordnen sich die Residuen dagegen horizontal um den Nullpunkt an, deutet dies darauf hin, dass kein Trend besteht, vergleiche Abbildung 3-27 rechts.

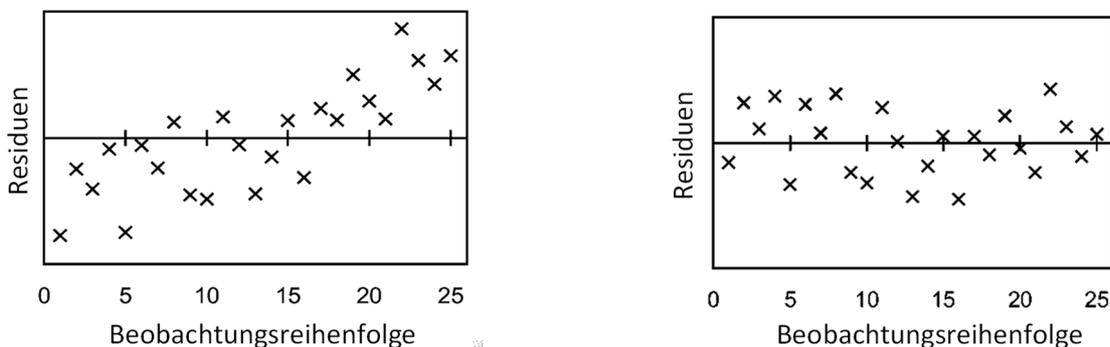


Abbildung 3-27 Residuen über Versuchsnummer mit Trend (links) und ohne Trend (rechts)^{90b}

⁹⁰ Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren (2011), a S. 93, b S. 189-191.

Studentische t-Verteilung

Ziel einer Stichprobe ist es, Kenntnisse über die Grundgesamtheit zu erlangen. Je geringer die Anzahl der Messwerte einer Stichprobe ist, desto „flacher und breiter ist die Häufigkeitsverteilung“^{91a}. Aus diesem Grund wird bei einer begrenzten Anzahl von Messwerten anstelle der Normalverteilung die Studentische t-Verteilung verwendet. Diese berücksichtigt, dass die Zufallsstreuung des Mittelwerts, der Varianz und der Standardabweichung s bei geringem Stichprobenumfang größer ist. Für unendlich viele Messwerte geht die studentische t-Verteilung in die Normalverteilung über. Der Streubereich $y_{o,u}$, in dem ein bestimmter prozentualer Anteil der Messwerte liegt, ergibt sich über nach (3-26).^{91a, 92}

$$y_{o,u} = \bar{y} \pm t \cdot s \quad (3-26)$$

Die t -Werte sind tabellarisch erfasst und von dem Freiheitsgrad FG sowie dem gewählten Vertrauensniveau $1-\alpha$ abhängig. Das Vertrauensniveau gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Messwert im betrachteten Streubereich zu finden ist. Im Fall einer Stichprobe mit dem Stichprobenumfang n_q ergibt sich der Freiheitsgrad FG nach (3-27).⁹²

$$FG = n_q - 1 \quad (3-27)$$

Eine Tabelle mit den t -Werten der studentischen t-Verteilung ist im Anhang A4 zu finden.

Vertrauensbereich/ Konfidenzintervall^{91b}

Der Vertrauensbereich bzw. das Konfidenzintervall $\mu_{o,u}$ nach (3-28) ist ein Intervall, um den Mittelwert \bar{y} in dem mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit der wahre Mittelwert μ der Grundgesamtheit einer Stichprobe mit n_q Einzelwerten zu finden ist.

$$\mu_{o,u} = \bar{y} \pm t \cdot \frac{s}{\sqrt{n_q}} \quad (3-28)$$

Der Vertrauensbereich für den Mittelwert wird entsprechend Formel (3-28) mit zunehmendem Stichprobenumfang n_q kleiner.

3.7.6 Überprüfung auf statistische Signifikanz

Zur Überprüfung, ob es sich bei einem Effekt (Unterschied zwischen zwei Mittelwerten) um einen wahren Effekt handelt und nicht um einen Effekt, der aufgrund von Streuungen der Versuchsergebnisse festgestellt wurde, wird dieser auf statistische Signifikanz geprüft.

Um einen Effekt auf statistische Signifikanz zu überprüfen, wird als Nullhypothese unterstellt, dass der betrachtete Faktor keinen Effekt auf das Qualitätsmerkmal hat⁹³. Das Signifikanzniveau α beschreibt dabei das Risiko die Nullhypothese zu akzeptieren, obwohl diese in Wirklichkeit falsch ist.

⁹¹ Prof. Dr.-Ing. Mario Adam: Versuchsplanung und Auswertung (2017), a S. 16, b S. 19-20.

⁹² Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren (2011), S. 79.

⁹³ Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017), S. 119.

Das heißt das Risiko einen nicht signifikanten Effekt als signifikanten Unterschied anzusehen. Die Nullhypothese kann dabei nur verworfen und nicht bewiesen werden.⁹⁴

Zur Überprüfung wird das Konfidenzintervall des Effekts betrachtet, um den wahren Unterschied der beiden Mittelwerte $\mu_2 - \mu_1$ des Effekts zu erfahren. Dazu werden zunächst die Varianzen s^2 aller Faktorstufenkombination mit Formel (3-22) gebildet. Anschließend wird das arithmetische Mittel aller Varianzen s_{ges}^2 des gesamten Versuchsumfangs mit q Faktorstufenkombinationen nach (3-29)⁹⁵ berechnet:

$$s_{ges}^2 = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q s_i^2 \quad (3-29)$$

Durch Formel (3-23) ergibt sich anschließend die gesamte Standardabweichung s_{ges} . Die Standardabweichung des Effekts $s_{\bar{E}}$ ergibt sich nach (3-30)⁹⁶ mit der gesamten Standardabweichung s_{ges} und dem Versuchsumfangs N :

$$s_{\bar{E}} = \frac{2 \cdot s_{ges}}{\sqrt{N}} \quad (3-30)$$

Das Konfidenzintervall des Effekts $\delta_{o,u}$ ergibt sich anschließend nach (3-31)⁹⁶:

$$\delta_{o,u} = E \pm t \cdot s_{\bar{E}} \quad (3-31)$$

Der Freiheitsgrad FG nach (3-32)⁹⁶ für die Auswahl des t-Wertes aus der studentschen t-Verteilung ergibt sich durch den Versuchsumfang N und die Anzahl der Faktorstufenkombinationen q :

$$FG = N - q \quad (3-32)$$

Der t-Wert ist entsprechend dem Freiheitsgrad FG und des Signifikanzniveaus α zu wählen.

Abbildung 3-28 zeigt das Konfidenzintervall der Mittelwerte $\mu_{o,u}$ sowie das Konfidenzintervall $\delta_{o,u}$ eines signifikanten Effekts. Da die Konfidenzintervalle der Mittelwerte sich nicht überschneiden, ist der beobachtete Unterschied der Mittelwerte zwischen den beiden Stufen des betrachteten Faktors mit dem Signifikanzniveau α statistisch signifikant. Außerdem ist eine Überprüfung durch die Betrachtung des Konfidenzintervalls des Effekts möglich. Enthält das Konfidenzintervall des Effekts $\delta_{o,u}$ nicht den Wert 0, ist der beobachtete Effekt statistisch signifikant. Überschneiden sich dagegen die Konfidenzintervalle der Mittelwerte, ist der betrachtete Effekt nicht signifikant (Konfidenzintervall des Effekts $\delta_{o,u}$ enthält den Wert 0).⁹⁶

⁹⁴ Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017), S. 102.

⁹⁵ Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren (2011), S. 115–116.

⁹⁶ Prof. Dr.-Ing. Mario Adam: Versuchsplanung und Auswertung (2017), S. 21–22.

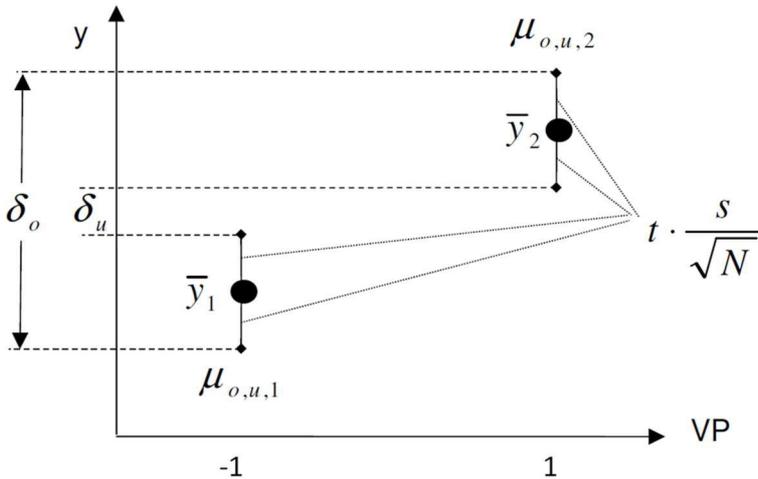


Abbildung 3-28 Grafische Darstellung des Konfidenzintervalls eines signifikanten Effekts⁹⁷

Eine weitere Möglichkeit der grafischen Beurteilung der Signifikanz von Effekten und Wechselwirkungen stellt das Balkendiagramm mit standardisierten Effekten dar. Hierzu werden der Effekt bzw. die Wechselwirkung über standardisiert:

$$E_{\text{std}} = \frac{E \cdot \sqrt{N}}{2 \cdot s_{\text{ges}}} = \frac{E}{s_{\bar{E}}} \quad (3-33)$$

Anhand dieser Standardisierung ist ein direkter Vergleich mit dem t-Wert möglich, der sich durch das gewählte Signifikanzniveau ergibt. Ist der standardisierte Effekt größer als der gewählte t-Wert, gilt der Effekt bzw. die Wechselwirkung als statistisch signifikant.⁹⁸ Zur Verdeutlichung ist ein beispielhaftes Balkendiagramm in Abbildung 3-29 dargestellt.

Hierbei weist der Faktor A für das gewählte Signifikanzniveau α einen signifikanten Effekt auf, wohingegen der Effekt des Faktors B und die Wechselwirkung AB keinen signifikanten Unterschied vorweisen.

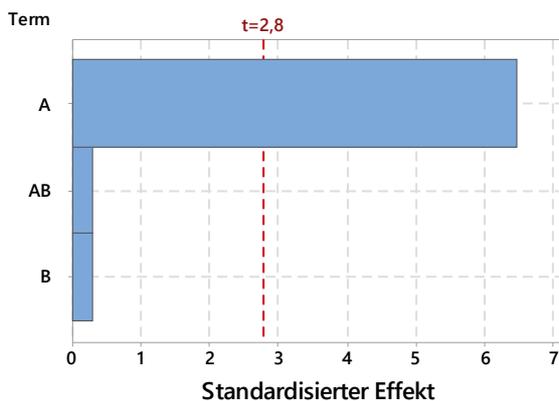


Abbildung 3-29 Beispielhafte Darstellung eines Balkendiagramms zur Beurteilung signifikanter Effekte und Wechselwirkungen

⁹⁷ Prof. Dr.-Ing. Mario Adam: Versuchsplanung und Auswertung (2017), S. 22.

⁹⁸ Minitab GmbH: Pareto-Diagramm, Standardisierte Effekte (2019).

Analog zu diesem Vorgehen lässt sich auch der p-Wert bestimmen. Hierbei wird das Signifikanzniveau und somit der t-Wert so lange angehoben, bis der betrachtete standardisierte Effekt gerade noch größer ist als der t-Wert. Das dafür ermittelte Signifikanzniveau entspricht dem p-Wert und erlaubt eine schnelle Beurteilung der statistischen Signifikanz.⁹⁹

Je nach gewähltem Signifikanzniveau α unterscheidet man die beobachtete Signifikanz nach Kleppmann^{100a} wie folgt:

- $\alpha > 0,05$: „kein Hinweis auf Unterschied“
- $0,05 > \alpha > 0,01$: „indifferent, möglichst mehr Daten sammeln“
- $0,01 > \alpha > 0,001$: „signifikanter Unterschied“
- $0,001 > \alpha$: „hoch signifikanter Unterschied“

Voraussetzungen für die Signifikanzprüfung¹⁰¹

Um die Prüfung auf statistische Signifikanz der Effekte und Wechselwirkungen durchzuführen, sind nach Kleppmann drei Voraussetzungen zu erfüllen:

1. Repräsentative Einzelwerte des Versuchs für beide betrachteten Gruppen (z.B. Faktorstufen).

Um diese Voraussetzung zu erfüllen besteht die Forderung, dass die Versuchsdaten keinen Trend vorweisen. Wie bereits erläutert bietet das Auftragen der Residuen der Ergebnisse über ihre Beobachtungsreihenfolge eine Möglichkeit; einen Trend zu erkennen.

2. Normalverteilte Einzelwerte jeder Faktorstufenkombination (Stichprobe).

Wie bereits erläutert besteht die Möglichkeit, sowohl die wiederholten Einzelwerte einer Faktorstufenkombination als auch die Residuen aller Versuchsergebnisse durch Auftragung im Wahrscheinlichkeitsnetz zu überprüfen.

3. Gleiche Standardabweichung der Grundgesamtheit für beide betrachteten Gruppen.

Liegt eine deutliche Abweichung der Standardabweichung vor, ist dies durch eine Anhäufung der Residuen im Wahrscheinlichkeitsnetz zu erkennen. Nach Kleppmann ist dabei die Überprüfung auf statistische Signifikanz „relativ unempfindlich gegenüber moderaten Abweichungen von der Normalverteilung und ungleichen Standardabweichungen“^{100b} der Versuchsdaten.

Software

Für die Erstellung der Versuchspläne sowie die statistische Auswertung der Ergebnisse mit anschließender Visualisierung wird die Software Minitab® Version 18.1 verwendet.¹⁰²

⁹⁹ Minitab GmbH: p-Wert (2019).

¹⁰⁰ Vgl. Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren (2011), a S. 88, b S. 94.

¹⁰¹ Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren (2011), S. 91–94.

¹⁰² Minitab GmbH: Minitab® 18 - Liste der Funktionen.

4 Experimentelle Versuche und Auswertung

Im folgenden Abschnitt werden die Versuchsreihen mit der Research Cargo Unit für die Untersuchung der grundlegenden Einflüsse der vertikalen Anregungen erläutert und ausgewertet. Zusätzlich werden weitere Versuche mit speziellen Ladeeinheiten, die in der Logistik Verwendung finden, behandelt. Die Experimente werden mit dem Untersuchungswerkzeug HULK durchgeführt.

4.1 Kippneigung der RCU

Um die Kippneigung auf dem HULK zu untersuchen, wird die Research Cargo Unit verwendet. Die RCU bietet dabei den Vorteil, dass der Schwerpunkt stufenlos eingestellt werden kann. Somit besteht die Möglichkeit, das Kippverhalten für unterschiedliche Schwerpunkthöhen mit und ohne vertikale Anregung zu untersuchen.

Wie bereits im Abschnitt 2.3.1 erläutert, gilt die Ladeeinheit nach DIN 12195-1 als standsicher, wenn Ungleichung (4-1)¹⁰³ mit der Vertikalkraft F_z und der zu sichernden horizontalen Trägheitskraft $F_{x,y}$ erfüllt ist:

$$F_z \cdot b_{x,y} > F_{x,y} \cdot d \quad (4-1)$$

Die Länge $b_{x,y}$ beschreibt dabei den horizontalen Abstand zwischen Kippkante und dem Schwerpunkt und die Länge d die Schwerpunkthöhe der betrachteten Ladeeinheit, siehe Abbildung 4-1. Unter der Annahme einer auf die Ladeeinheit vermindert wirkenden Erdbeschleunigung und der daraus resultierenden verminderten Vertikalkraft F_z durch die vertikale Anregung, besteht die Möglichkeit die Kippneigung der RCU bereits bei einer tieferen Schwerpunkthöhe festzustellen. Hierzu wird im folgenden Versuch der Einfluss der vertikalen Anregung auf die Kippneigung der RCU untersucht.

4.1.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 4-1 ist der Versuchsaufbau für die Untersuchung der Kippneigung dargestellt. Die RCU wird dabei mit der langen Seite (1200 mm) in Prüfrichtung gegen einen Sperrbalken platziert. Dieser Sperrbalken (5) mit einer Höhe von 80 mm wird am Fuß der RCU angebracht und die obere Kante des Sperrbalkens dient dabei als Kippkante. Aufgrund der nach oben versetzten Kippkante (3) durch den Sperrbalken weist der Versuchsaufbau im Vergleich zu der Berechnung der Stabilität entsprechend der DIN 12195-1 eine erhöhte Kippstabilität auf. Da in der Praxis ebenfalls Sperrbalken mit ähnlichen Höhen eingesetzt werden, wird an dieser Stelle auf eine Korrektur des Abstandes zwischen Kippkante und Schwerpunkt verzichtet.

¹⁰³ DIN: 12195-1:2010 (2011), S. 14–15.

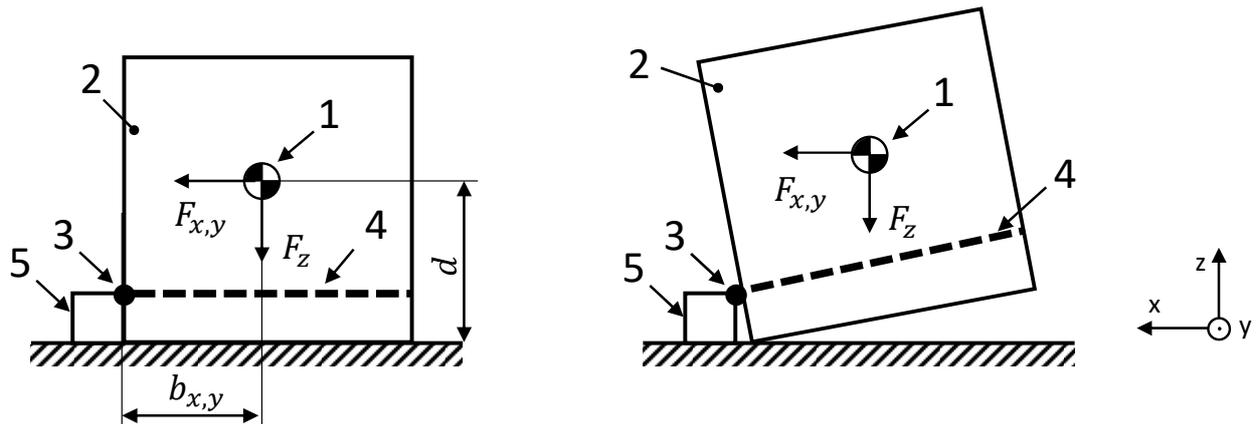


Abbildung 4-1 Versuchsaufbau zur Untersuchung der Kippneigung; (1) Schwerpunkt RCU, (2) RCU, (3) Kippkante, (4) Zurring; (5) Sperrbalken

Um die Ladeinheit gegen ein Verrutschen während der Beschleunigungsphase zu sichern, wird auf der Höhe der Kippkante (3) ein Zurring (4) horizontal um die Ladeinheit gespannt und an dem Sperrbalken befestigt. Dadurch wird das Entstehen von Ladelücken zwischen Sperrbalken und Ladeinheit unterbunden. Außerdem wird die RCU in ihrer Kippbewegung nicht gehindert, da der Zurring im Drehpunkt befestigt ist. In Abbildung 4-2 ist der umgesetzte Versuchsbau dargestellt.

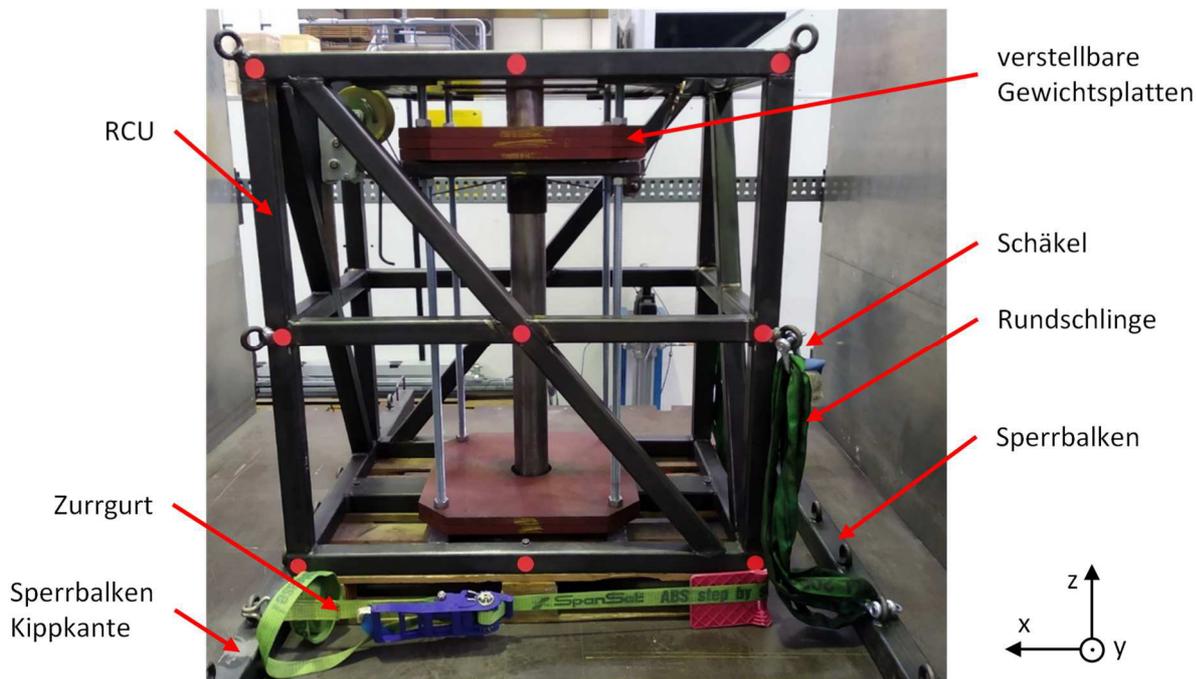


Abbildung 4-2 Umgesetzter Versuchsaufbau zur Untersuchung der Kippneigung mit der RCU

Um eine Beschädigung des Prüfstands durch das Umkippen der RCU zu vermeiden, besteht die Forderung nach einer Begrenzung des Kippwinkels. Hierzu werden zwischen einem weiteren Sperrbalken, der hinter der RCU angebracht ist, und der RCU Rundschnuren mit Schäkel befestigt, was in Abbildung 4-2 veranschaulicht ist. Dadurch besteht die Möglichkeit, den Kippwinkel über die Rundschnurlänge so einzustellen, dass ein Umkippen verhindert wird.

Zur Einstellung des Schwerpunkts der RCU werden drei Gewichtsplatten und Plattenträger mit einer Masse von zusammen $m_P = 214 \text{ kg}$ verwendet. Dadurch ergibt sich eine Gesamtmasse der RCU von $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$.

4.1.2 Versuchsplan

Ziel des Versuches ist es zu überprüfen, ob die vertikale Anregung einen Einfluss auf das Kippverhalten der RCU bei unterschiedlichen Schwerpunkthöhen hat.

Abbildung 4-3 zeigt die lineare Abhängigkeit der Kippneigung von der Schwerpunkthöhe der RCU und der maximalen Beschleunigung nach DIN 12195-1:2010. Wird der Schwerpunkt der RCU unterhalb der Linie gewählt, gilt die Ladung als standsicher.¹⁰⁴ Anhand der Abbildung ist außerdem zu erkennen, dass bereits eine Veränderung der maximalen Verzögerung um $\Delta a_x = 0,2 \text{ m/s}^2$ zu einer Veränderung der Schwerpunkthöhe mit Kippneigung um $14,3 \text{ mm}$ führt.

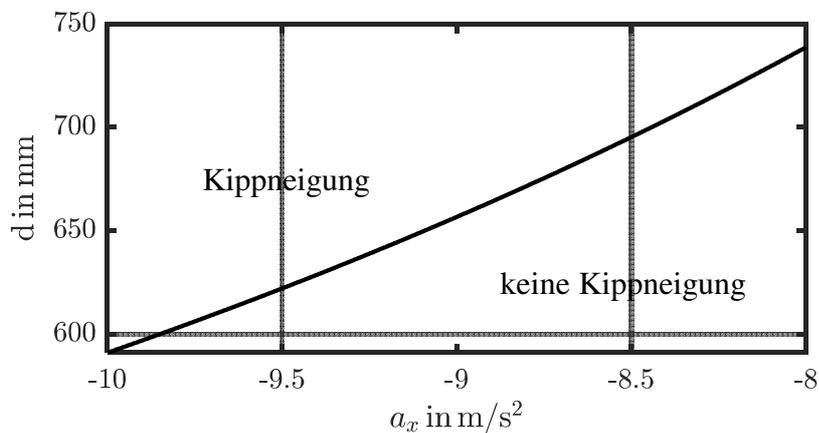


Abbildung 4-3 Abhängigkeit der Kippneigung von der Schwerpunkthöhe d und der Verzögerung a_x nach DIN 12195-1 für den dargestellten Versuchsaufbau

Zur Untersuchung der Kippneigung wird der Prüftisch mitsamt der RCU beschleunigt und anschließend mit der Prüfbeschleunigung verzögert, wobei überprüft wird, ob die RCU kippt. Aufgrund der Streuungen in der horizontalen Verzögerung a_x des HULK lässt sich die Schwerpunkthöhe mit Kippneigung nicht eindeutig bestimmen. Aus diesem Grund wird die Schwerpunkthöhe der RCU schrittweise erhöht, bis eine Kippneigung ohne vertikale Anregung festgestellt wird. Die Kippneigung wird dabei einerseits durch einen Beobachter während der Versuchsdurchführung beurteilt und andererseits durch die Auswertung des vertikalen Beschleunigungsverlaufes ermittelt. Zeigt die RCU eine Kippneigung, hebt sie sich während der Verzögerungsphase von der Ladefläche des Prüftisches ab und trifft nach dem Beenden der Verzögerungsphase wieder auf der Ladefläche auf. Das Wiederauftreffen der RCU auf der Ladefläche ist in dem vertikalen Beschleunigungsverlauf als Beschleunigungspeak zu erkennen, der als Indikator für die Kippneigung herangezogen wird.

¹⁰⁴ DIN: 12195-1:2010 (2011), S. 14–15.

Zunächst wird der Einfluss von vertikalen Anregungen auf die Kippneigung untersucht. Hierzu wird die Ausgangsschwerpunkthöhe der RCU $z_{S,RCU} = 640$ mm festgelegt. Dies ist diejenige Schwerpunkthöhe, bei welcher die RCU gerade noch eine Kippneigung aufweist, wobei keine vertikale Anregung stattfindet. Anschließend wird die Schwerpunkthöhe sukzessive herabgesetzt, indem das verstellbare Plattenpaket nach jedem Versuch um $\Delta z_{S,P} = 20$ mm abgesenkt wird. Nach Formel (3-11) entspricht dies einer Veränderung der Schwerpunkthöhe der RCU um $\Delta z_{S,RCU} = 7,2$ mm. Die niedrigste betrachtete Schwerpunkthöhe beträgt $z_{S,RCU} = 518$ mm. Dies ist die kleinstmögliche Schwerpunkthöhe der RCU unter Verwendung des ausgewählten verstellbaren Plattenpakets.

Für jede eingestellte Schwerpunkthöhe erfolgt zunächst ein Versuch ohne vertikale Anregung, anschließend zwei Versuche mit vertikaler Anregung. Daraufhin wird ein letzter Versuch ohne vertikale Anregung durchgeführt. Durch diese wechselnde Abfolge besteht die Möglichkeit, einen Trend des Prüfstandes auf die Ergebnisse zu erkennen.

4.1.3 Auswertung

Bei Vorversuchen wurde festgestellt, dass die RCU mit einer eingestellten Schwerpunkthöhe von $z_{S,RCU} = 800$ mm, d.h. ohne Standsicherheit (vergleiche Abbildung 4-3), eine eindeutige Kippneigung zeigt. Dabei wurde jedoch beobachtet, dass die RCU während der Verzögerungsphase nur ankippt und anschließend wieder auf dem Prüftisch auftrifft. Der dabei maximal erreichte Kippwinkel der RCU ist dabei in Abbildung 4-4 zu sehen, bei dem die Rundschlingen noch durchhängen.



Abbildung 4-4 Maximal erreichter Kippwinkel bei der eingestellten Schwerpunkthöhe $z_{S,RCU} = 800$ mm

Aus einer Videoanalyse folgt, dass der Kippvorgang bis zu einem maximalen Kippwinkel ca. 300 ms andauert, bevor sich die Ladeinheit wieder in Richtung Ladefläche bewegt. Diese Zeitspanne entspricht ungefähr der Zeitspanne, in der die maximale Verzögerung (vergleiche Markierung III in Abbildung 3-8) auf die RCU wirkt. Dieser Vorversuch hat gezeigt, dass die Verzöge-

rungsdauer des Prüfstands nicht ausreichend ist, um das Kippverhalten einer Ladeinheit eindeutig festzustellen. Vielmehr besteht mit dem Prüfstand nur die Möglichkeit zu ermitteln, ob eine Ladeinheit eine Kippneigung zeigt und somit während der Verzögerungsphase ein Ankippen zu beobachten ist oder nicht.

Bei den Auswertungen der 64¹⁰⁵ Einzelversuche (vier Versuche je Schwerpunkthöhe) wurde eine maximale Geschwindigkeit von $\bar{v}_{x,\max} = (3,28 \pm 0,02) \text{ m/s}$ erreicht und anschließend mit einer minimalen Beschleunigung von $\bar{a}_{x,\text{Verzögerung}} = (-8,17 \pm 0,22) \text{ m/s}^2$ verzögert. Die Amplitude der vertikalen Beschleunigung mit vertikaler Anregung lag in der Phase der maximalen Verzögerung bei $\bar{a}_{z,\min,\text{mv}} = (-4,77 \pm 0,27) \text{ m/s}^2$. Aufgrund der Streuung der Ergebnisse in der vertikalen Beschleunigung durch das Auftreffen der RCU auf der Ladefläche wird auf eine grafische Darstellung aller Beschleunigungsverläufe verzichtet.

Abbildung 4-5 zeigt den Ausschnitt des gemittelten horizontalen Beschleunigungsverlaufs während der Verzögerungsphase mit und ohne vertikale Anregung aller Versuchspunkte. Darin liegt eine im Mittel um $\Delta\bar{a}_x = 0,15 \text{ m/s}^2$ größere maximale Verzögerung mit vertikaler Anregung $\bar{a}_{z,\text{mv}}$ gegenüber den Werten ohne vertikale Anregung $\bar{a}_{z,\text{ov}}$ vor.

Damit entsprechen die Auswirkungen der vertikalen Anregung auf die mittleren horizontalen Beschleunigungen den Auswirkungen einer um $\Delta z_{S,\text{RCU}} = 10,7 \text{ mm}$ höheren Schwerpunktlage, wenn keine vertikale Anregung stattfindet. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

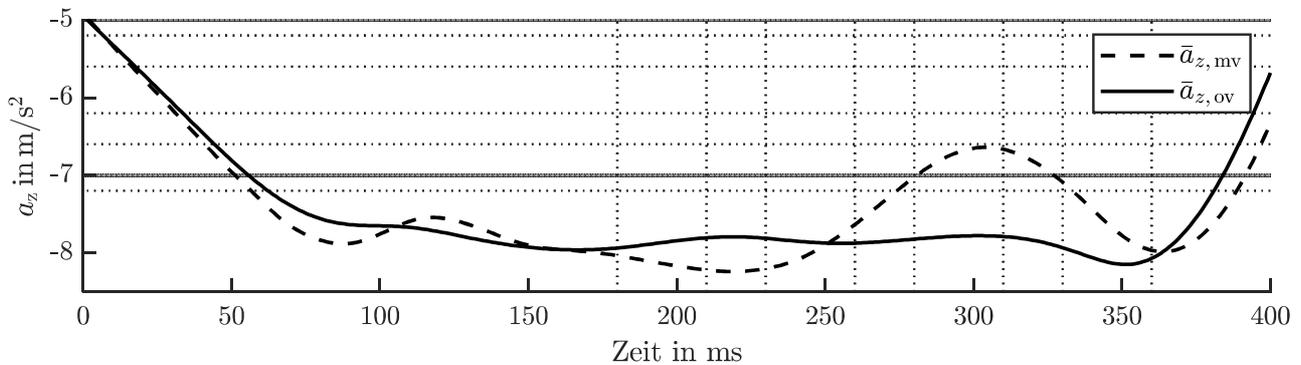


Abbildung 4-5 Ausschnitt horizontaler Beschleunigungsverlauf mit und ohne vertikale Anregung der Versuchsreihe Kippneigung der RCU

Zunächst werden vertikale Beschleunigungsverläufe mit vertikaler Anregung auf auffällige Amplituden (Peaks) durch das Wiederauftreffen der RCU nach dem Kippvorgang analysiert. Zum einen wird die Größe der Peaks $a_{z,\text{peak}}$ und zum anderen der Zeitpunkt des Auftreffens $\tau_{z,\text{peak}}$ betrachtet. In Abbildung 4-6 sind die Graphen der beiden Größen über der abnehmenden Schwerpunkthöhe $z_{S,\text{RCU}}$ aus den Versuchsergebnissen dargestellt. Auf der linken Ordinate ist die negative vertikale Beschleunigung und auf der rechten Ordinate ist der Zeitpunkt des Peaks aufgetragen. Der

¹⁰⁵ Der Stufenabstand wurde nach Versuch 56 auf $\Delta z_{S,p} = 40 \text{ mm}$ erhöht, da sich keine Veränderung der Ergebnisse einstellte.

Zeitpunkt $\tau_{z,\text{peak}}$ der einzelnen Versuchspunkte bezieht sich dabei auf den Versuchspunkt mit der maximal eingestellten Schwerpunkthöhe $z_{S,\text{RCU}} = 640 \text{ mm}$ und dessen Zeitpunkt des Auftreffens der RCU auf die Ladefläche $\tau_{z,\text{peak}}(z_{S,\text{RCU}} = 640 \text{ mm}) = 0$.

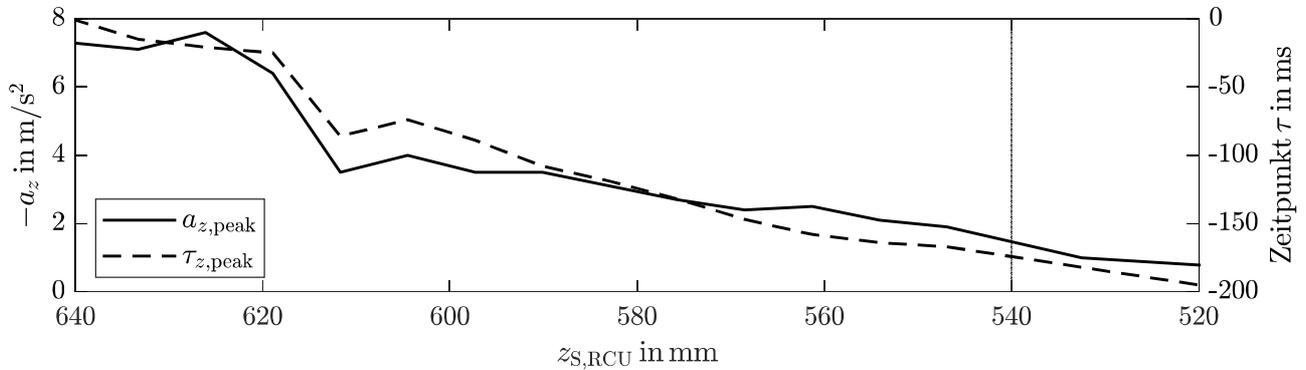


Abbildung 4-6 Abhängigkeit der Größe und des zeitlichen Versatzes des Peaks beim Wiederauftreffen der RCU auf die Ladefläche nach erfolgtem Kippvorgang mit vertikaler Anregung

Es ist zu erkennen, dass sich mit abnehmender Schwerpunkthöhe die Größe des Peaks reduziert und gleichzeitig der Zeitpunkt des Auftreffens früher stattfindet. Dieses Verhalten weist auf eine geringe Kippneigung sowie Kippdauer mit abnehmender Schwerpunkthöhe hin. Außerdem ist zu erkennen, dass bis zu einer Schwerpunkthöhe von etwa $z_{S,\text{RCU}} = 620 \text{ mm}$ die beiden betrachteten Größen nahezu unverändert bleiben.

Während bei der Schwerpunkthöhe von $z_{S,\text{RCU}} = 640 \text{ mm}$ ohne vertikale Anregung noch ein auffälliger Peak in dem vertikalen Beschleunigungsverlauf zu erkennen ist, ist bereits ab einer Schwerpunkthöhe von $z_{S,\text{RCU}} = 633 \text{ mm}$ nahezu kein Peak mehr zu identifizieren ($a_{z,\text{peak}} < 1 \text{ m/s}^2$), siehe Abbildung 4-7. Bei gleicher Schwerpunkthöhe ist dagegen mit vertikaler Anregung ein Peak mit $a_{z,\text{peak}} = 7 \text{ m/s}^2$ im vertikalen Beschleunigungsverlauf zu erkennen, was in Abbildung 4-7 mit einem Kreis markiert ist.

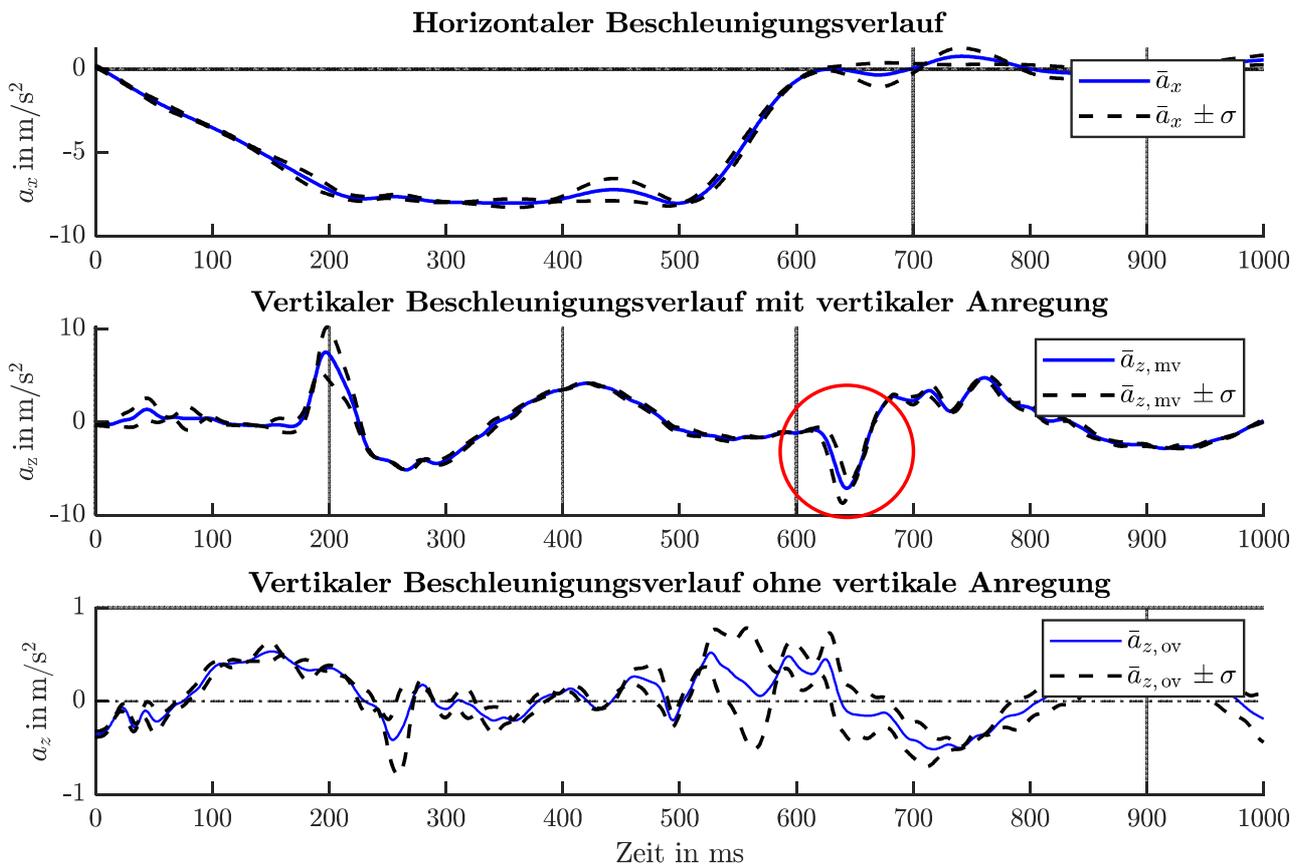


Abbildung 4-7 Vergleich der vertikalen Beschleunigungsverläufe bei einer eingestellten Schwerpunkthöhe $z_{S,RCU} = 633$ mm. Markierte Stelle: Wiederauftreffen der RCU auf der Ladefläche des Prüftisches

Auch die Beobachtungen und Videoaufnahmen bestätigen die Ergebnisse aus den Untersuchungen der Beschleunigungsverläufe. Bei den Versuchen ohne vertikale Anregung war dabei unter einer Schwerpunkthöhe von $z_{S,RCU} = 611$ mm keine sichtbare Kippneigung zu erkennen. Mit vertikaler Anregung dagegen war selbst bei der niedrigsten eingestellten Schwerpunkthöhe von $z_{S,RCU} = 518$ mm eine zwar geringere, aber noch vorhandene Kippneigung zu verzeichnen.

Trotz der höheren horizontalen Verzögerung von $\Delta\bar{a}_x = 0,15$ m/s² mit vertikaler Anregung und der damit verbundenen größeren Kippneigung bei einer um $\Delta z_{S,RCU} = 10,7$ mm niedrigeren Schwerpunkthöhe, lässt sich mit den vorliegenden Ergebnissen die Beeinflussung des Kippverhaltens durch die vertikale Anregung nicht erklären.

Aufgrund der begrenzten Verzögerungsdauer besteht nicht die Möglichkeit einer Aussage darüber, inwiefern die Phase der vermindert wirkenden Erdbeschleunigung während der maximalen Verzögerung zu einem Umkippen der RCU führt. Aus diesem Grund wird auch auf einen Vergleich der Ergebnisse mit der nach DIN 12195-1 definierten Kippneigung verzichtet. Zusammenfassend ist aus den Betrachtungen dieses Kapitels zu folgern, dass mit vertikaler Anregung eine Kippneigung von Ladeeinheiten bereits bei niedrigeren Schwerpunktlagen besteht als ohne vertikale Anregung.

4.2 RCU Blockieren mit Sperrbalken

In dieser Versuchsreihe werden die Auswirkungen der vertikalen Anregung bei der Sicherungstechnik Blockieren untersucht, bei der die Ladung durch eine formschlüssige Sicherung in ihrer Bewegung gehindert wird. Somit stellt die Versuchsreihe eine Anknüpfung an die bereits durchgeführten Versuche im Rahmen der Dissertation von Kamil Klonecki dar (vergleiche Abschnitt 2.4.2).

Die notwendige Blockierkraft F_B der Blockiervorrichtung ergibt sich nach (4-2)¹⁰⁶ aus der Trägheitskraft $F_{x,y}$ der Ladeeinheit abzüglich der Reibkraft F_R :

$$F_B = F_{x,y} - F_R \quad (4-2)$$

Wie in Abschnitt 2.3 bereits gezeigt wurde, ist durch die vertikale Anregung eine verminderte Reibkraft zu erwarten. Da die Sicherungswirkung der Reibkraft beim Blockieren berücksichtigt wird, besteht die Möglichkeit, dass durch die vertikale Anregung eine größere Blockierkraft F_B durch die Blockiervorrichtung aufzubringen ist.

Um dies zu überprüfen wird die Research Cargo Unit mit dem in Abschnitt 3.6.2 beschriebenen DMS-Sperrbalken gegen ein Verrutschen gesichert. Dieser Sperrbalken bietet die Möglichkeit, die Blockierkraft zu messen und dadurch Erkenntnisse auf einen möglichen Einfluss von vertikalen Anregungen zu erhalten.

4.2.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 4-8 ist der Versuchsaufbau „Blockieren mit Sperrbalken“ dargestellt. Dabei wird die RCU (1) mit dem DMS-Sperrbalken (2) in x-Richtung seiner Bewegung blockiert. Der Sperrbalken wird auf einer Höhe von ca. $h = 1$ m angebracht. Rückseitig wird die RCU (1) mit einem weiteren Sperrbalken (3), der auf der Höhe der Palette der RCU angebracht ist, gegen ein Verrutschen während des Beschleunigungsvorgangs gesichert. Durch die rückseitige Sicherung wird das Entstehen von Ladelücken verhindert, die zu einem undefinierten Abstand zwischen der RCU und dem DMS-Sperrbalken führen. Im Rahmen der Dissertation von K. Klonecki wurde gezeigt, dass Ladelücken zu einer verringerten Beanspruchbarkeit von Sicherungsmitteln führen¹⁰⁷. Durch die Verwendung von optional einlegbaren Distanzstücken (4) besteht die Möglichkeit, eine Ladelücke von 20 mm bzw. keine Ladelücke einzustellen. Der Reibwert zwischen Ladefläche des Prüftisches und der RCU lässt sich durch die Verwendung von Antirutschmatten variieren. Ein Foto des umgesetzten Versuchsaufbaus ist im Anhang A5.1 zu finden.

¹⁰⁶ DIN: 12195-1:2010 (2011), S. 15–16.

¹⁰⁷ Kamil, K.: Diss., Entw. einer Prüf- & Bewertungsmeth. für LaSiSysteme (2017), S. 54–55.

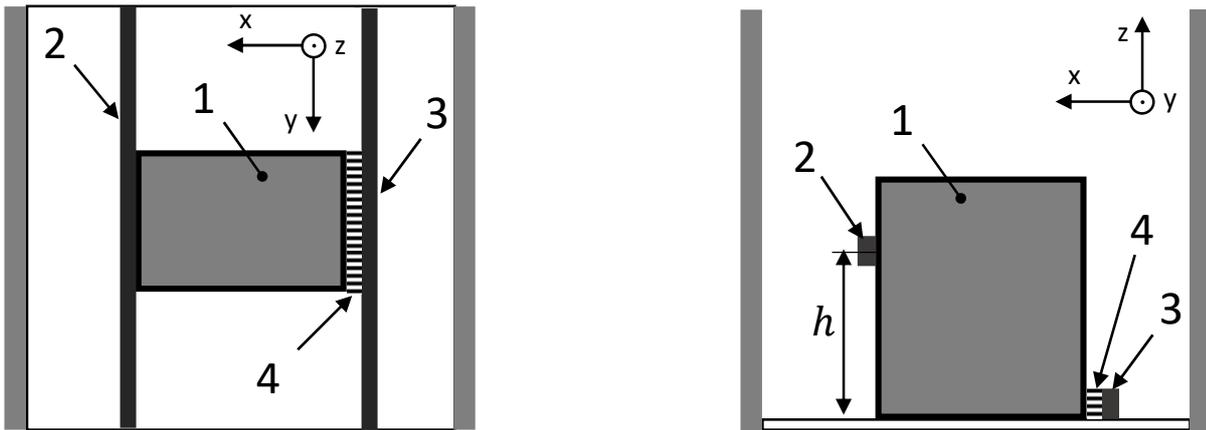


Abbildung 4-8 Versuchsaufbau Blockieren mit Sperrbalken (Fahrrichtung x-Richtung). (1) RCU; (2) Sperrbalken mit DMS; (3) Sperrbalken zur Rückseitigen Sicherung; (4) optionale Distanzstücke zur Einstellung einer Ladelücke

4.2.2 Versuchsplan

Für jeden Versuchspunkt wird die maximale Kraftamplitude, die auf den Sperrbalken wirkt, durch die Verwendung des DMS Sperrbalkens gemessen, welches das Qualitätsmerkmal der Versuchsreihe darstellt.

In Tabelle 8 sind die für den Versuchsplan gewählten Faktoren mit ihren jeweiligen Stufeneinstellungen aufgeführt. Der erste Faktor (A) stellt dabei die vertikale Anregung dar. Dazu wird in der unteren Stufe eine Prüfung ohne vertikale Anregung durchgeführt und in der oberen Stufe wird der Prüftisch durch das Überfahren des Anregungsprofils vertikal angeregt. Ein weiterer Faktor (B) bildet der Reibwert, der über die Reibkraft F_R bei der Berechnung der notwendigen Blockierkraft nach Formel (4-2) berücksichtigt wird. Bei dem Reibwert wird einerseits die Europalette der RCU direkt auf dem Prüftisch platziert und andererseits werden Antirutschmatten zwischen RCU und der Ladefläche des Prüftisches verwendet. Der dritte Faktor (C) stellt die Ladelücke dar, da diese ebenfalls einen Einfluss auf die notwendige Blockierkraft besitzt. Durch die Verwendung eines Distanzstücks sind diskrete Ladelücken von 0 mm (keine Ladelücke) und 20 mm einstellbar. Durch die unterschiedlichen Versuchsumgebungen besteht die Möglichkeit, einen möglichen Effekt der vertikalen Anregung sowie mögliche Wechselwirkungen mit den beiden anderen Faktoren zu untersuchen.

Tabelle 8 Faktorenliste Versuch RCU mit Sperrbalken

Faktor	Untere Stufe (-1)	Obere Stufe (1)
Vertikale Anregung (A)	ohne	mit
Reibwert (B)	0,3	0,5 (Antirutschmatten)
Ladelücke (C)	0 mm	20 mm

Zusätzlich ist eine Variation der Masse der RCU mit $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$ und $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$ vorgesehen, welche durch eine unterschiedliche Anzahl an verwendeten Gewichtsplatten diskret einstellbar ist. Abhängig von der gewählten Masse ist jedoch ein eigenes Beschleunigungsprofil zu erstellen, wodurch mit einer Variation der Verzögerungsamplituden, Verzögerungsdauer sowie der Amplitude der vertikalen Beschleunigung zu rechnen ist¹⁰⁸. Deshalb werden für die beiden Massen zwei getrennte Versuchspläne erstellt, sodass die Masse nicht als Faktor betrachtet wird.

In der Versuchsauswertung aus Abschnitt 4.1.3 zur Identifizierung der Kippneigung der RCU wurde festgestellt, dass sich die Kippneigung durch die vertikale Anregung bei minimaler Schwerpunkthöhe tendenziell reduziert. Deshalb werden die Gewichtsplatten auf die niedrigste mögliche Höhe der RCU eingestellt, um die Kippneigung der RCU mit vertikaler Anregung zu unterbinden. Außerdem ist bei dieser Versuchsreihe der Sperrbalken nicht auf Höhe der Palette und somit nicht als Kippkante angebracht.

Bei den beiden Versuchsplänen handelt es sich um vollfaktorielle zweistufige Versuchspläne mit drei Faktoren, wodurch sich $2^3 = 8$ Einzelversuche ergeben. Jede Faktorstufenkombination wird dreimal wiederholt, was als Replikationen umgesetzt wird. Dadurch ergibt sich ein Versuchsumfang von 24 Einzelversuchen ($3 \cdot 8 = 24$ Versuchspunkte). Alle Versuchspunkte werden randomisiert, um einen möglichen Trend in den Ergebnissen zu erkennen. Die beiden ausgewerteten Versuchspläne sind in Anhang A5.3 für $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$ und Anhang A5.4 für $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$ zu finden.

4.2.3 Auswertung

Zunächst werden die Beschleunigungsverläufe sowie die Geschwindigkeitsverläufe der beiden Versuchsreihen ausgewertet. In Abbildung 4-9 sind die Verläufe für die Geschwindigkeit und die Beschleunigungen der Versuchsreihe mit $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$ dargestellt. Die entsprechenden Verläufe für die Versuchsreihe mit $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$ sind in Anhang A5.2 zu finden.

¹⁰⁸ Dieses Verhalten wurde im Rahmen von Vorversuchen zur Optimierung der vertikalen Anregung beobachtet.

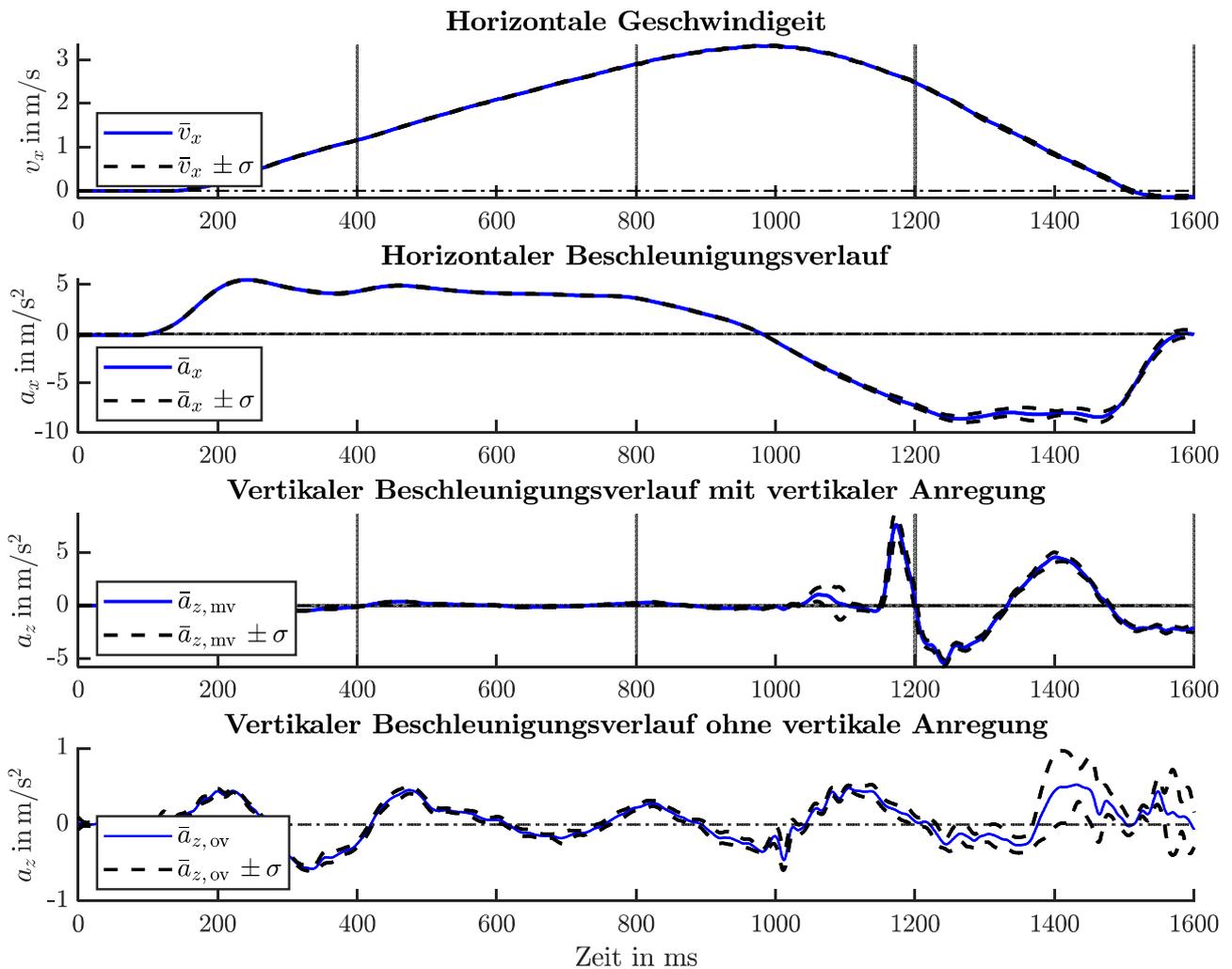


Abbildung 4-9 Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe für die Versuchsreihe $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$

Bei der Versuchsreihe mit $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$ ergab sich die maximale Verzögerung $\bar{a}_{x, \text{Verzögerung}} = (-8,92 \pm 0,27) \text{ m/s}^2$. Bei der Versuchsreihe mit $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$ betrug die maximale Verzögerung $\bar{a}_{x, \text{Verzögerung}} = (-9,15 \pm 0,29) \text{ m/s}^2$.

Die negative Amplitude der vertikalen Beschleunigung mit vertikaler Anregung und $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$ lag in der Phase der maximalen Verzögerung bei $\bar{a}_{z, \text{min}, \text{mv}} = (-5,4 \pm 0,33) \text{ m/s}^2$. Auch hier war für die größere Masse $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$ die negative Amplitude $\bar{a}_{z, \text{min}, \text{mv}} = (-5,62 \pm 0,31) \text{ m/s}^2$ größer. Hiermit ist gezeigt, dass sich die Masse der RCU auf die Beschleunigungen und damit auf die Rahmenbedingungen der Versuche unzulässig stark auswirken. Aus diesem Grund erweist sich die Masse der RCU nicht als geeigneter Versuchsfaktor.

Eine tabellarische Gegenüberstellung der minimalen bzw. maximalen Beschleunigungsamplituden sowie deren Standardabweichungen sind für beide Versuchsreihen im Anhang A5.2 dargestellt.

Zunächst werden die Versuchsergebnisse der maximalen Kraftamplitude der Blockierkraft der RCU mit einer Masse $m_{RCU} = 595$ kg betrachtet. Um einen möglichen Trend zu identifizieren, werden in einem ersten Schritt die Residuen über die Beobachtungsreihenfolge betrachtet, siehe Abbildung 4-10 links. Die darin markierten Residuen der ersten drei Versuche weichen von den restlichen 21 Residuen deutlich ab. Die restlichen Versuche dagegen liegen alle in einem gleichen Streubereich. Dies deutet somit auf keinen Trend, sondern auf einen Sprung in den Messdaten hin. Auch die Auftragung der Residuen im Wahrscheinlichkeitsnetz zeigt die entsprechenden Versuchspunkte als Ausreißer, was im rechten Diagramm in Abbildung 4-10 mit einem Kreis markiert ist. Die festgestellte sprunghafte Zunahme der Blockierkraft ist ein Hinweis auf einen möglicherweise nicht vollständig eingefahren Betriebszustand des Prüfstands¹⁰⁹.

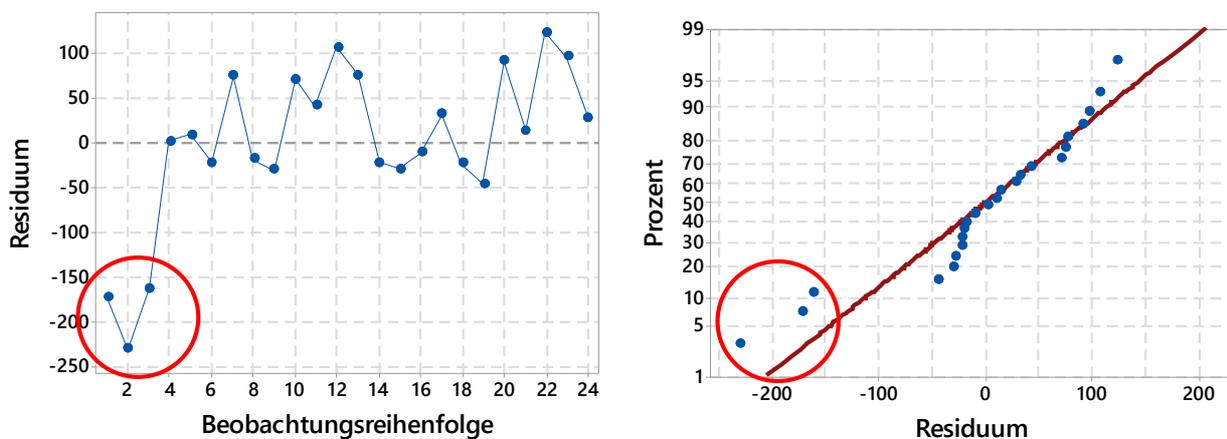


Abbildung 4-10 Residuen vs. Versuchsreihenfolge (links) und Häufigkeitsverteilung der Residuen (rechts) der maximalen Blockierkraft für die Versuchsreihe $m_{RCU} = 595$ kg

Aus den zuvor genannten Gründen werden bei der Versuchsreihe $m_{RCU} = 595$ kg die ersten drei Versuche nicht berücksichtigt und nur die übrigen 21 Versuche betrachtet. In Abbildung 4-11 rechts ist das Wahrscheinlichkeitsnetz der Residuen nach der Korrektur dargestellt, worin zu sehen ist, dass die Residuen näherungsweise einer Normalverteilung folgen. Des Weiteren sind keine Anhäufungen der Residuen zu erkennen, sodass gleiche Standardabweichungen der Grundgesamtheiten der Faktorstufenkombinationen angenommen werden.

¹⁰⁹ Ähnliche Erfahrungen wurden bei der Erstellung von Beschleunigungsprofilen gemacht, bei denen sich das Beschleunigungsverhalten des Prüftisches nach einer gewissen Anzahl von Versuchen abrupt änderte.

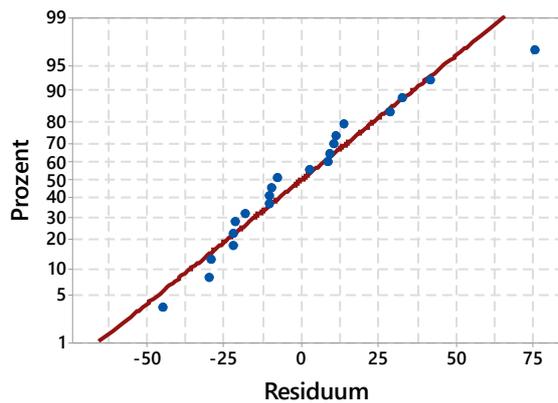


Abbildung 4-11 Wahrscheinlichkeitsnetz der Residuen der maximalen Blockierkraft für die Versuchsreihe $m_{RCU} = 595$ kg nach der Korrektur

Bei der Betrachtung des Wahrscheinlichkeitsnetzes, der Residuen über die Beobachtungsreihenfolge für die Versuche mit der Masse $m_{RCU} = 398$ kg wurden keine Trends, Ausreißer oder andere Auffälligkeiten festgestellt. Die Residuen der maximalen Blockierkraft näherten sich einer Normalverteilung an. Die entsprechenden Diagramme sind unter dem Punkte A5.6 des Anhangs dargestellt.

Für die Versuchsreihe $m_{RCU} = 595$ kg lagen die gemessenen Blockierkräfte in Bereich zwischen 4156 N und 8778 N und für die Versuchsreihe mit $m_{RCU} = 398$ kg in einem Bereich von 2512 N und 6138 N. Unter der Annahme gleicher Standardabweichungen erfüllen die Messdaten für beide Versuchsreihen die Voraussetzungen für die statistische Auswertung (vergleiche Abschnitt 3.7.6).

In Abbildung 4-12 ist zu sehen, dass alle drei Faktoren einen hoch signifikanten Effekt auf das Qualitätsmerkmal der maximalen Blockierkraft haben. Die standardisierten Effekte für die drei Faktoren befinden sich bei beiden Versuchsreihen oberhalb des Grenzwerts der t-Verteilung mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,001$. Aufgrund des reduzierten Versuchsumfangs durch die Korrektur bei dem Versuchsplan mit $m_{RCU} = 595$ kg unterscheiden sich die beiden t-Werte voneinander.

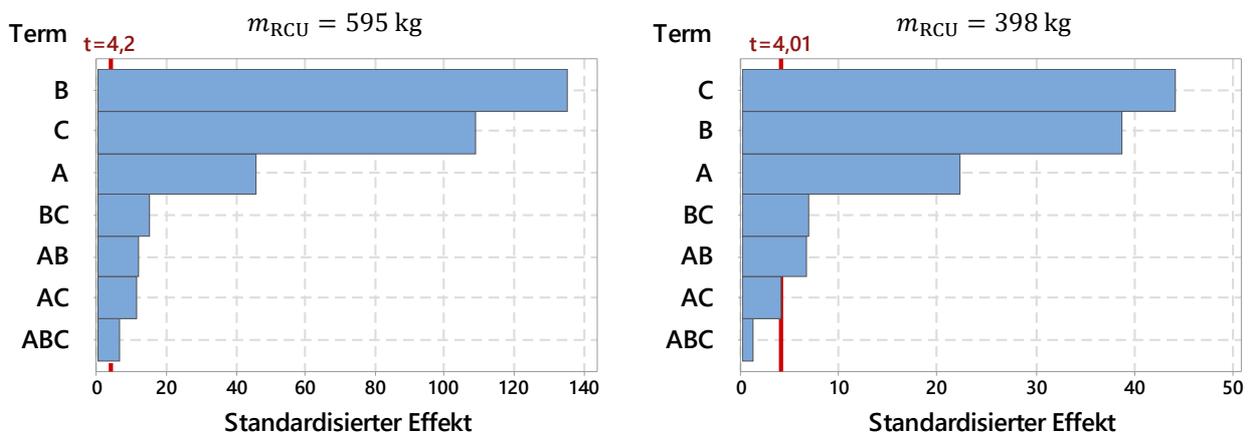


Abbildung 4-12 Balkendiagramme zur Beurteilung signifikanter Effekte und Wechselwirkungen. Faktoren: A – vertikale Anregung; B – Reibwert; C – Ladelücke; Signifikanzniveau – $\alpha = 0,001$

Wie zu erwarten, wirkt sich die Ladelücke verstärkend auf die gemessene Blockierkraft aus. Dagegen führte die Verwendung von Antirutschmatten zu einem abschwächenden Effekt der gemessenen Blockierkraft. Eine tabellarische Übersicht der Effekte der drei Faktoren sowie deren Effektdiagramme ist in Anhang A5.5 für beide Versuchsreihen zu finden.

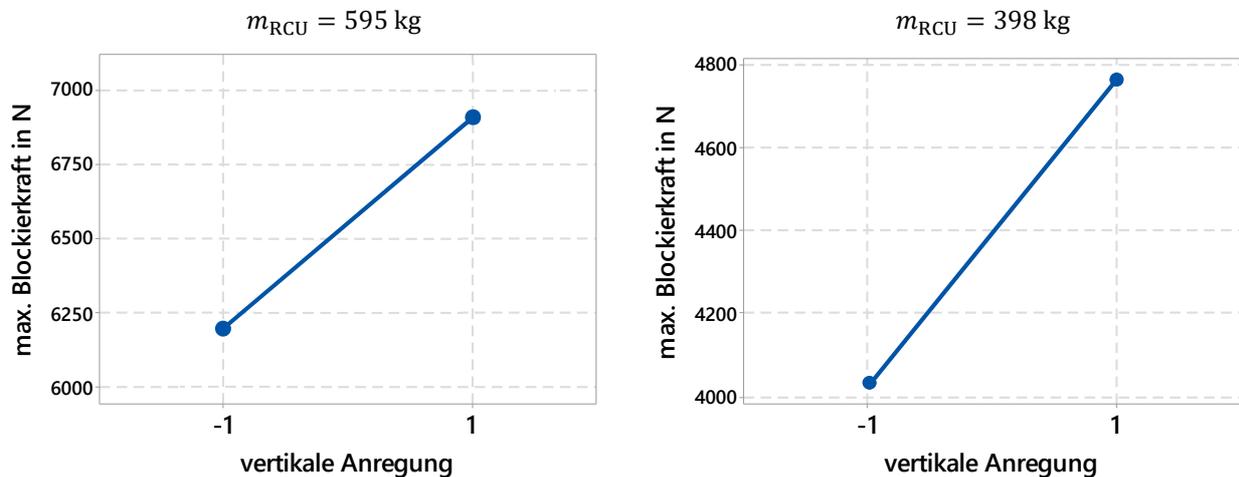


Abbildung 4-13 Effektdiagramm für den Faktor vertikale Anregung

In Abbildung 4-13 sind die beiden Effektdiagramme des Faktors der vertikalen Anregung dargestellt, wobei die Stufeneinstellung „1“ dem Ergebnis bei vertikaler Anregung entspricht. Die Abbildung zeigt, dass die vertikale Anregung in beiden Versuchsreihen zu einer Erhöhung der maximalen Kraftamplitude führt. Bei der Masse von $m_{RCU} = 398$ kg wurde eine erhöhte Blockierkraft von 18,3 % für alle betrachteten Messwerte durch die vertikale Anregung festgestellt. Für die Masse $m_{RCU} = 595$ kg kam es hingegen nur zu einer Erhöhung von 11,6 %. Die mittleren absoluten Werte der Kraftzunahmen betragen 737 N bei $m_{RCU} = 398$ kg bzw. 717 N bei $m_{RCU} = 595$ kg und unterscheiden sich damit nur geringfügig.

Neben den Effekten der Faktoren wurden sowohl für die Wechselwirkung zwischen der vertikalen Anregung und dem Reibwert als auch für die Wechselwirkung zwischen der vertikalen Anregung und der Ladelücke ein hoch signifikanter Einfluss in beiden Versuchsreihen festgestellt, was aus Abbildung 4-12 hervorgeht. In dem Wechselwirkungsdiagramm von $m_{RCU} = 595$ kg ist zu sehen, dass bei beiden Versuchsreihen der Effekt der vertikalen Anregung bei der Verwendung von Antirutschmatten (Stufeneinstellung 1) und ohne Ladelücke (Stufeneinstellung -1) am größten ist, siehe Abbildung 4-14. Das zweite Wechselwirkungsdiagramm von $m_{RCU} = 398$ kg ist im Anhang A5.7 zu finden, hierbei wurden die gleichen Abhängigkeiten festgestellt.

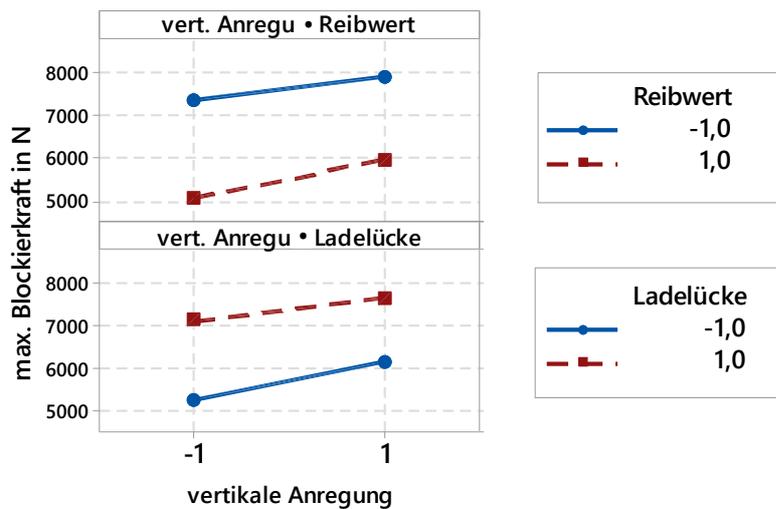


Abbildung 4-14 Wechselwirkungsdiagramm vertikale Anregung/ Reibwert/ Ladelücke für das Qualitätsmerkmal maximale Kraft $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$

Aufgrund der dreifachen Wiederholung aller Faktorstufenkombinationen besteht die Möglichkeit, eine detaillierte Betrachtung der vertikalen Anregung mit den festgestellten Wechselwirkungen durchzuführen. Hierzu werden die Versuchspunkte mit Antirutschmatte und ohne Ladelücke unter dem Faktor der vertikalen Anregung betrachtet, siehe Abbildung 4-15. Durch die vertikale Anregung erhöhte sich die Blockierkraft im Mittel bis zu 44 % (bzw. 28 % für die Versuchsreihe $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$). Zur Überprüfung auf statistische Signifikanz der Ergebnisse sind zusätzlich in der Abbildung die Konfidenzintervalle für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,001$ eingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass sich beide Konfidenzintervalle nicht überschneiden. Aus diesem Grund gilt auch dieser Effekt als hoch signifikant. Aufgrund der der größeren Standardabweichung der Versuchsreihe $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$ fällt das Konfidenzintervall für die Versuchspunkte breiter aus.

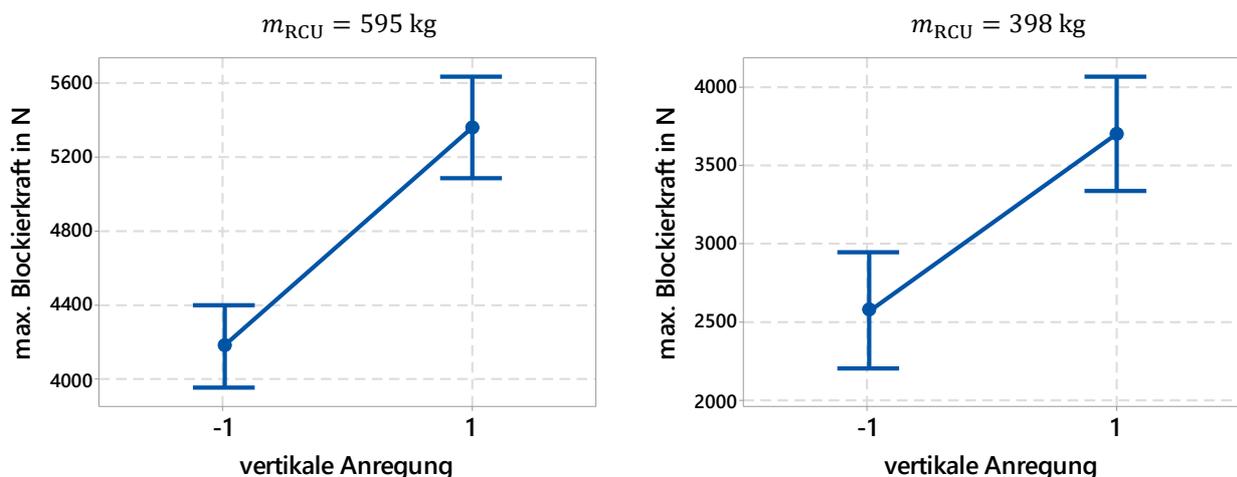


Abbildung 4-15 Effektdiagramm mit Konfidenzintervall (Signifikanzniveau $\alpha = 0,001$) der vertikalen Anregung mit Antirutschmatten und ohne Ladelücke

Eine Betrachtung der absoluten Zunahme der Blockierkraft beider Versuche zeigt, dass mit einer Zunahme im Mittel von 1132 N bei $m_{RCU} = 398$ kg und 1180 N bei $m_{RCU} = 595$ kg durch die vertikale Anregung die Werte für beide Versuchsreihen nur geringfügig voneinander abweichen.

Aus der Auswertung der Versuchsergebnisse geht hervor, dass die vertikale Anregung einen hoch signifikanten Einfluss auf die gemessene Blockierkraft des Sperrbalkens hat. Außerdem wurde eine hoch signifikante Wechselwirkung der vertikalen Anregung mit dem Reibwert festgestellt. Die Verwendung von Antirutschmatten wirkte sich dabei verstärkend auf den Effekt der vertikalen Anregung aus. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass durch den höheren Reibwert der Antirutschmatten (vergleiche Abschnitt 3.6.1) auch eine erhöhte Sicherungswirkung durch die Reibkraft entsteht. Durch die erhöhte Sicherungswirkung der Reibkraft besteht jedoch die Möglichkeit, dass diese durch die vertikale Anregung und der daraus resultierenden verminderten Vertikalkraft ebenfalls vermindert wird. Aus diesem Grund ist bei einem höheren Reibwert, wie es bei der Verwendung von Antirutschmatten der Fall ist, ein betragsmäßig größerer Abfall der Reibkraft durch die vertikale Anregung zu erwarten.

Des Weiteren wurde eine hoch signifikante Wechselwirkung der vertikalen Anregung mit der Ladelücke in Bezug auf die Blockierkraft festgestellt. Demnach wirkte sich eine geschlossene Ladelücke verstärkend auf die Wirkung des Effekts der vertikalen Anregung aus. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass durch die kurze Verzögerungszeit von ca. 300 ms die Reibkraft zum Zeitpunkt des Auftreffens der RCU auf den DMS-Sperrbalken durch die positive vertikale Amplitude bereits wieder ansteigt und somit die Blockierkraft reduziert.

Unter der Annahme, dass für die Versuchsreihen mit $m_{RCU} = 398$ kg und $m_{RCU} = 595$ kg die gleichen Prüfbedingungen gelten, zeigte sich zwischen der Masse und der vertikalen Anregung keine Wechselwirkung in Bezug auf die Blockierkraft. Dies steht im direkten Widerspruch zur Berechnung der notwendigen Blockierkraft F_B nach Formel (4-2). Rechnerisch betrachtet hat eine größere Masse der RCU eine Zunahme der Trägheitskraft $F_{x,y}$ und der Reibkraft F_R zur Folge. Durch die vertikale Anregung ist somit auch eine betragsmäßig größere Verminderung der Reibkraft mit zunehmender Masse zu erwarten, was einem größeren Effekt entspricht. Eine mögliche Erklärung sind die unterschiedlichen Schwerpunkthöhen der beiden betrachteten Massen und der damit verbundenen Unterschiede in der Kippneigung der RCU. Auch der Reibwert und die Ladelücke zeigten für beide Versuchsreihen unterschiedlich große Effekte (siehe Abbildung 3-12). So war bei der Versuchsreihe mit $m_{RCU} = 595$ kg der Effekt des Reibwerts und bei der Versuchsreihe mit $m_{RCU} = 398$ kg der Effekt der Ladelücke am größten, was einen möglichen Einfluss auf das vorliegende Ergebnis haben könnte. Zur Klärung der genauen Wechselwirkungen zwischen der vertikalen Anregung, der Masse der RCU und der Kippneigung der RCU in Bezug auf die Blockierkraft ist im Rahmen von weiteren Forschungsvorhaben weiterer Aufwand zu betreiben.

4.3 Niederzurren der RCU

In einer weiteren Versuchsreihe wird der Einfluss der vertikalen Anregung bei der Sicherungstechnik des Niederzurrens untersucht. Anders als beim Blockieren ist die Sicherungswirkung beim Niederzurren von der eingestellten Vorspannkraft der Zurrmittel abhängig. Diese werden anhand der in DIN EN 12195-1:2010 beschriebenen Berechnungsvorschrift berechnet, siehe Abschnitt 2.3. Die benötigte Sicherungswirkung ist dabei maßgeblich von dem für die Berechnung verwendeten Reibwert abhängig, was bereits in Abschnitt 3.6.1 mit der Formel (3-13) erläutert wurde.

In Abschnitt 3.6.1 erfolgte eine Abschätzung des Reibwerts der Kombination RCU und Ladefläche des Prüftisches durch die Auswertung eines Zugversuchs. Unter Verwendung von Antirutschmatten ergab sich dabei ein Reibwert von $\mu_{\text{Norm}} = 0,5$ und ohne Rutschmatten ein Wert von $\mu_{\text{Norm}} = 0,3$. Diese Reibwerte werden im Folgenden als Grundlage für die Berechnung der Vorspannkraft nach DIN 12195-1 verwendet.

4.3.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 4-16 ist der Versuchsaufbau für die Untersuchung „Auswirkungen der vertikalen Anregung bei Sicherung mittels „Niederzurren“ dargestellt. Die RCU (1) wird dabei in Prüfrichtung (x-Richtung) längs ausgerichtet auf der Ladefläche des Prüftisches platziert. Zur Sicherung wird die RCU mit zwei Zurrgurten (2) mit einer Breite von 50 mm sowie je einer Zugratsche (3) auf der Ladefläche des Prüftisches niedergezurrt. Um die Vorspannkraft der Zurrgurte einzustellen, werden vier Kraftmessdosen (4) verwendet, die zwischen den Anschlagpunkten am Prüftisch und den freien Enden der Zurrgurte angebracht werden. Um die RCU rückseitig gegen eine Verschiebung während der Beschleunigungsphase zu sichern, wird ein Sperrbalken (5) auf der Höhe der Palette der RCU angebracht, wie bereits bei der Versuchsreihe Blockieren gezeigt wurde.

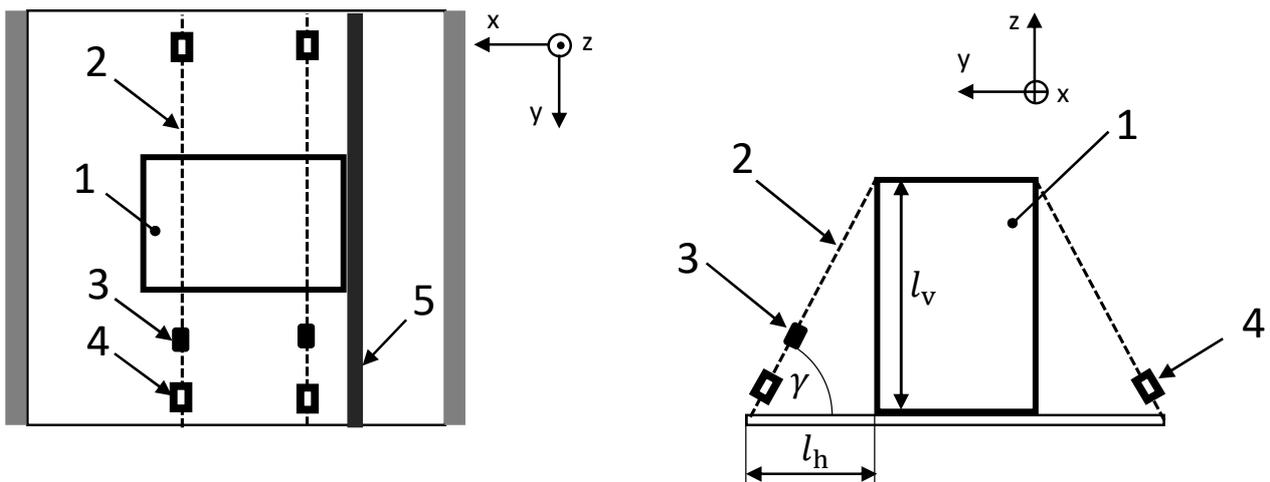


Abbildung 4-16 Versuchsaufbau der Versuchsreihe Niederzurren. (1) RCU; (2) Zurrgurt; (3) Zugratsche; (4) Kraftmessdose; (5) Sperrbalken

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, eine zweite niedrigere Höhe für die Überspannung der Zurrmittel einzustellen (In Abbildung 4-16 nicht dargestellt). Hierzu sind im Anhang A6.1 zwei Fotos des umgesetzten Versuchsaufbaus mit den beiden Höhen der Überspannung der Zurrmittel zu finden.

4.3.2 Versuchsplan

Als Qualitätsmerkmal zur Beurteilung der Ergebnisse beim Versuch Niederzurren wird die Verschiebung der RCU ausgewählt. Diese ermöglicht eine Aussage darüber zu treffen, ob die vertikale Anregung einen Einfluss auf die Sicherungswirkung bei der Sicherung mittels Niederzurren hat.

Die Berechnung der notwendigen Sicherungswirkung beim Niederzurren beruht auf einem Berechnungsmodell nach DIN 12195-1. Aus diesen Gründen sind die Ergebnisse nicht als Einflüsse der vertikalen Anregungen beim Niederzurren zu interpretieren, sondern als Einfluss der vertikalen Anregungen auf die Sicherungswirkung des in der DIN EN 12195-1:2010 beschriebenen Berechnungsmodells.

Die notwendige Vorspannkraft F_T pro Zurrgurt bei der Verwendung von n_{Zurr} Zurrgurten unter dem Abspannwinkel γ wird entsprechend Formel (4-3) berechnet, wie bereits im Abschnitt 2.3.3 erläutert. F_x stellt dabei die zu sichernde Trägheitskraft der RCU in Prüfrichtung dar und F_R die Reibkraft zwischen RCU und Ladefläche mit dem zuvor unter dem Abschnitt 3.6.1 ermittelten Reibwert μ_{Norm} . Außerdem wird ein Sicherheitsbeiwert von $f_s = 1,25$ berücksichtigt.

$$F_T \geq \frac{F_x - F_R}{2 \cdot n_{\text{Zurr}} \cdot \mu_{\text{Norm}} \cdot \sin \gamma} \cdot f_s \quad (4-3)$$

In der Praxis wird dagegen nicht die Vorspannkraft berechnet, sondern die Anzahl der Zurrmittel n_{Zurr} , die zur Sicherung der Ladung notwendig sind. Ist die Anzahl der benötigten Zurrmittel bekannt, werden diese mit ihrer maximal möglichen Vorspannkraft S_{TF} vorgespannt. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass durch die eingestellte Vorspannkraft eine erhöhte Sicherungswirkung oder auch eine gerade noch ausreichende Sicherungswirkung vorliegt. Um eine Untersuchung der Auswirkungen der vertikalen Anregung beim Niederzurren mit unterschiedlichen Umgebungsbedingungen zu ermöglichen, wird versucht, die berechnete mindesterforderliche Vorspannkraft über die Zurrgurte genau einzustellen.

Für das Niederzurren werden Zugratschen mit einer maximalen Vorspannkraft von $S_{\text{TF}} = 5000 \text{ N}$ verwendet. Aufgrund der festen Abstände der Ratschenverzahnung besteht dabei nicht die Möglichkeit, die Vorspannkraft stufenlos einzustellen. Deshalb wird versucht, die mittlere Vorspannkraft der zwei Zurrgurte \bar{F}_T entsprechend der berechneten Vorspannkraft F_T einzustellen. Hierzu wird jeweils der Mittelwert der gemessenen Vorspannkraft der vier Kraftmessdosen gebildet. Die Differenz zwischen der eingestellten und der berechneten Vorspannkraft ist ergänzend im Versuchsplan eingefügt, siehe Anhang A6.2. In fünf der 24 Versuche wurde die eingestellte Vorspannkraft im Mittel um ca. 50 N unterschritten. In den restlichen Versuchspunkten wurde dagegen eine höhere Vorspannkraft als berechnet eingestellt. Die Standardabweichung der im Mittel eingestellten Vorspannkraft lag bei $\sigma = 190 \text{ N}$.

Für den Versuchsplan wird als erster Faktor die vertikale Anregung (A) betrachtet. Als zweiter Faktor wird der Reibwert (B) zwischen RCU und Ladefläche betrachtet, der, wie bereits erläutert, den größten Einfluss auf die notwendige Sicherungswirkung im Berechnungsmodell hat. Die Stufeneinstellung wird dabei mit den aus den Vorversuchen abgeschätzten Reibwerten $\mu_{Norm} = 0,3$ für die RCU direkt auf der Ladefläche und $\mu_{Norm} = 0,5$ bei der Verwendung von Antirutschmatten zwischen RCU und Ladefläche gewählt. Der letzte Faktor Zurrhöhe (C) stellt die eingestellte Höhe der Überspannung der Zurrgurte dar. Dadurch wird zum einen der Abspannwinkel γ variiert und zum anderen die Länge der Zurrgurte. In Tabelle 9 sind die drei Faktoren mit den jeweiligen Stufeneinstellungen aufgelistet.

Tabelle 9 Versuchsplan Niederzurren

Faktor	Untere Stufe (-1)	Obere Stufe (1)
Vertikale Anregung (A)	ohne	mit
Reibwert μ_{Norm} (B)	0,3	0,5 (Antirutschmatten)
Zurrhöhe l_v (C)	772 mm	1400 mm

Für die Berechnung der notwendigen Vorspannkraft wird eine Masse von $m_{RCU} = 595$ kg sowie ein Beschleunigungsbeiwert von $c_x = 0,8$ angenommen. Für den horizontalen Abstand der Zurrmittel zwischen RCU und den Anschlagpunkten wird der Wert $l_h = 805$ mm verwendet, was aus einer Vermessung des Prüfaufbaus hervorgeht. Dadurch ergibt sich ein Winkel von ungefähr $\gamma = 44^\circ$ bei einer Zurrhöhe von $l_v = 772$ mm bzw. von ungefähr $\gamma = 60^\circ$ bei einer Zurrhöhe von $l_v = 1400$ mm. Durch die entsprechende Wahl der Faktorstufen sowie der eingestellten Masse von $m_{RCU} = 595$ kg ergibt sich eine minimale Vorspannkraft von 1273 N und eine maximale Vorspannkraft von 4429 N bei der Verwendung von zwei Zurrgurten. Für die Schwerpunkthöhe der RCU wird, wie bereits in der Versuchsreihe Blockieren erläutert, die niedrigste mögliche Einstellung gewählt, um einen Einfluss der Kippneigung zu vermeiden.

4.3.3 Auswertung

Die Beschleunigungsverläufe der Versuchsreihe Niederzurren sind in Abbildung 4-17 in der Phase der Verzögerung dargestellt. Bei der Versuchsreihe Niederzurren wurde eine maximale Geschwindigkeit von $\bar{v}_{x,max} = (3,32 \pm 0,22)$ m/s erreicht und anschließend mit einer minimalen Beschleunigung von $\bar{a}_{x,Verzögerung} = (-8,73 \pm 0,22)$ m/s² verzögert. Mit vertikaler Anregung wurde ein im Mittel um 0,2 m/s² größerer Betrag der Amplitude der horizontalen Verzögerung festgestellt. Die gemessenen horizontalen Verzögerungen sind betragsmäßig um ungefähr 1 m/s² größer als die für die Berechnung der Vorspannkraft angesetzten Prüfbeschleunigung von 7,85 m/s² ($c_x = 0,8$).

Die negative Amplitude der vertikalen Beschleunigung mit Anregung lag in der Phase der maximalen Verzögerung bei $\bar{a}_{z,min,mv} = (-4,47 \pm 0,28)$ m/s². Ohne vertikale Anregung lagen sowohl die positive als auch die negative Amplitude der vertikalen Beschleunigung betragsmäßig unterhalb von 1 m/s².

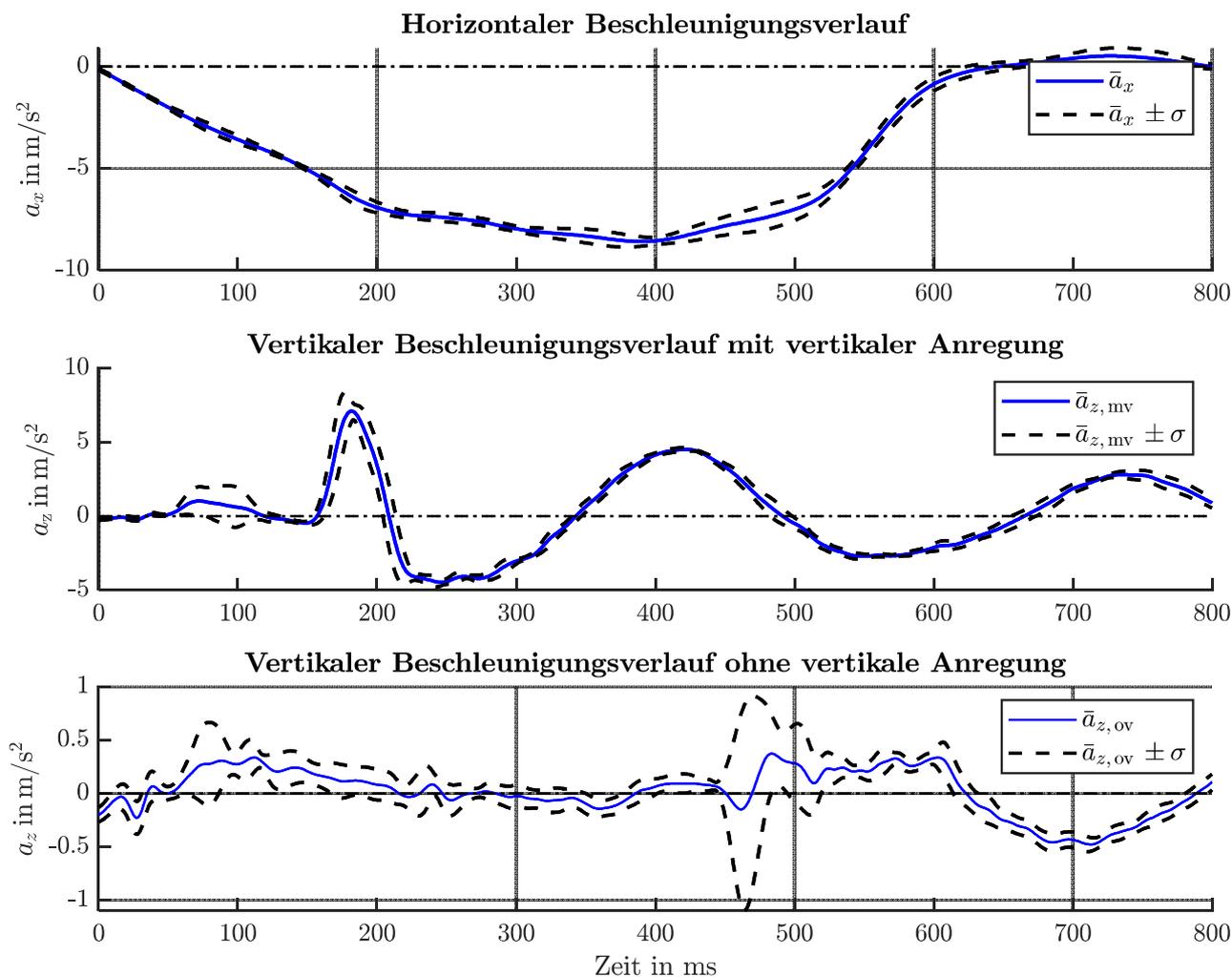


Abbildung 4-17 Ausschnitt der Beschleunigungsverläufe für die Versuchsreihe Niederzurren

Um einen Trend in den Versuchsdaten auszuschließen, werden die Residuen der Verschiebung über die Beobachtungsreihenfolgen aller 24 Versuchspunkte betrachtet. Abbildung 4-18 zeigt das entsprechende Diagramm, worin kein Trend zu erkennen ist.

Im Diagramm in Abbildung 4-17 ist zu sehen, dass es bei insgesamt 12 der 24 Punkte zu keiner Verschiebung der RCU kommt. Diese 12 Versuchspunkte entstammen den Versuchen ohne Antirutschmatten, d.h. der Faktor Reibwert ist hier auf seiner unteren Stufe. Eine mögliche Erklärung dafür ist die bereits in Abschnitt 3.6.1 beschriebenen Abhängigkeit des Berechnungsmodells von dem Reibwert. Für den niedrigeren Reibwert $\mu_{\text{Norm}} = 0,3$ (ohne Antirutschmatten) wird dabei entsprechend der Formel (3-13) eine um mehr als 2,5-fach größere Vorspannkraft benötigt, als im Vergleich zu dem höheren Reibwert $\mu_{\text{Norm}} = 0,5$. Aufgrund der niedrigeren Vorspannkraft besteht die Möglichkeit, dass die Ladung durch die vertikale Anregung von der Ladefläche abhebt bzw. entlastet wird und somit eine größere Verschiebung begünstigt wird. Für die weitere Auswertung wird der Faktor Reibwert deshalb nicht weiter betrachtet und ausschließlich die Ergebnisse bei der Verwendung von Antirutschmatten analysiert. Hierzu ist der reduzierter Versuchsplan ohne den Faktor Reibwert im Anhang A6.3 zu finden.

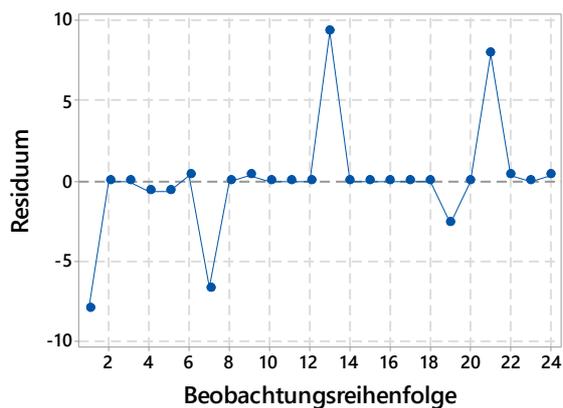


Abbildung 4-18 Residuen vs. Beobachtungsreihenfolge des Qualitätsmerkmals der Verschiebung der RCU

In Abbildung 4-19 sind die Residuen der Verschiebung des reduzierten Versuchsplans im Wahrscheinlichkeitsnetz und im Histogramm aufgetragen. Die Residuen im Wahrscheinlichkeitsnetz liegen dabei annähernd auf einer Geraden, was auf eine normalverteilte Grundgesamtheit der Ergebnisse hindeutet. Auffällig ist dabei die Anhäufung von Residuen um den Wert Null. Werden die Standardabweichungen der Versuche betrachtet, wird deutlich, dass diese abhängig von der Stufeneinstellung der vertikalen Anregung einen deutlichen Unterschied aufweisen. Für die Versuchspunkte mit vertikaler Anregung wurde dabei im Mittel eine Standardabweichung von $\sigma = 7,3$ mm festgestellt und bei den Ergebnissen ohne vertikale Anregung lag diese im Mittel bei $\sigma = 0,5$ mm. Das Histogramm der Häufigkeitsverteilung der Residuen bestätigt diese Beobachtung durch einen breiten Randbereich der Verteilung. Aufgrund der Unterschiede in der Standardabweichung erfüllen die Versuchsdaten nicht die Voraussetzungen für eine Überprüfung auf statistische Signifikanz, entsprechend Abschnitt 3.7.6. Deshalb wird für die weitere Auswertung kein Anspruch auf eine statistische Korrektheit der Daten erhoben. Um dennoch eine überschlägige Beurteilung der Versuchsergebnisse unter Vorbehalt durchzuführen, wird für die folgende Auswertung die Annahme gleicher Standardabweichungen und einer Normalverteilung der Versuchsdaten getroffen.

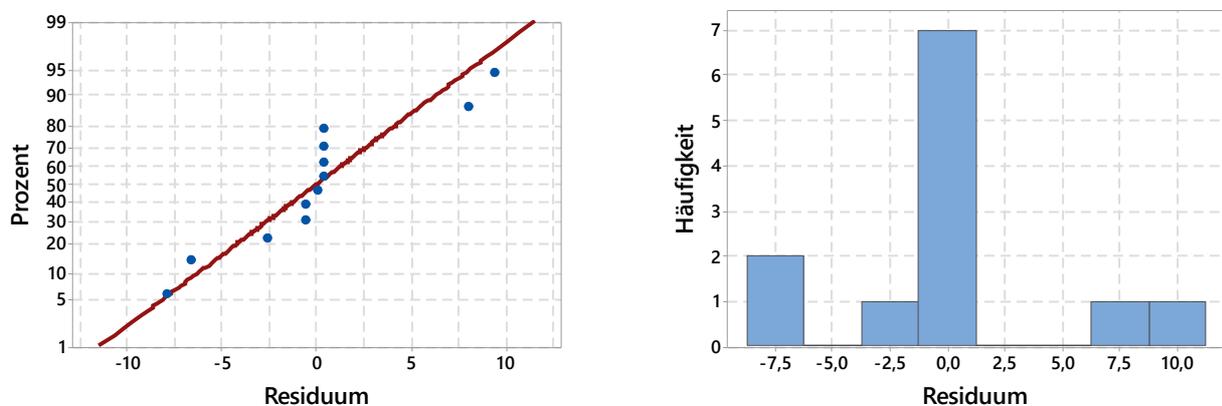


Abbildung 4-19 Wahrscheinlichkeitsnetz (links) und Histogramm (rechts) für die Residuen des Qualitätsmerkmals Verschiebung der RCU

Unter diesen Annahmen ist anhand der Abbildung 4-20 zu sehen, dass die vertikale Anregung (A) einen signifikanten Einfluss auf die Verschiebung der RCU hat. Die Zurrhöhe (B) und deren Wechselwirkung (AB) mit der vertikalen Anregung zeigen dagegen keinen erkennbaren Einfluss auf das Qualitätsmerkmal der Verschiebung der RCU. Deshalb wird auf eine weitere Betrachtung des Wechselwirkungsdiagramms verzichtet.

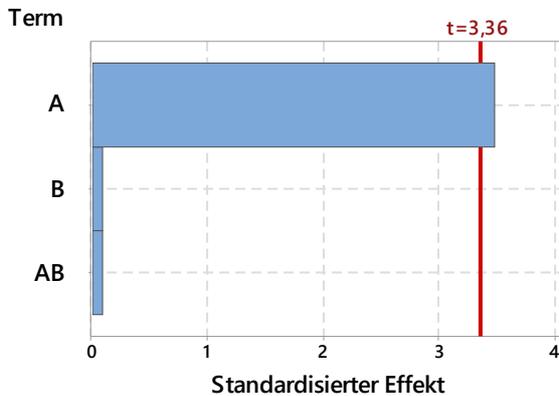


Abbildung 4-20 Balkendiagramm zur Beurteilung signifikanter Effekte und Wechselwirkungen. Faktoren: A – vertikale Anregung; B – Zurrhöhe; Signifikanzniveau – $\alpha = 0,01$

Das Effektdiagramm des Faktors der vertikalen Anregung in Abbildung 4-21 zeigt, dass bei der durchgeführten Versuchsreihe die vertikale Anregung im Mittel zu einer Zunahme von über 300 % der gemessenen Verschiebung führt. Die Verschiebung der RCU ohne vertikale Anregung von im Mittel 3,7 mm erhöhte sich dabei auf im Mittel 15,3 mm mit vertikaler Anregung, was einer absoluten Zunahme von 11,7 mm entspricht.

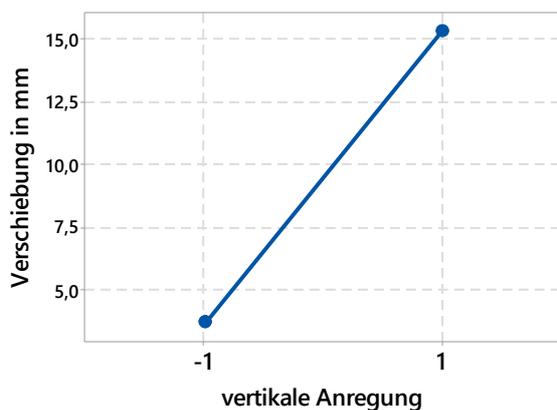


Abbildung 4-21 Effektdiagramm des Faktors vertikale Anregung

Die unter den beschriebenen Annahmen ermittelten Ergebnisse der Versuchsreihe Niederzurren zeigen, dass die berechnete Sicherungswirkung nach DIN 12195-1 bei erhöhten Reibwerten die vertikalen Anregungen nicht ausreichend berücksichtigt. Dagegen ist die Sicherungswirkung der berechneten Vorspannkraft bei niedrig angesetzten Reibwerten ausreichend, sodass hier die vertikalen Anregungen keine Beeinflussungen zeigen. Eine Wechselwirkung zwischen der Zurrhöhe und der vertikalen Anregungen wurde nicht festgestellt.

4.4 RCU ohne Sicherung

Im Versuch, der in diesem Abschnitt behandelt wird, wird die RCU ohne zusätzliche Sicherung auf der Ladefläche des HULK platziert. Anschließend wird die RCU mit und ohne vertikale Anregung verzögert und die Verschiebung der RCU gemessen, welche das Qualitätsmerkmal darstellt. Untersuchungen in dieser Form wurden bereits am HULK im Rahmen der Dissertation von Kamil Kloncki am FZD in Darmstadt durchgeführt. Dabei wurde ein signifikanter Unterschied der Verschiebung mit vertikaler Anregung beobachtet, der zu einer 17%igen weiteren Verschiebung gegenüber ohne vertikale Anregung führte¹¹⁰. Anknüpfend an diese Versuchsreihe werden im Rahmen dieser Arbeit weitere Versuche mit der angepassten vertikalen Anregung des Prüftisches durchgeführt.

4.4.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau mit der RCU (1) ist in Abbildung 4-22 dargestellt. Zur rückwärtigen Sicherung der RCU während der Beschleunigungsphase wird ein Sperrbalken (2) verwendet. Dieser wird so angebracht, dass die RCU mittig auf der Ladefläche des Prüftisches steht. Zwischen jedem Versuch wird die Differenz zwischen der Anfangs- und Endposition Δw_x der RCU betrachtet. Hierzu wird die RCU nach jedem Versuch wieder auf ihrer Ausgangslage positioniert. Zwischen der an der RCU befestigten Europalette und der Ladefläche sind drei Antirutschmatten unter jedem Fuß der Europalette untergelegt.

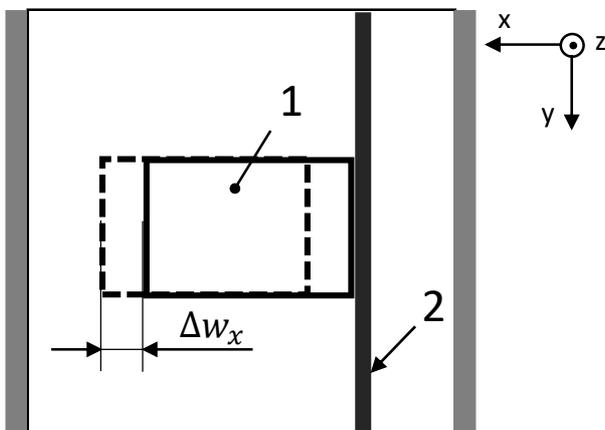


Abbildung 4-22 Versuchsaufbau RCU ohne Sicherung. (1) RCU; (2) Sperrbalken

4.4.2 Versuchsplan

Wie bereits erläutert, wird als Qualitätsmerkmal die Verschiebung der RCU Δw_x betrachtet. In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass eine Verschiebung der RCU während der Verzögerungsphase ohne die Verwendung von Antirutschmatten über die gesamte Länge der Ladefläche erfolgt. Dieses Verhalten wurde sowohl ohne als auch mit vertikaler Anregung beobachtet, wodurch eine Beurteilung hinsichtlich unterschiedlich großer Verschiebungen nicht möglich ist. Werden stattdessen An-

¹¹⁰ Vgl. Kamil, K.: Diss., Entw. einer Prüf- & Bewertungsmeth. für LaSiSysteme (2017), S. 91–95.

tirutschmatten verwendet, so ist die Verschiebung der RCU begrenzt, sodass eine Beurteilung der Verschiebung Δw_x ermöglicht wird.

Aus der Betrachtung der Energiebilanz der kinetischen Energie der RCU und der Reibungsarbeit durch die Verschiebung Δw_x mit dem Reibwert μ ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\frac{1}{2} \cdot m_{\text{RCU}} \cdot v_x^2 = m_{\text{RCU}} \cdot g \cdot \mu \cdot \Delta w_x \quad (4-4)$$

Danach hängt die Verschiebung Δw_x der RCU von der maximalen Geschwindigkeit des Prüfschlittens ab:

$$\Delta w_x = \frac{v_x^2}{2 \cdot g \cdot \mu} \quad (4-5)$$

Eine Verminderung der maximalen Geschwindigkeit v_x bietet die Möglichkeit, die Verschiebung der RCU ohne Antirutschmatten ebenfalls zu verringern, was allerdings eine Verkürzung der Verzögerungsphase zur Folge hat. Um dennoch die Versuchsreihe unter den gleichen horizontalen Verzögerungen wie die bereits betrachteten Versuchsreihen durchzuführen, wird die Versuchsreihe ausschließlich unter der Verwendung von Antirutschmatten durchgeführt. Darüber hinaus wurde in den Versuchen aus Abschnitt 4.2 eine verstärkende Wechselwirkung zwischen der Verwendung von Antirutschmatten und der vertikalen Anregung festgestellt, was auch hier zu erwarten ist.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Verschiebung der RCU auf der Ladefläche zu einem Einbruch der horizontalen Verzögerung führt. Dieses Verhalten verstärkt sich mit zunehmender Masse, sodass ausschließlich die geringste einstellbare Masse der RCU mit $m_{\text{RCU}} = 398 \text{ kg}$ betrachtet wird. Wird die Energiebilanz in Formel (4-4) betrachtet, so zeigt sich, dass sich die Masse der RCU m_{RCU} herauskürzen lässt und somit keinen Einfluss auf die Weite der Verschiebung der RCU Δw_x besitzt.

Aufgrund dieses Zusammenhangs wird im Rahmen des Versuchsplans die Verschiebung der RCU Δw_x abwechselnd ohne und mit vertikaler Anregung betrachtet. Durch diesen Wechsel der Faktorstufeneinstellung zwischen jedem Versuch besteht die Möglichkeit, einen Trend in den Ergebnissen zu erkennen. Der Versuchsumfang beträgt $N = 20$.

4.4.3 Auswertung

Aus den Messdaten der Versuchsreihe RCU ohne Sicherung wurde eine maximale Geschwindigkeit von $\bar{v}_{x,\text{max}} = (3,27 \pm 0,04) \text{ m/s}$ erreicht und anschließend mit einer minimalen Beschleunigung von $\bar{a}_{x,\text{Verzögerung}} = (-8,93 \pm 0,11) \text{ m/s}^2$ verzögert. Durch die vertikale Anregung wurde eine im Mittel um $0,06 \text{ m/s}^2$ betragsmäßig größere Amplitude der horizontalen Verzögerung festgestellt. Die negative Amplitude der vertikalen Beschleunigung mit Anregung lag in der Phase der maximalen Verzögerung bei $\bar{a}_{z,\text{min,mv}} = (-4,4 \pm 0,4) \text{ m/s}^2$. Ohne vertikale Anregung lagen sowohl die positive als auch die negative Amplitude der vertikalen Beschleunigung betragsmäßig unterhalb von 1 m/s^2 . Die entsprechenden Beschleunigungsverläufe sind im Anhang A7 dargestellt.

Im linken Diagramm in Abbildung 4-23 sind die Residuen über die Beobachtungsreihenfolge aufgetragen. Darin tendieren die Residuen zu größeren Werten mit fortschreitender Beobachtungsdauer, was das Anzeichen eines Trends darstellt.

Bei den markierten Versuchspunkten 13, 14 und 15 ist die Geschwindigkeit des Prüfschlittens $v_{x,max}$ unzulässig stark erhöht, was dem Diagramm rechts in Abbildung 4-23 zu entnehmen ist. Nach Formel (4-4) geht die Geschwindigkeit quadratisch in die Berechnung der resultierenden Verschiebung der RCU ein. Aus diesem Grund werden die Residuen der Verschiebung bei den Versuchspunkten 13, 14 und 15 als Ausreißer betrachtet.

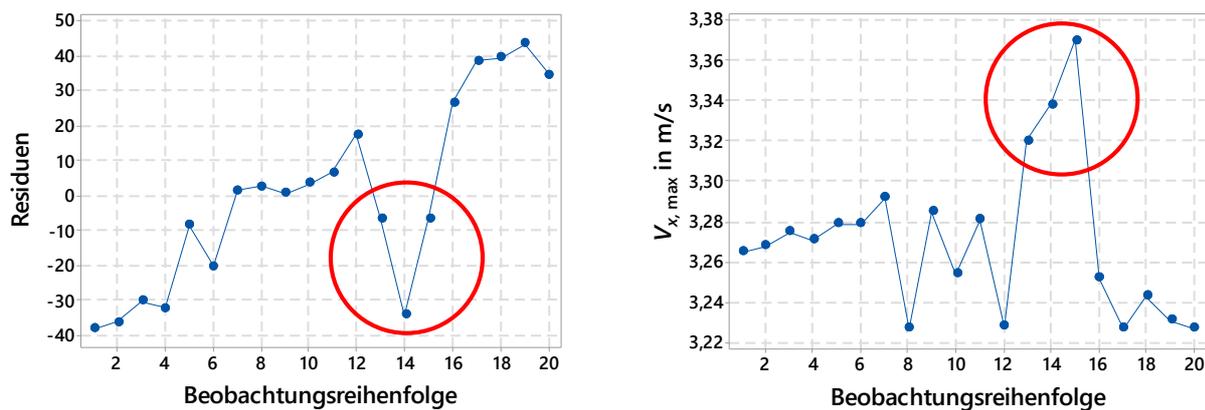


Abbildung 4-23 Residuen der Verschiebung (links) und maximale Geschwindigkeit des Prüfschlittens (rechts) über der Beobachtungsreihenfolge der Versuche

Eine mögliche Erklärung für den beobachteten Trend ist eine Veränderung des Reibwertes der Antirutschmatten. Mit fortschreitender Versuchsanzahl wurde eine Abnahme der Verschiebung Δw_x der RCU festgestellt, welches auf eine mögliche Veränderung des Reibwertes der Antirutschmatten hindeuten könnte.

Aufgrund der trendbehafteten Versuchsdaten und den damit verbundenen großen Standardabweichungen ist bei den Daten keine eindeutige Trennung des Effekts von der Streuung möglich. Aufgrund des Trends erfüllen die Versuchspunkte nicht den Voraussetzungen für eine Überprüfung auf statistische Signifikanz. Um dennoch eine Aussage über den Einfluss der vertikalen Anregung zu treffen, wird für die Versuchsdaten ein linearer Trend angenommen. Mit der „Methode der kleinsten Quadrate“ wird eine lineare Ausgleichsgerade der Versuchsdaten bestimmt, wobei die Ausreiser zuvor entfernt werden. Anhand der Ausgleichsgeraden wird anschließend der Trend der Versuchspunkte beseitigt. In Abbildung 4-24 (links) sind die Residuen der auf diese Weise korrigierten Versuchsdaten über der Beobachtungsreihenfolge aufgetragen, bei denen kein Trend mehr zu erkennen ist. Die korrigierten Versuchsdaten weisen näherungsweise eine Normalverteilung auf (siehe Abbildung 4-24 rechts). Die Standardabweichung der angepassten Versuchsdaten ohne vertikale Anregung liegt bei 6,4 mm und mit vertikaler Anregung bei 6,1 mm. Durch die Korrektur des Trends erfüllen die Versuchsdaten die Voraussetzungen für eine Überprüfung auf statistische Signifikanz. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die folgenden Resultate der statistischen Versuchs-

auswertung den Einflüssen der getroffenen Annahmen und Korrekturen unterliegen. Deren Gültigkeit ist in weiteren Forschungsvorhaben zu überprüfen.

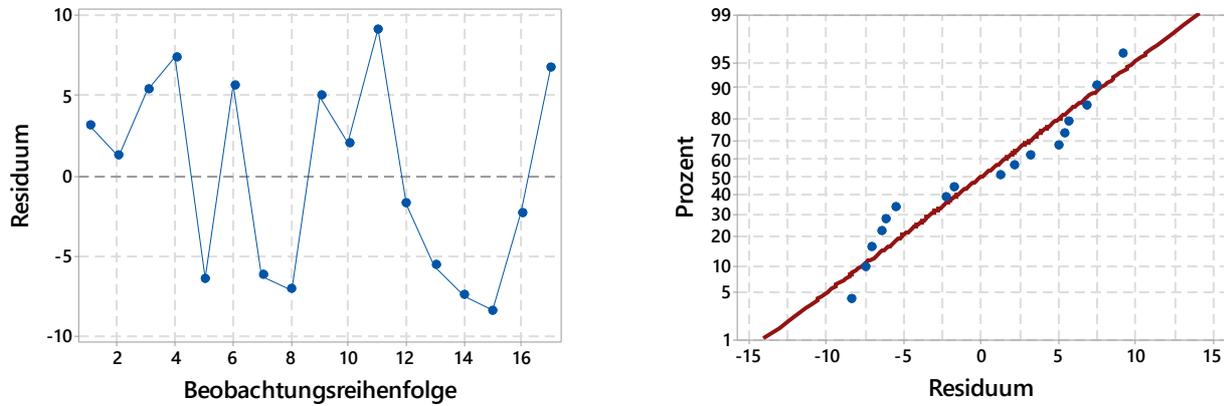


Abbildung 4-24 Residuen der Verschiebung über Beobachtungsreihenfolge (links) und Residuen der Verschiebung im Wahrscheinlichkeitsnetz (rechts) der korrigierten Versuchsdaten

In Abbildung 4-25 ist das Effektdiagramm der vertikalen Anregung mit Konfidenzintervall dargestellt. Der Faktor der vertikalen Anregung zeigt dabei einen signifikanten Einfluss auf das Qualitätsmerkmal der Verschiebung.

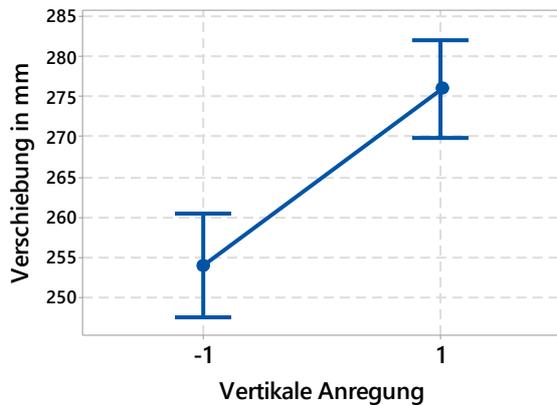


Abbildung 4-25 Effektdiagramm der vertikalen Anregung mit Konfidenzintervall (Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$)

Für den Vergleich der Mittelwerte der Verschiebung ohne und mit vertikaler Anregung werden die trendbehafteten Versuchsdaten ohne Ausreißer betrachtet. Hierbei wurde eine absolute Zunahme der Verschiebung von 15 mm durch die vertikale Anregung festgestellt, was einer relativen Zunahme von 7 % entspricht. Ohne vertikale Anregung lag dabei die Verschiebung im Mittel bei $w_x = 217$ mm und mit vertikaler Anregung bei $w_x = 232$ mm. Im Vergleich dazu wurden bei den Untersuchungen nach Klonecki¹¹¹ eine Erhöhung der relativen Verschiebung um 17 % festgestellt¹¹².

¹¹¹ Kamil, K.: Diss., Entw. einer Prüf- & Bewertungsmeth. für LaSiSysteme (2017), S. 91–95.

¹¹² Die Versuche wurden mit einem Metallgerüst ($m = 250$ kg) und ohne Antirutschmatten durchgeführt.

Als eine mögliche Erklärung für das Vorliegen der unterschiedlichen Ergebnisse ist die in Kapitel 2.4.2 beschriebene konstruktive Anpassung der vertikalen Anregung zu nennen. Durch diese Anpassung wird in der Phase der maximalen Verzögerung eine vollständige Schwingungsperiode der vertikalen Beschleunigung durchlaufen. Ohne diese Anpassung kam es zu einer negativen vertikalen Beschleunigungsamplitude, gefolgt von stoßartigen positiven Beschleunigungsspitzen, was bei Klonecki der Fall war. Nach Rakheja ist, wie in Abschnitt 2.4.2 erwähnt, der Mittelwert der Reibkraft nahezu unabhängig von den vertikalen Schwingungen¹¹³. Diese Annahme würde allerdings zur Folge haben, dass die Verschiebung der RCU unabhängig von der vertikalen Anregung ist (vergleiche Formel (4-4)). Durch die Anpassungen der vertikalen Anregung des Prüftisches aus Abschnitt 3.2 wird zunächst in der Phase der maximalen Verzögerung eine negative vertikale Beschleunigungsamplitude durchlaufen, was zu einer Verminderung der Reibkraft führt. In dieser Phase legt die RCU aufgrund ihrer größeren Ausgangsgeschwindigkeit eine größere Strecke zurück als in der Phase der verstärkt wirkenden Reibkraft durch die positive vertikale Amplitude. Dies ist eine mögliche Erklärung dafür, dass die Anpassung der vertikalen Anregung des Prüftisches die Folge der mit 7 % gemessenen geringeren relativen Verschiebung im Vergleich zu den zuvor gemessenen 17 % ist. Inwieweit die Reihenfolge der durchlaufenen vertikalen Beschleunigungsamplituden einen Einfluss auf die festgestellte Verschiebung der RCU haben, ist in zukünftigen Experimenten zu untersuchen.

4.5 Zusammenfassung Versuchsergebnisse RCU

Die Versuchsergebnisse der Versuchsreihen mit der RCU zeigten, dass die vertikale Anregung Auswirkungen bei der horizontalen Ladungssicherungsprüfung hat. Durch die vertikale Anregung war dabei eine Beeinflussung der Kippneigung der RCU bereits bei tieferen Schwerpunkthöhen zu beobachten, als bei den Versuchen ohne vertikale Anregung. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Vorversuche war festzustellen, dass durch die begrenzte Verzögerungsdauer der horizontalen Verzögerungsphase von ca. 300 ms kein Umkippen der RCU selbst mit einer rechnerisch kippgefährdeten Schwerpunkthöhe stattfand. Vielmehr kam es zu einem Ankippen, sodass es nicht möglich ist, eine eindeutige Aussage über die Kippstabilität der RCU mit dem Prüfstand zu treffen.

Bei der Versuchsreihe mit der Sicherungstechnik Blockieren wurde ein hoch signifikanter Effekt der vertikalen Anregung festgestellt, der im Mittel zu einer Steigerung der Blockierkraft um bis zu 18 % durch die vertikale Anregung führte. Außerdem wurden ebenfalls hoch signifikante Wechselwirkungen des Reibwerts bzw. der Ladelücke mit der vertikalen Anregung festgestellt. Der größte Effekt der vertikalen Anregung wurde bei der Verwendung von Antirutschmatten zwischen der RCU und dem Prüftisch sowie der Faktorstufeneinstellung „ohne Ladelücke“ gemessen. Unter dieser Faktorstufeneinstellung wurde eine Zunahme der Blockierkraft von bis zu 44 % beobachtet. Eine Wechselwirkung zwischen der Masse der RCU und der vertikalen Anregung wurde nicht festgestellt.

¹¹³ Rakheja, S. et al.: Friction coefficients und vertical vibrations (1997), S. 130–131.

Als zweite Sicherungstechnik wurde das Niederzurren in einer Versuchsreihe betrachtet. Hierbei wurde bei der direkten Platzierung der RCU auf der Ladefläche des Prüftisches, d.h. ohne die Verwendung von Antirutschmatten, keine Verschiebung beobachtet. Bei der Verwendung von Antirutschmatten wurde dagegen eine Zunahme der Verschiebung im Mittel um 11,7 mm durch die vertikale Anregung gemessen. Eine Wechselwirkung der vertikalen Anregung mit der Zurrhöhe wurde nicht festgestellt.

In einer letzten Versuchsreihe wurde die Verschiebung der RCU ohne Sicherung betrachtet. Hierbei wurde eine im Mittel um 7 % weitere Verschiebung der RCU durch die vertikale Anregung gemessen. Auch dieser Effekt war signifikant.

In Tabelle 10 ist eine Übersicht der Versuchsergebnisse der Versuchsreihen mit der RCU dargestellt.

Tabelle 10 Übersicht Versuchsergebnisse RCU

Versuchsreihe	Qualitätsmerkmal	Mittelwert der Messwerte		Relative Zunahme
		o. Vertikalanregung	m. Vertikalanregung	
RCU Blockieren				
gesamte Versuchsreihe $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$	Blockierkraft F_B	4027 N	4764 N	737 N (+18 %)
gesamte Versuchsreihe $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$		6196 N	6913 N	717 N (+12 %)
o. Ladelücke & m. Antirutschmatten $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$		2570 N	3702 N	1132 N (+44 %)
o. Ladelücke & m. Antirutschmatten $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$		4179 N	5359 N	1180 N (+28 %)
RCU Niederzurren				
m. Antirutschmatten	Verschiebung	3,7 mm	15,3 mm	11,7 mm (+316 %)
RCU ohne Sicherung				
m. Antirutschmatten	Verschiebung	217 mm	232 mm	15 mm (+7 %)

4.6 Spezielle Ladeeinheiten

Neben den Versuchsreihen mit RCU werden in den folgenden Versuchsreihen spezielle Ladeeinheiten untersucht, die in der Logistik Verwendung finden. Dabei wird im Besonderen der Einfluss der vertikalen Anregungen auf die Ladeeinheiten selbst betrachtet und nicht wie zuvor auf die verwendeten Sicherungstechniken. Die entsprechenden Beschleunigungsverläufe für die speziellen Ladeeinheiten befinden sich in Anhang A8 bis A10.

4.6.1 Sackware Kaliumsulfat

Als ein Stellvertreter für flexible Ladeeinheiten werden zwei Paletten mit 40 Säcken Kaliumsulfat untersucht. Kaliumsulfat ist ein kristallines Pulver und Bestandteil vieler Dünger¹¹⁴. Die Ladeeinheiten bestehen aus je acht gepackten Schichten mit je fünf Säcken pro Schicht, was in Abbildung 4-25 zu sehen ist. Die gestapelte Sackware ist mit Schrumpffolie sowie zwei Umreifungsbändern auf der Palette gesichert. Um die Sackware zu schützen, werden Kantenschoner zwischen Sackware und Umreifungsbänder untergelegt. Für die Untersuchung stehen zwei Ladeeinheiten des gleichen Typs zur Verfügung. Die Ladeeinheit 1 hat eine Masse von 1008 kg und Ladeeinheit 2 eine Masse von 1020 kg.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-26 dargestellt. Die Ladeeinheit wird mit einem Zurrurt und zwei weiteren Kantenschonern niedergezurrt. Außerdem werden zwischen der Palette und der Ladefläche des Prüftisches Antirutschmatten untergelegt. An beiden Enden des Zurrurts werden Kraftmessdosen zum Einstellen der Vorspannkraft sowie zur Messung des Vorspannkraftverlustes während den Untersuchungen angebracht. Rückseitig wird die Ladeeinheit durch einen Sperrbalken gegen eine Verschiebung in der Beschleunigungsphase gesichert. Die Ladeeinheit 1 wurde mit einer mittleren Vorspannkraft $\bar{F}_T = 4940$ N niedergezurrt, Ladeeinheit 2 mit einer mittleren Vorspannkraft von $\bar{F}_T = 4936$ N. Die Ladeeinheiten werden dabei unter einem Abspannwinkel von ca. $\gamma = 60^\circ$ und der Verwendung von Antirutschmatten $\mu_{\text{Norm}} = 0,5$ niedergezurrt, wodurch sich nach Formel (2-9) eine notwendige Vorspannkraft von 4333 N bzw. 4282 N für Ladeeinheit 2 ergibt. Somit gelten beide Ladeeinheiten entsprechend der Sicherungstechnik Niederzurren als gesichert.

¹¹⁴ Seilnacht, T.: Kaliumsulfat (2018).



Abbildung 4-26 Versuchsaufbau Sackware Kaliumsulfat

Um die Auswirkungen der vertikalen Anregungen festzustellen, werden die Versuche mit der Ladeeinheit 1 ohne vertikale Anregung und die Versuche der Ladeeinheit 2 mit vertikaler Anregung durchgeführt. Jede Ladeeinheit wird dreimal hintereinander getestet, ohne die Zurrgurte zwischen den Versuchen nachzuziehen. Als Qualitätsmerkmal wird die Verschiebung der Ladeeinheit auf drei Höhen betrachtet: Auf Höhe der Palette sowie auf einer Höhe von 400 mm und 800 mm.

Versuchsergebnisse

Bei den Versuchen führte die vertikale Anregung zu keinen auffälligen Unterschieden in Bezug auf das Qualitätsmerkmal Verschiebung. Sowohl mit also auch ohne vertikale Anregung lag die mittlere relative Verschiebung zwischen den Versuchen auf der Höhe von 400 mm und 800 mm bei 19,3 mm mit einer Standardabweichung von 1,7 mm. Auf Höhe der Palette wurden voneinander abweichende Verschiebungen gemessen. Hierbei wurde kein erkennbarer Unterschied zwischen den Versuchen mit und ohne vertikale Anregung festgestellt, weshalb auf eine statistische Auswertung der Ergebnisse verzichtet wird. Eine Übersicht der Einzelwerte der relativen Verschiebungen, deren Mittelwerte und Standardabweichung ist im Anhang A8 aufgeführt.

Neben der Verschiebung wurde auch für jeden Versuch der Kraftverlauf der Kraftmessdosen ausgewertet, die für die Einstellung der Vorspannkraften verwendet wurden. Dabei kommt es unabhängig von dem Faktor der vertikalen Anregung zu einer mittleren Reduktion der Vorspannkraft um ca. 28 % von Versuchsdurchlauf zu Versuchsdurchlauf. Die entsprechenden Vorspannkraften nach jedem Versuch sind ebenfalls im Anhang A8 ergänzt. Trotz der abnehmenden Niederzurrkraft wurde eine nahezu gleichbleibende Verschiebung der beiden Ladeeinheiten beobachtet. In Abbildung 4-27 ist exemplarisch der gemittelte Kraftverlauf des Zurrgurts für den dritten Versuchsdurchlauf mit vertikaler Anregung dargestellt. Dabei ist eine auffällige Kraftamplitude mit einer maximalen Kraft von 4460 N bei Sekunde 1,6 zu erkennen. Dies entspricht einer kurzzeitigen Zunahme der Niederzurrkraft um 65 % des Ausgangswertes der Vorspannkraft zu Beginn der Versuchsreihe. Bei der Videoanalyse des Versuchs wurde darüber hinaus eine elastische Verformung während der Verzö-

gerungsphase der Ladeeinheit festgestellt. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die elastische Verformung der Ladeeinheit und die damit verbundene Längung des Zurrurts zu dem kurzzeitigen Anstieg der Niederzurrkraft und somit zu einer zusätzlichen Sicherungswirkung führte. Dieses Verhalten wurde bei allen sechs Versuchspunkten unabhängig von der Faktoreinstellung der vertikalen Anregung beobachtet. Die entsprechenden Werte der maximalen Kraftamplitude sind in der Tabelle 25 im Anhang A8 ergänzt.

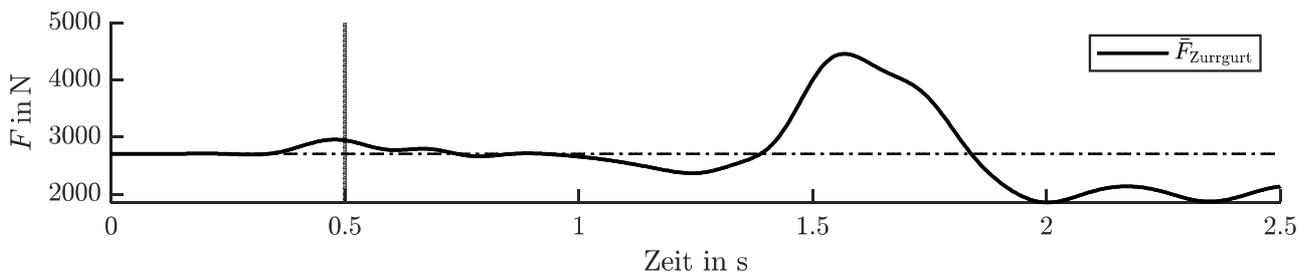


Abbildung 4-27 Gemittelter Kraftverlauf der Zurrurte während der Prüfung, Versuchspunkt 3 der Ladeeinheit 2

4.6.2 Stahlspundfässer auf Europalette

Als weiterer Stellvertreter für spezielle Ladeeinheiten werden zwei Stahlspundfässer getestet, die jeweils ein Fassungsvermögen von 220 l haben. Für die Prüfung werden die Fässer mit Wasser gefüllt, sodass sich ein Gesamtgewicht der Ladeeinheit von 488 kg ergibt. Die Fässer werden zur Sicherung auf einer Europalette mit einem Drumguard® Duo Multi¹¹⁵ fixiert, siehe Abbildung 4-28. Hierzu wird zwischen den beiden Fässern das in Abbildung 4-28 markierte Blechteil aufgelegt, welches in den beiden oberen Rändern der Fässer verankert ist. Durch eine Spezialschraube, die in der Mitte der Europalette eingeschraubt wird, wird das Blechteil in Richtung Palette gezogen. Dadurch erfahren die beiden Fässer eine erhöhte Anpresskraft auf die Palette und sichern auf die Fässer auf diese Weise auf der Palette. Die Schraube wird dabei mit einem Drehmoment von 35 Nm angezogen.

¹¹⁵ Strauch GmbH: Arbeitsanleitung Drumguard® Metall.

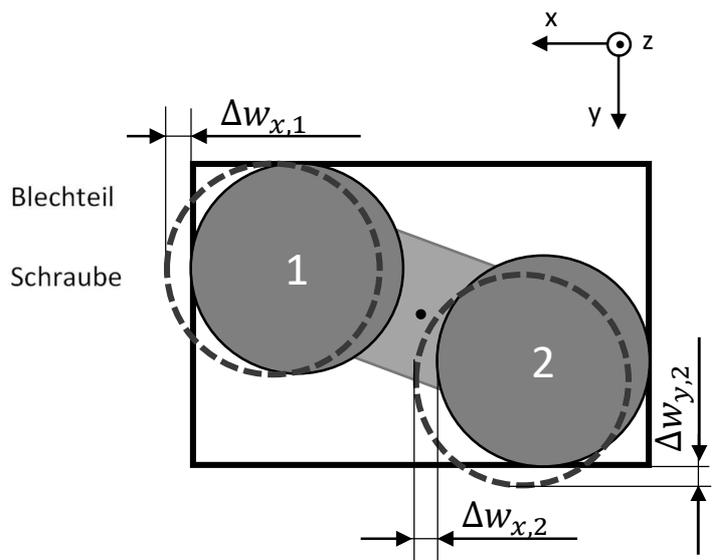


Abbildung 4-28 Versuchsaufbau Stahlspundfässer(links) und gemessene Verschiebungen (rechts)

Um die Ladeeinheit auf dem Prüftisch zu sichern wird, am Fuß der Palette ein Sperrbalken angebracht. Analog zu dem Versuchsaufbau „Kippneigung“, wird zur Sicherung der Ladeeinheit während der Beschleunigungsphase ein Zurrgerät auf Höhe der Palette angebracht. Dieser wird an beiden Enden am Sperrbalken befestigt (siehe Abbildung 4-28 links), um ein Verrutschen der Palette zu verhindern.

Für die Versuchsreihe werden sowohl ohne als auch mit vertikaler Anregung jeweils drei Versuche hintereinander durchgeführt. Dabei werden für jede Faktorstufe (mit/ ohne vertikale Anregung) die beiden Fässer neu auf der Palette ausgerichtet und mit dem Drumguard®-System, wie bereits beschrieben, gesichert. Zwischen den drei Einzelversuchen erfolgt keine Veränderung an der Sicherung. Um eine mögliche Verschiebung der Fässer festzustellen, werden die Positionen der beiden Fässer auf der Palette markiert. Nach jedem durchgeführten Versuch wird die Verschiebung dokumentiert.

Versuchsergebnisse

In Tabelle 11 sind die Versuchsergebnisse der Verschiebungen aufgelistet. Die entsprechenden gemessenen Verschiebungen sind der Abbildung 4-28 (rechts) zu entnehmen. Das in Prüfrichtung hintere Fass (2) zeigte sowohl ohne als auch mit vertikaler Anregung neben der Verschiebung in Prüfrichtung $\Delta w_{x,2}$ auch eine Verschiebung quer zur Prüfrichtung $\Delta w_{y,2}$. Eine mögliche Erklärung hierfür ist das Wegdrehen des Fasses (2) durch seine außermittige Platzierung gegenüber dem Drumguard®-System auf der Palette. Ein Vergleich der beiden ersten Versuchsdurchläufe ohne und mit vertikaler Anregung zeigt, dass mit vertikaler Anregung eine deutlich größere Verschiebung bei allen drei Messstellen vorlag. Für die Verschiebung des hinteren Fasses (2) zeigten auch die weiteren beiden Versuche eine ebenfalls größere Werte. Dagegen wurde für die Verschiebung des vorderen Fasses (1) für die beiden weiteren Versuchsdurchläufe annähernd gleiche Verschiebungen ohne

und mit vertikaler Anregung gemessen. Eine mögliche Erklärung dafür ist die Erhöhung der Anpresskraft durch das Drumguard®-System aufgrund der bereits erfolgten Verschiebung.

Tabelle 11 Versuchsergebnisse relative Verschiebungen Stahlspundfässer

	Versuch Nr.	Verschiebung in mm		
		$\Delta w_{x,1}$	$\Delta w_{x,2}$	$\Delta w_{y,2}$
Ladeinheit 1 ohne vertikale Anregung	1	0	4	4
	2	1	3	4
	3	2	2	3
Ladeinheit 2 mit vertikaler Anregung	1	33	20	27
	2	2	14	18
	3	1	10	12

Da jede Ladeinheit nur einmalig getestet wurde, liegen keine Ergebnisse zur Streuung der Verschiebungen vor. Aus diesem Grund besteht nicht die Möglichkeit, eine statistische Aussage über die Signifikanz der festgestellten Unterschiede in den Verschiebungen zu machen. Dennoch ist eine Tendenz in den Verschiebungen zu erkennen, die auf einen Einfluss durch die vertikale Anregung hindeutet.

4.6.3 Kunststofffässer L-Ring auf Europalette

Neben den Stahlspundfässern werden auch zwei Kunststofffässer vom Typ L-Ring mit einem Fassungsvermögen von 220 l untersucht. Diese werden entsprechend dem vorherigen Versuch ebenfalls mit einem Drumguard® Duo Multi auf der Palette gesichert. Die einzige Änderung zu dem vorherigen Versuchsaufbau liegt dabei in der Verwendung einer speziellen Antirutschmatte zwischen den Fässern und der Palette entsprechend der Arbeitsanleitung des Herstellers¹¹⁶. Durch diese Antirutschmatten wird der Reibwert zwischen den Fässern und der Palette erhöht. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-29 (links) dargestellt. Die Versuchsreihe wird analog zur Versuchsreihe Stahlspundfässer durchgeführt.

¹¹⁶ Strauch GmbH: Drumguard® L-Ring-Fass.

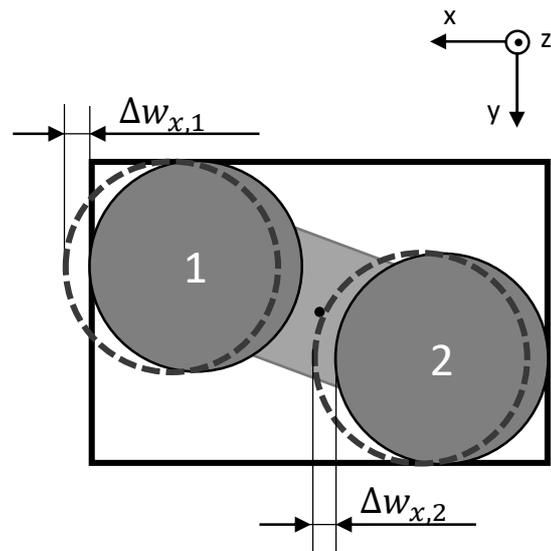


Abbildung 4-29 Versuchsaufbau Kunststofffässer mit Antirutschmatte (links) und gemessene Verschiebungen (rechts)

Versuchsergebnisse

In Tabelle 12 sind Ergebnisse die gemessenen Verschiebungen der Versuchsreihe dargestellt. Bei dieser Versuchsreihe wurde im Vergleich zu den Versuchen mit den Stahlspundfässern nur eine Verschiebung der Fässer in Prüfrichtung gemessen (siehe Abbildung 4-29). Unabhängig von der Einstellung der vertikalen Anregung wurde bereits nach jeweils zwei Versuchsdurchläufen abgebrochen, um eine Beschädigung an den Fässern zu verhindern. Ein Vergleich der beiden ersten Versuchsdurchläufe zeigt, dass keine auffälligen Verschiebungen ohne und mit vertikaler Anregung zu erkennen sind. Der zweite Versuchsdurchlauf zeigt zwar mit vertikaler Anregung größere Verschiebungen, die aufgrund der unterschiedlichen Ausgangssituation sowie fehlender Erkenntnisse über die Streuung der Ergebnisse nicht als Tendenz der vertikalen Anregung interpretiert werden.

Tabelle 12 Versuchsergebnisse relative Verschiebungen Kunststofffässer L-Ring

	Versuch Nr.	Verschiebung in mm	
		$\Delta w_{x,1}$	$\Delta w_{x,2}$
Ladeinheit 1 ohne vertikale Anregung	1	85	35
	2	10	35
Ladeinheit 2 mit vertikaler Anregung	1	85	25
	2	35	90

5 Diskussion der Ergebnisse

Die Grundlage für die in dieser Masterarbeit untersuchten vertikalen Anregungen bildeten die bei den Lkw-Fahrversuchen festgestellten abklingenden vertikalen Beschleunigungsschwingungen. Durch den Umbau des Anregungskonzeptes des Prüfstands HULK wurde erreicht, dass die vertikale Anregung des Prüfstands eine geeignete Versuchsumgebung darstellt und die bei den Fahrversuchen gemessenen Beschleunigungsschwingungen näherungsweise abbildet. Somit bestand die Möglichkeit, die Auswirkungen der vertikalen Anregungen auf dem Prüfstand HULK zu untersuchen. Hierzu wurde ausgehend von den Fahrversuchen eine negative vertikale Beschleunigungsamplitude von -4 m/s^2 als untere Grenze gefordert. Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurde die geforderten -4 m/s^2 der negativen vertikalen Beschleunigungsamplitude je nach Versuch mit $\bar{a}_{z,\text{min,mv}} = -4,4 \text{ m/s}^2$ bis zu $\bar{a}_{z,\text{min,mv}} = -5,62 \text{ m/s}^2$ unterschritten und es lagen betragsmäßig zu hohe Amplituden vor. Eine Erklärung für die unterschiedlichen mittleren Beschleunigungsamplituden sind die unterschiedlichen Beschleunigungsverläufe der einzelnen Versuche. Die unterschiedlichen Verläufe sind dabei dadurch bedingt, dass für jede Versuchsreihe ein eigenes, für den Versuch angepasstes Beschleunigungsprofil verwendet wurde. Für die horizontale Prüfverzögerung wurde entsprechend der DIN EN 12195-1 die Verzögerung von $7,85 \text{ m/s}^2$ ($0,8 \text{ g}$) für die Versuche gewählt, entsprechend dem Fahrmanöver Vollbremsung. Für die Versuchsreihen mit der RCU wurden dabei mittlere horizontale Verzögerungen in einem Bereich zwischen $\bar{a}_{x,\text{Verzögerung}} = -8,17 \text{ m/s}^2$ und $\bar{a}_{x,\text{Verzögerung}} = -9,15 \text{ m/s}^2$ gemessen. Dies zeigt, dass zukünftig für eine Vergleichbarkeit mit Fahrversuchen sowie der Versuche untereinander weitere Optimierungen hinsichtlich der Steuerung bzw. Regelung der horizontalen Beschleunigung sowie der Konzeptionierung neuer Anregungsprofile notwendig sind.

Für die Untersuchung der grundlegenden Einflüsse der vertikalen Anregung wurde die Research Cargo Unit konzipiert und realisiert. Diese hat sich bei der Benutzung der Versuchsreihen bewährt. Durch die gleichbleibenden Eigenschaften war eine Reproduzierbarkeit seitens der Ladeeinheit gegeben. Die RCU bietet somit eine gute Ausgangslage, um weitere Forschungsvorhaben auf dem HULK durchzuführen.

Die Versuche mit den speziellen Ladeeinheiten in Abschnitt 4.6 haben gezeigt, dass für eine Untersuchung eine Vielzahl von Ladeeinheiten eines gleichen Typs notwendig sind, um eine Aussage über die Streuung der Ergebnisse zu ermöglichen. Stehen dagegen in den Versuchsreihen der speziellen Ladeeinheiten jeweils nur zwei Ladeeinheiten zur Verfügung, besteht nicht die Möglichkeit, eine statistische Aussage über tatsächliche Unterschiede durch die vertikale Anregung zu treffen.

Die Untersuchung der Kippneigung hat gezeigt, dass mit vertikaler Anregung eine Kippneigung bereits bei niedrigeren Schwerpunktlagen besteht als ohne vertikale Anregung. Trotz der eingeschränkten Aussage über ein Umkippen der Ladeeinheit durch die begrenzte Verzögerungsdauer des Prüftisches besteht bereits bei einem Ankippen einer Ladeeinheit die Gefahr, diese zu beschädigen. Deshalb ist es empfehlenswert, den Einfluss der vertikalen Anregung bei der Betrachtung der Kippneigung zu berücksichtigen. Im Rahmen weiterer Forschungsvorhaben ist dabei zu untersu-

chen, ab welcher Schwerpunkthöhe das Ankippen zu einem Umkippen der Ladeeinheit bei einer längeren Verzögerungsdauer führt.

Sowohl beim Blockieren als auch beim Niederzurren wird für die Berechnung der notwendigen Sicherungswirkung die Reibkraft durch die Masse der Ladeeinheit berücksichtigt. Bei der Versuchsreihe „Blockieren“ wurde insbesondere bei der Verwendung von Antirutschmatten und ohne Ladelücke der größte Effekt durch die vertikale Anregung beobachtet. Bei der eingestellten Masse der RCU von 398 kg kam es zu einem Anstieg der Blockierkraft von 1132 N durch die vertikale Anregung. Unter der Annahme eines Reibwerts von $\mu = 0,5$ für die Verwendung von Antirutschmatten ergibt sich nach Formel (2-3) eine Reibkraft von 1952 N, die bei der Berechnung der notwendigen Blockierkraft der Blockiervorrichtung berücksichtigt wird. Unter dieser Annahme führte die vertikale Anregung somit zu einer Verminderung der wirkenden Reibkraft um über 50 %. Unter der Annahme gleicher Versuchsbedingungen wurde eine Zunahme der Effekte mit zunehmender Masse erwartet, was jedoch nicht beobachtet wurde. Aus den vorliegenden Daten ging keine abschließende Erklärung für diesen Zusammenhang hervor, sodass dies in zukünftigen Forschungsvorhaben dies näher zu untersuchen ist. Dabei ist der Einfluss der Kippneigung der RCU durch die vertikale Anregung bereits bei niedrigeren Schwerpunkthöhen zu berücksichtigen.

Bei der Untersuchung der Auswirkungen der vertikalen Anregung und der Ladelücke auf die Blockierkraft der RCU hat sich gezeigt, dass eine Ladelücke von 20 mm zu einer Abschwächung des Effekts der vertikalen Anregung führte. Zusammen mit den Ergebnissen aus der Versuchsreihe „RCU ohne Sicherung“, bei der eine Zunahme der Verschiebung der RCU um ca. 7 % durch die vertikale Anregung beobachtet wurde, ist der Zusammenhang zwischen dem vertikalen Beschleunigungsverlauf in der Verzögerungsphase und den Verschiebungen der RCU weiter zu untersuchen.

Unabhängig von den eingestellten Faktoren wurde die nach DIN 12195-1:2010 berechnete notwendige Blockierkraft in allen Versuchspunkten überschritten, was auf eine Unterdimensionierung des Berechnungsmodells hinweist. Die entsprechende prozentuelle Überhöhung der berechneten Blockierkraft ist in Tabelle 24 im Anhang A5.8 ersichtlich. Dabei wurde eine Zunahme der gemessenen Blockierkraft gegenüber der berechneten Blockierkraft von mindestens 66% und maximal bis zu 307 % festgestellt. Eine umfassende Untersuchung über die Ursachen dieser Ergebnisse übersteigt den Rahmen dieser Arbeit, jedoch ist eine mögliche Erklärung das Fehlen dynamischer Effekte bei der Berechnung der notwendigen Blockierkraft DIN 12195-1:2010.

Bei der Versuchsreihe „Niederzurren“ wurde der Einfluss der vertikalen Anregung auf die Verschiebung ausschließlich bei der Verwendung von Antirutschmatten beobachtet. Dies zeigt die Abhängigkeit der Sicherungswirkung vom für die Berechnung der Vorspannkraft verwendeten Reibwert. Die maximal gemessene Verschiebung der RCU lag mit vertikaler Anregung mit 25 mm auf der Höhe der Palette nach der EUMOS 40509¹¹⁷ im zulässigen Bereich¹¹⁸. Inwieweit eine höhere Ausgangsgeschwindigkeit sowie eine längere Verzögerungsdauer, wie sie bei Fahrversuchen vorliegen, zu größeren Verschiebung gegenüber dem Prüfstand führen, gilt es zu klären.

¹¹⁷ EUMOS: EUMOS 40509 - Test method for unit rigidity (2012), S. 6.

¹¹⁸ Zulässig Verschiebung der unteren 20 cm der Ladeeinheit darf maximal 40 mm betragen.

6 Fazit und Ausblick

6.1 Fazit

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden durch experimentelle Versuche die Auswirkungen von vertikalen Anregungen bei der horizontalen Ladungssicherungsprüfung untersucht. Hierzu wurde als Untersuchungswerkzeug der Beschleunigungsschlittenprüfstand HULK verwendet, der die Möglichkeit bietet, neben der horizontalen Verzögerung auch eine simultane vertikale Anregung darzustellen.

Bei der Durchführung von Lkw-Fahrversuchen wurden insbesondere bei dem Fahrmanöver Vollbremsung eine abklingende vertikale Beschleunigungsschwingung des voll beladenen Aufbaus der Ladefläche mit einer Frequenz von ca. 1,9 Hz gemessen. Mit zunehmender Ausgangsgeschwindigkeit des Lkws bei der Vollbremsung wurde ein Anstieg der Beschleunigungsamplituden beobachtet. Bei der Ausgangsgeschwindigkeit von 80 km/h wurde dabei eine im Mittel bis zu 34%ige Verminderung der auf die Ladung wirkenden Erdbeschleunigung gemessen. Anhand bestehender Forschungsergebnisse wurden diese Phasen der Beschleunigungsamplituden als Phasen einer vermindert wirkenden Reibkraft zwischen Ladung und Ladefläche identifiziert. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde die vertikale Anregung des Prüfstands analysiert und durch Anpassungen des Anregungskonzepts sowie der Gestaltung neuer Anregungsprofile eine Annäherung an das beobachtete vertikale Schwingungsverhalten der Lkw-Fahrversuche umgesetzt. Dabei wurde erreicht, dass der Prüftisch während der maximalen Prüfverzögerung eine vollständige vertikale Schwingungsperiode mit Phasen verminderter sowie verstärkt wirkender Reibkraft durchläuft. Anders als bei den Fahrversuchen wurde eine Schwingungsfrequenz von ca. 3,5 Hz erreicht, sodass die genannten Phasen kürzer ausfallen im Vergleich zu den Fahrversuchen mit dem Lkw.

Die zur Ladungssicherung relevanten Prüfnormen und Richtlinien wurden durch eine Literaturrecherche auf eine Berücksichtigung vertikaler Anregungen hin analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass bei der Berechnung der Sicherungskräfte der verschiedenen Sicherungstechniken der Einfluss vertikaler Anregung in den Normen und Richtlinien nur bedingt berücksichtigt wird. Des Weiteren wurde ausgehend von einer Klassifizierung unterschiedlicher Ladeeinheiten eine Research Cargo Unit (RCU) mit einstellbaren Eigenschaften entwickelt und umgesetzt. Auf Grundlage dieser starren Ladeinheit wurden Versuche entwickelt, um den grundlegenden Einfluss vertikaler Anregungen sowie ausgewählter Sicherungstechniken zu untersuchen. Die Erstellung der Versuchspläne und die Auswertungen erfolgte gemäß den Methoden der statistischen Versuchsplanung.

Bei der Untersuchung der Kippneigung der RCU wurde zunächst festgestellt, dass selbst bei einer nicht standsicher eingestellten Schwerpunkthöhe nur ein Ankippen der RCU stattfindet, was mit der begrenzten Verzögerungsdauer des Prüfstands begründet wird. Mit vertikaler Anregung wurde ein Ankippen der RCU bei Schwerpunkthöhen beobachtet, bei denen ohne vertikale Anregung keine Kippneigung festgestellt wurde.

Bei der Untersuchung der Blockierkraft durch die Sicherungstechnik Blockieren wurde ein hoch signifikanter Effekt der vertikalen Anregung festgestellt, der zu einer Zunahme der Blockierkraft im

Mittel von bis zu 18 % führte. Darüber hinaus wurde eine ebenfalls hoch signifikante Wechselwirkung sowohl zwischen der vertikalen Anregung und dem Reibwert als auch zwischen der vertikalen Anregung und einer Ladelücke festgestellt. Unter der Verwendung von Antirutschmatten sowie der Platzierung der RCU unmittelbar ohne Ladelücke an einem Sperrbalken wurde die größte Zunahme der Blockierkraft von bis zu 44 % festgestellt. Hervorzuheben ist bei den Ergebnissen, dass eine gleichbleibende absolute Zunahme der Blockierkraft durch die vertikale Anregung unabhängig von der eingestellten Masse der RCU beobachtet wurde. Um eine Beurteilung dieses Zusammenhangs zu ermöglichen, sind im Rahmen weiterer Forschungsvorhaben geeignete Untersuchungen durchzuführen.

Bei der Versuchsreihe mit der Sicherungstechnik Niederzurren wurde bei der Verwendung von Antirutschmatten zwischen der RCU und Ladefläche des Prüftisches ein signifikanter¹¹⁹ Effekt der Verschiebung durch die vertikale Anregung festgestellt. Die absolute Zunahme der Verschiebung lag im Mittel bei 11,7 mm, was einer relativen Zunahme von über 300 % entspricht. Dagegen wurde ohne Antirutschmatten keine Verschiebung der RCU, unabhängig von der Einstellung der anderen Faktoren, festgestellt. Außerdem wurde in einer weiteren Versuchsreihe die maximale Verschiebung der RCU ohne zusätzliche Sicherung bei alleiniger Verwendung von Antirutschmatten untersucht. Dabei wurde ein signifikanter¹¹⁹ Effekt festgestellt, der zu einer Zunahme der maximalen Verschiebung der RCU von 7 % führte.

Neben den Versuchen mit der RCU wurden außerdem Versuche mit speziellen Ladeeinheiten durchgeführt, die in der Logistik Verwendung finden. Bei zwei Versuchsreihen mit einer Palette mit Sackware sowie einer Palette mit Kunststofffässern wurde dabei kein Einfluss durch die vertikale Anregung festgestellt. Dagegen zeigte sich bei der Versuchsdurchführung mit einer Palette Stahlspundfässer eine Beeinflussung durch die vertikale Anregung. Die Fässer zeigten dabei die Tendenz zu verrutschen.

Die Ergebnisse der Prüfstandsuntersuchungen haben gezeigt, dass die vertikale Anregung einen Einfluss insbesondere auf die Sicherungswirkung der in DIN 12195-1 verwendeten Sicherungstechniken hat. Aus diesem Grund ist eine Beachtung der vertikalen Anregungen auch im Bereich des Straßentransports anzuraten. Dies wird in anderen Ländern bereits berücksichtigt, Deutschland beschränkt sich derzeit auf den Bahn- und Schiffsgütertransport.

¹¹⁹ Für die Überprüfung auf statistische Signifikanz wurden Annahmen getroffen.

6.2 Ausblick

Die experimentelle Untersuchung hat gezeigt, dass bei unterschiedlichen Sicherungstechniken die vertikale Anregung einen Einfluss auf die jeweilige Sicherungswirkung hat. Die umgesetzte vertikale Anregung des Prüfstands stellt dabei eine Annäherung an die bei dem Lkw-Fahrmanöver Vollbremsung festgestellten abklingenden vertikalen Beschleunigungsschwingungen dar. Diese sind zukünftig durch weitere Fahrversuche zum Beispiel hinsichtlich des verwendeten Fahrzeugtyps, der Ausgangsgeschwindigkeit oder der Art der Fahrbahnunebenheiten zu untersuchen, um die gemessenen Variationen in den vertikalen Beschleunigungsamplituden zu quantifizieren.

Die Versuche am Prüfstand sind durch ein erweitertes Anregungskonzept zu ergänzen, sodass die Möglichkeit besteht, Variationen der vertikalen Amplitude sowie des Anregungszeitpunktes zu betrachten.

A Anhang

A1 Technische Zeichnungen Anregungsprofile

A1.1 Anregungsprofil 3

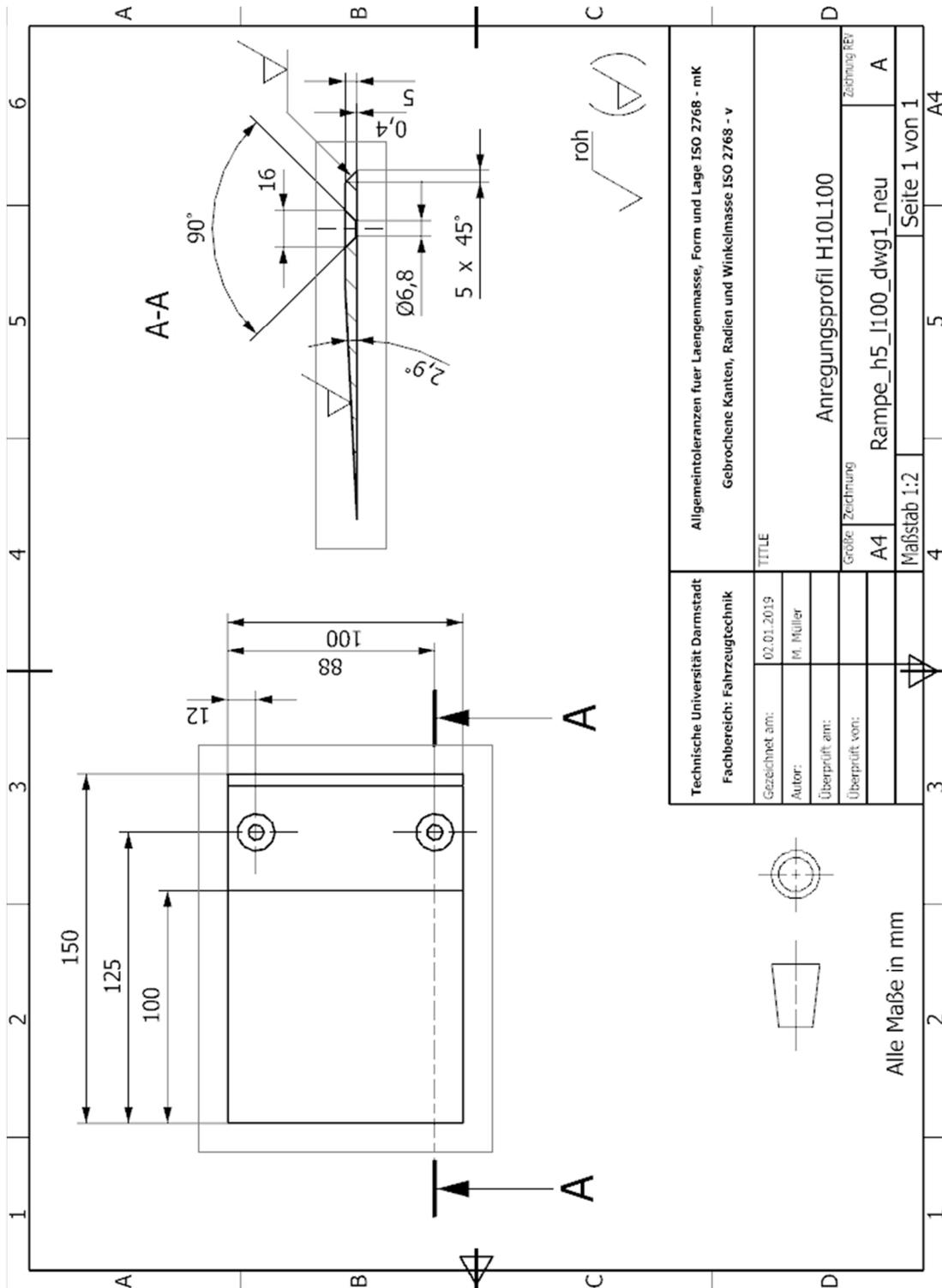


Abbildung A-1 Technische Zeichnung des Anregungsprofils 3

A1.2 Anregungsprofil 4

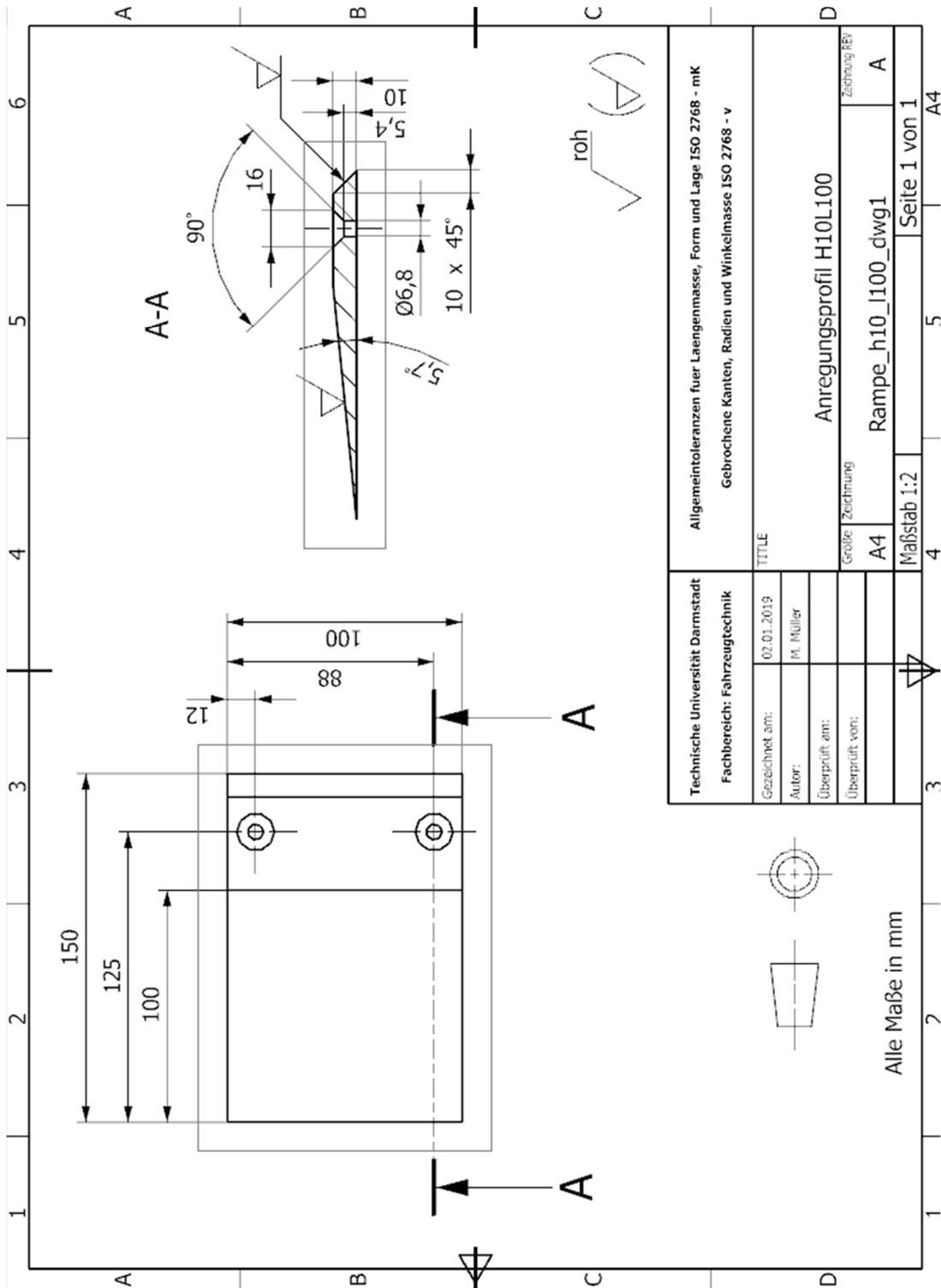


Abbildung A-2 Technische Zeichnung des Anregungsprofils 4

A2 Schwerpunktbestimmung RCU

A2.1 Versuchsaufbau Schwerpunktbestimmung RCU



Abbildung A-3 Versuchsaufbau zur Schwerpunktbestimmung der RCU, lange Seite der RCU



Abbildung A-4 Versuchsaufbau zur Schwerpunktbestimmung der RCU, kurze Seite der RCU

A2.2 Dokumentation Schwerpunktbestimmung

Im Folgenden sind die Ergebnisse die Schwerpunktbestimmung der RCU für den Kippversuch protokolliert. Die Abstände zwischen den Anschlagpunkten der Ringmuttern an der RCU betragen horizontal 1220 mm bzw. 820 mm. Der vertikale Abstand vom Fuß der RCU bis zu dem Anschlagpunkt beträgt 1430 mm. Die Schwerpunkthöhe wurde sowohl für die lange Seite als auch für die kurze Seite der RCU durchgeführt. Der daraus gebildete Mittelwert wird als Grundlage für die verwendete Schwerpunktlage in der Arbeit verwendet. Die horizontale Lage des Schwerpunkts x_S bzw. $x_{S,RCU}$ bezieht sich auf die Seite der RCU, an der die Kurbel angebracht ist.

Tabelle 13 Gemessene Winkel und daraus berechnete Schwerpunktlage der RCU ohne Gewichtsplatten/Plattenträger

	β_1 in °	β_2 in °	Bemerkung	z_S in mm	x_S in mm
$m_{RCU} = 381$ kg ohne Gewichtsplatten/ Plattenträger	25,85	25,2	Kurze Seite der RCU	571	-
	35,2	36,6	Lange Seite der RCU	587	584
	Mittelwert			579	584

Tabelle 14 Berechnete Schwerpunktlage der RCU mit $m_{RCU} = 595$ kg und $m_P = 214$ kg

Schwerpunkthöhe Patten	$z_{S,RCU}$ in mm	$x_{S,RCU}$ in mm
$z_P = 750$ mm	640	590
$z_P = 410$ mm	518	590

Matlab Code zur Schwerpunktbestimmung:

```

%% RCU beladen zp=410 m=595 kg
%beta1_=25.85;      % beta 1 Kurbel auf Stirnseite
%beta2_=25.2;      % beta 2 ggü.
%b=820;           % Abstand zwischen Aufhängepunkten

beta1_=35.2;      % alpha 1 auf Kurbelseite
beta2_=36.6;      % alpha 2 ggü.
b=1220;          % Abstand zwischen Aufhängepunkten
h=1430;

%% Berechnung
a1=90- beta1_;
a2=90- beta2_;
zs= -(b*tand(beta1)/(1+tand(beta1)/tand(beta2)))+h;
round(zs,2)

if b==1220
    xs=b/(1+tand(a1)/tand(a2));
    xs=xs-10; %Korrektur des Versatz der Anschlagpunkte
    round(xs,2)
end

%% Berechnung Gesamtschwerpunkt

mp=214; zp=410; % Gewichtsplatten inkl. Plattenträger
ms=381; xs=600; % RCU leer

mges=mp+ms;

z_s_rcu=(mp*zp+ms*zs)/mges
if b==1220
x_s_rcu=(mp*xp+ms*xs)/mges
end

```

A3 Reibwertabschätzung

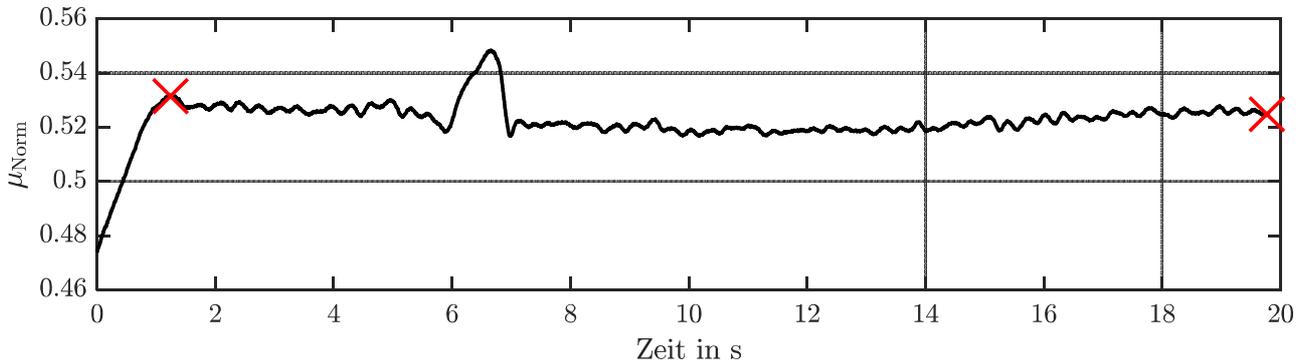


Abbildung A-5 Auswertung Zugversuch unter Verwendung von Antirutschmatten zwischen der an der RUC befestigten Europalette und der Ladefläche des Prüftisches¹²⁰

A4 Tabelle der studentischen t-Verteilung

Tabelle 15 Tabelle mit t-Werten. ($S = 1 - \alpha$)¹²¹

	S = 68,269 %	95,000 %	95,450 %	99,000 %	99,730 %	99,9 %
FG = 1	1,837	12,706	13,968	63,657	235,801	636,62
2		4,303		9,925		31,60
3	1,197	3,182	3,307	5,841	9,219	12,92
4		2,766		4,604		8,610
5	1,111	2,571	2,649	4,032	5,507	6,869
6		2,447		3,707		5,959
7	1,077	2,365	2,429	3,499	4,530	5,408
8		2,306		3,355		5,041
9	1,059	2,262	2,320	3,250	4,094	4,781
10		2,228		3,169		4,587
12		2,179		3,055		4,318
15		2,131		2,947		4,073
20		2,086		2,845		3,850
30		2,042		2,750		3,646
40		2,021		2,704		3,551
50		2,009		2,678		3,496
70		1,994		2,648		3,435
100	1,005	1,984	2,026	2,626	3,078	3,390
1000	1,001	1,962	2,003	2,581	3,008	3,300
∞	1,000 = σ	1,960	2,000 = $2 \cdot \sigma$	2,576	3,000 = $3 \cdot \sigma$	3,291

¹²⁰ Der „Peak“ bei Sekunde 7 ist auf das Überziehen der auf Stoß verschraubten Siebdruckplatten der Ladefläche des Prüftisches des HULK zurückzuführen

¹²¹ Prof. Dr.-Ing. Mario Adam: Versuchsplanung und Auswertung (2017), S. 16.

A5 Versuch Blockieren RCU

A5.1 Versuchsaufbau Blockieren

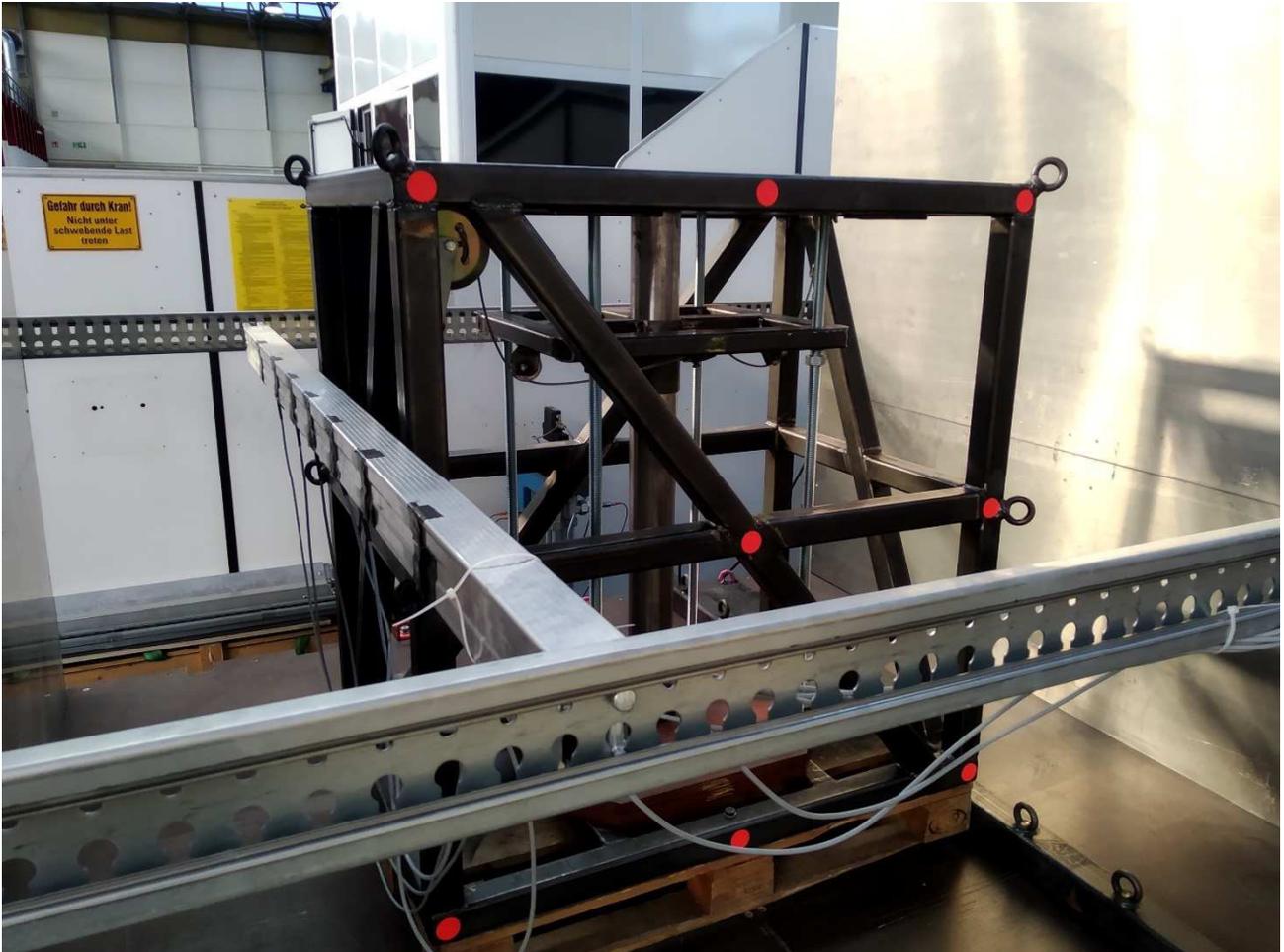


Abbildung A-6 Umsetzung Versuchsaufbau Blockieren mit DMS-Sperrbalken auf dem HULK

A5.2 Messdaten Prüfstand des Beschleunigungsverlaufs

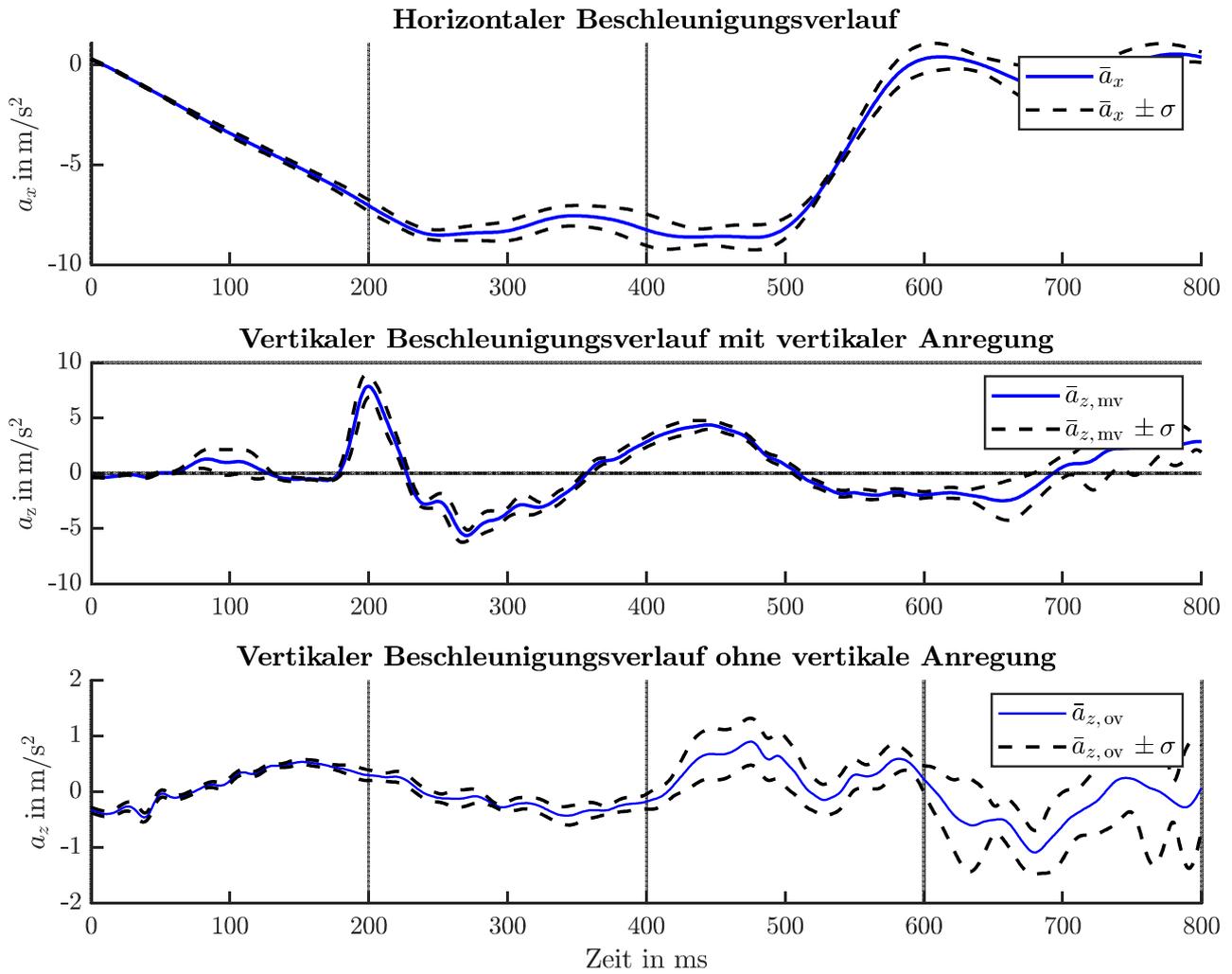


Abbildung A-7 Beschleunigungsverlauf Versuch Blockieren

Tabelle 16 Vergleich und Auswertung der Geschwindigkeit und Beschleunigungen des Versuchs Blockieren

Bezeichnung	vertikale Anregung	Formelzeichen	$m_{RCU} = 595 \text{ kg}$	$m_{RCU} = 381 \text{ kg}$
max. Geschwindigkeit	o/ m	$\bar{v}_{x,max} \pm \sigma$	$3,31 \pm 0,01 \text{ m/s}$	$3,32 \pm 0,01 \text{ m/s}$
min. vert. Beschleunigung	m	$\bar{a}_{z,min,mv} \pm \sigma$	$-5,62 \pm 0,31 \text{ m/s}^2$	$-5,40 \pm 0,33 \text{ m/s}^2$
min. vert. Beschleunigung	o	$\bar{a}_{z,min,ov} \pm \sigma$	$-1,01 \pm 0,47 \text{ m/s}^2$	$-0,70 \pm 0,30 \text{ m/s}^2$
min. hor. Beschleunigung.	o/ m	$\bar{a}_{x,Verzögerung} \pm \sigma$	$-9,15 \pm 0,29 \text{ m/s}^2$	$-8,92 \pm 0,27 \text{ m/s}^2$
min. hor. Beschleunigung	o	$\bar{a}_{x,Verzögerung,ov} \pm \sigma$	$-9,04 \pm 0,22 \text{ m/s}^2$	$-8,95 \pm 0,32 \text{ m/s}^2$
min. hor. Beschleunigung	m	$\bar{a}_{x,Verzögerung,mv} \pm \sigma$	$-9,26 \pm 0,31 \text{ m/s}^2$	$-8,88 \pm 0,21 \text{ m/s}^2$

A5.3 Versuchsplan Blockieren $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$

Tabelle 17 Versuchsplan Blockieren mit Sperrbalken; RCU $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$.¹²²

Standard Reihenfolge	Durchlauf Reihenfolge	Block	Vertikale Anregung	Reibwert μ	Ladelücke	Max. Blockierkraft in N	σ Blockierkraft in N/s
18	1	3	-1	-1	1	8087 ^a	x
23	2	3	1	1	-1	5012 ^a	x
22	3	3	-1	1	1	5672 ^a	x
19	4	3	1	-1	-1	6951	29,6
21	5	3	1	1	1	6554	19,5
24	6	3	1	-1	1	8778	28,5
20	7	3	-1	-1	-1	6421	65,7
17	8	3	-1	1	-1	4160	35,9
12	9	2	1	-1	-1	6918	*
9	10	2	-1	1	1	5906	14,1
10	11	2	-1	1	-1	4220	*
14	12	2	1	1	-1	5351	11,3
15	13	2	-1	-1	1	8335	14,8
13	14	2	1	1	1	6523	*
11	15	2	-1	-1	-1	6316	*
16	16	2	1	-1	1	8789	*
8	17	1	1	-1	1	8832	*
3	18	1	-1	1	-1	4156	*
2	19	1	-1	-1	-1	6300	*
7	20	1	-1	1	1	5926	*
6	21	1	1	1	1	6559	*
1	22	1	1	1	-1	5367	*
4	23	1	-1	-1	1	8356	*
5	24	1	1	-1	-1	6977	*

Erläuterungen zu den Stufen:

Vertikale Anregung: -1 ohne; 1 mit

Reibwert: -1 ohne Antirutschmatten; 1 mit Antirutschmatten

Ladelücke: -1 keine Ladelücke; 1 20 mm Ladelücke

¹²² Alle in der Spalte „Max Blockierkraft“ mit ^a markierten Werte werden aufgrund des in Abschnitt 4.2.3 erläuterten Sprungs nicht für die Berechnung der Standardabweichung berücksichtigt.

A5.4 Versuchsplan Blockieren $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$

Tabelle 18 Versuchsplan Blockieren mit Sperrbalken; RCU $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$

Standard Reihenfolge	Durchlauf Reihenfolge	Block	Vertikale Anregung	Reibwert μ	Ladelücke	Max. Blockierkraft in N	σ Blockierkraft in N
21	1	3	-1	-1	1	5651	64,4
20	2	3	1	1	-1	3632	73,7
22	3	3	-1	1	1	3837	125,6
19	4	3	1	-1	-1	4534	34,4
24	5	3	1	1	1	4634	131,5
23	6	3	1	-1	1	6052	43,3
17	7	3	-1	-1	-1	3881	32,6
18	8	3	-1	1	-1	2512	74,7
11	9	2	1	-1	-1	4472	*
14	10	2	-1	1	1	4038	*
10	11	2	-1	1	-1	2654	*
12	12	2	1	1	-1	3779	*
13	13	2	-1	-1	1	5737	*
16	14	2	1	1	1	4897	*
9	15	2	-1	-1	-1	3927	*
15	16	2	1	-1	1	6138	*
7	17	1	1	-1	1	6086	*
2	18	1	-1	1	-1	2543	*
1	19	1	-1	-1	-1	3864	*
6	20	1	-1	1	1	4068	*
8	21	1	1	1	1	4771	*
4	22	1	1	1	-1	3696	*
5	23	1	-1	-1	1	5611	*
3	24	1	1	-1	-1	4477	*

Erläuterungen zu den Stufen:

Vertikale Anregung: -1 ohne; 1 mit

Reibwert: -1 ohne Antirutschmatten; 1 mit Antirutschmatten

Ladelücke: -1 keine Ladelücke; 1 20 mm Ladelücke

A5.5 Übersicht Effekte und Wechselwirkungen

Tabelle 19 Übersicht der Effekte mit p-Wert des Versuchs Blockieren mit Sperrbalken

Term	Effekt ($m_{RCU} = 595 \text{ kg}$)	p-Wert ($m_{RCU} = 595 \text{ kg}$)	Effekt ($m_{RCU} = 398 \text{ kg}$)	p-Wert ($m_{RCU} = 398 \text{ kg}$)
A: vertikale Anregung	716,71	0,000	737,1	0,000
B: Reibwert	-2110,13	0,000	-1280,7	0,000
C: Ladelücke	1693,63	0,000	1462,4	0,000
AB	188,13	0,000	222,4	0,000
AC	-174,96	0,000	-131,1	0,000
BC	-231,79	0,000	-224,2	0,000
ABC	-100,54	0,000	-42,1	0,221

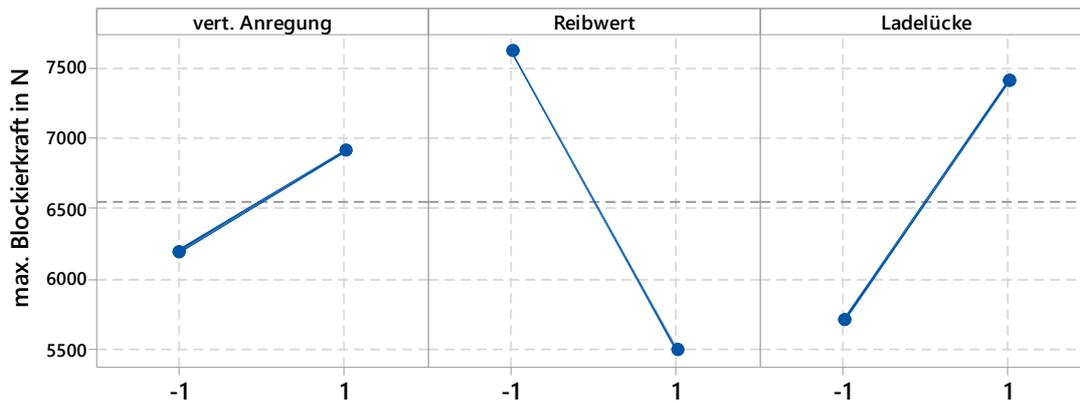


Abbildung A-8 Effektendiagramm des Versuchs Blockieren, $m_{RCU} = 595 \text{ kg}$

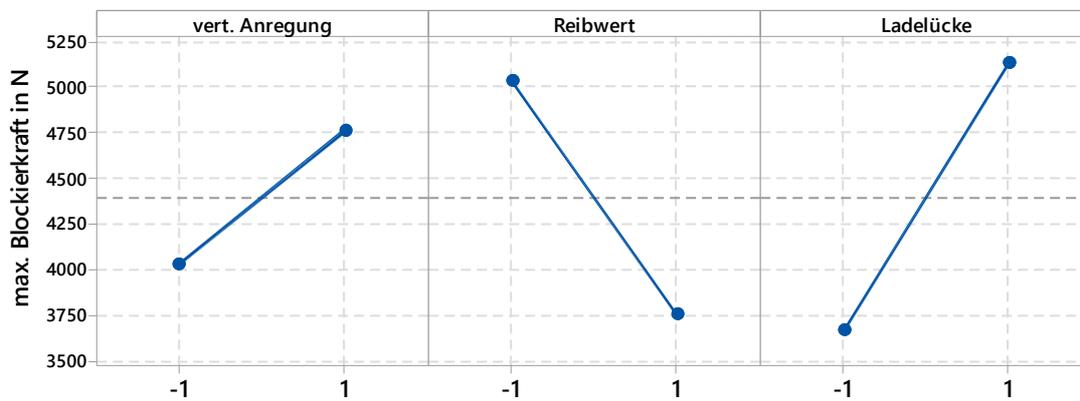


Abbildung A-9 Effektendiagramm des Versuchs Blockieren, $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$

A5.6 Residuen Diagramme $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$

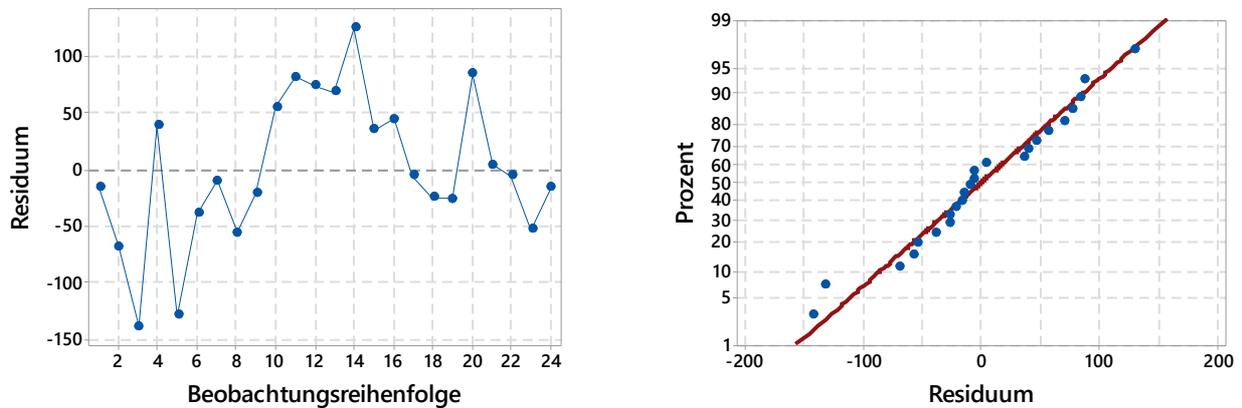


Abbildung A-10 Versuchsdaten der maximalen Blockierkraft RCU mit Sperrbalken ($m_{RCU} = 398 \text{ kg}$, $N=24$). Residuen vs. Beobachtungsreihenfolge (links); Wahrscheinlichkeitsnetz der Residuen (rechts)

A5.7 Wechselwirkungsdiagramm: Vertikale Anregung $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$

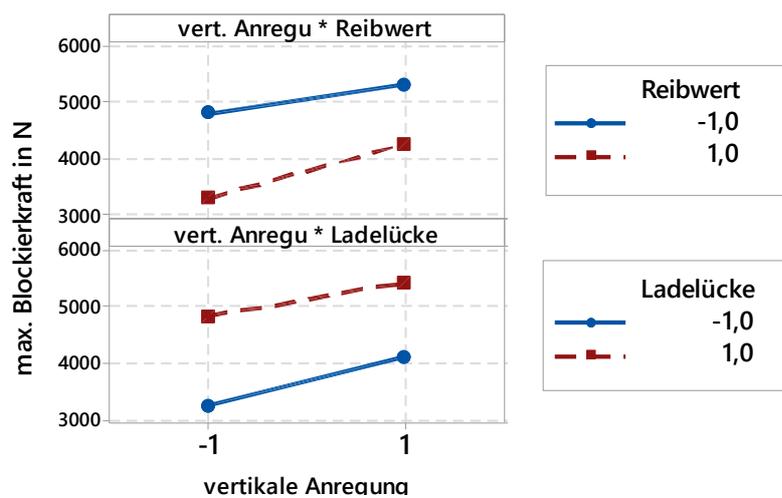


Abbildung A-11 Wechselwirkungsdiagramm vertikale Anregung/ Reibwert/ Ladelücke für das Qualitätsmerkmal maximale Kraft $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$

A5.8 Vergleich Versuchsdaten/Norm

Tabelle 20 Vergleich der gemessenen Blockierkräfte mit den berechneten Blockierkräften nach der DIN 12195-1:2010

Vertikale Anregung	Reibwert μ	Ladelücke	$m_{RCU} = 595 \text{ kg}$			$m_{RCU} = 398 \text{ kg}$		
			$\bar{F}_{B,gemessen}$ in N	$\bar{F}_{B,berechnet}$ in N	Relative Abweichung in %	$\bar{F}_{B,gemessen}$ in N	$\bar{F}_{B,berechnet}$ in N	Relative Abweichung in %
1	1	1	6548	2335	180	4767	1171	307
1	1	-1	5359	2335	130	3702	1171	216
1	-1	1	8800	3502	151	6092	2343	160
1	-1	-1	6949	3502	98	4494	2343	92
-1	1	1	5916	2335	153	3981	1171	240
-1	1	-1	4179	2335	79	2570	1171	119
-1	-1	1	8346	3502	138	5666	2343	142
-1	-1	-1	6346	3502	81	3891	2343	66

Nach der Berechnung der Blockierkraft nach DIN 12195-1 (Formel (2-6), Abschnitt 2.3) ist für die Masse von $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$ eine Blockierkraft von mindestens 2343 N bei einem Reibwert von $\mu_{Norm} = 0,3$ bzw. 1171 N bei einem Reibwert $\mu_{Norm} = 0,5$ notwendig (für $m_{RCU} = 398 \text{ kg}$ entsprechend 3502 N bzw. 2335 N). Es wurde ein Längsbeschleunigungsbeiwert $c_{x,y} = 0,9$ gewählt, um die Vergleichbarkeit mit den Versuchsdaten zu ermöglichen. Für den vertikalen Beschleunigungsbeiwert wurde $c_z = 1$ entsprechend der Norm gewählt.

Erläuterung Faktorenstufen:

Vertikale Anregung: -1 ohne; 1 mit;

Reibwert: -1 ohne Antirutschmatten; 1 mit Antirutschmatten

Ladelücke: -1 keine Ladelücke; 1 20 mm Ladelücke

A6 Versuch Niederzurren RCU

A6.1 Versuchsaufbau Niederzurren



Abbildung A-12 Versuchsaufbau Niederzurren, untere Zurrhöhe $l_v = 772$ mm



Abbildung A-13 Versuchsaufbau Niederzurren, obere Zurrhöhe $l_v = 1400$ mm

A6.2 Versuchsplan Niederzurren RCU

Tabelle 21 Versuchsplan Niederzurren; RCU $m_{RCU} = 595$ kg

Standard Reihenfolge	Durchlauf Reihenfolge	Block	Reibwert μ_{Norm}	Vertikale Anregung	Zurrhöhe	Verschiebung in mm	F_T (berechnet)	$\bar{F}_{T,v} - F_T$ (Differenz)	$\bar{F}_{T,v}$ (vorher)	$\bar{F}_{T,d}$ (nachher)
16	1	1	1	1	1	7	1273	364	1637	1610
3	2	1	-1	1	-1	0	4429	-91	4338	4338
9	3	1	-1	-1	-1	0	4429	198	4627	4627
10	4	1	1	-1	-1	3	1594	55	1649	1607
6	5	1	1	-1	1	3	1273	162	1435	1392
14	6	1	1	-1	1	4	1273	37	1310	1248
12	7	1	1	1	-1	9	1594	346	1940	1928
1	8	1	-1	-1	-1	0	4429	393	4822	4802
2	9	1	1	-1	-1	4	1594	0	1594	1840
11	10	1	-1	1	-1	0	4429	326	4755	4724
5	11	1	-1	-1	1	0	3536	65	3601	3590
8	12	1	1	1	1	15	1273	211	1484	1487
4	13	1	1	1	-1	25	1594	-27	1567	1653
15	14	1	-1	1	1	0	3536	-18	3518	3497
13	15	1	-1	-1	1	0	3536	236	3772	3770
7	16	1	-1	1	1	0	3536	207	3743	3741
19	17	1	-1	1	-1	0	4429	221	4650	4622
21	18	1	-1	-1	1	0	3536	-102	3434	3429
20	19	1	1	1	-1	13	1594	143	1737	1787
23	20	1	-1	1	1	0	3536	3	3539	3517
24	21	1	1	1	1	23	1273	-24	1249	1368
18	22	1	1	-1	-1	4	1594	7	1601	1555
17	23	1	-1	-1	-1	0	4429	63	4492	4472
22	24	1	1	-1	1	4	1273	76	1349	1321

Erläuterungen zu den Stufen:

Vertikale Anregung: -1 ohne; 1 mit

Reibwert μ_{Norm} : -1 ohne Antirutschmatten; 1 mit Antirutschmatten

Zurrhöhe: -1 $l_v = 772$ mm; 1 $l_v = 1400$ mm

A6.3 Versuchsplan Niederzurren RCU (reduziert)

Tabelle 22 Reduzierter Versuchsplan Niederzurren. ($m_{RCU} = 595 \text{ kg}$)

Standard Reihenfolge	Durchlauf Reihenfolge	Block	Vertikale Anregung	Zurrhöhe	Verschiebung in mm	σ Verschiebung in mm
16	1	1	1	1	7	8
10	4	1	-1	-1	3	0,58
6	5	1	-1	1	3	0,58
14	6	1	-1	1	4	*
12	7	1	1	-1	9	8,3
2	9	1	-1	-1	4	*
8	12	1	1	1	15	*
4	13	1	1	-1	25	*
20	19	1	1	-1	13	*
24	21	1	1	1	23	*
18	22	1	-1	-1	4	*
22	24	1	-1	1	4	*

Erläuterungen zu den Stufen:

Vertikale Anregung: -1 ohne; 1 mit

Reibwert μ_{Norm} : -1 ohne Antirutschmatten; 1 mit Antirutschmatten

Zurrhöhe: -1 $l_v = 772 \text{ mm}$; 1 $l_v = 1400 \text{ mm}$

A6.4 Versuchsplan RCU ohne Sicherung

Tabelle 23 Versuchsplan RCU ohne Sicherung

Durchlauf Reihenfolge	Vertikale Anregung	Verschiebung (mit Trend) in mm	Verschiebung (ohne Trend) in mm
1	-1	257	257
2	1	272	277,1
3	-1	249	259,2
4	1	268	283,3
5	-1	227	247,4
6	1	256	281,5
7	-1	217	247,6
8	1	233	268,7
9	-1	218	258,8
10	1	232	277,9
11	-1	212	263
12	1	218	274,1
13	-1	225	270,2
14	1	270	246,3
15	-1	225	267,4
16	1	209	251,5
17	-1	180	282,6
18	1	196	257
19	-1	175	277,1
20	1	201	259,2

A7 Versuch RCU ohne Sicherung: Messdaten Prüfstand

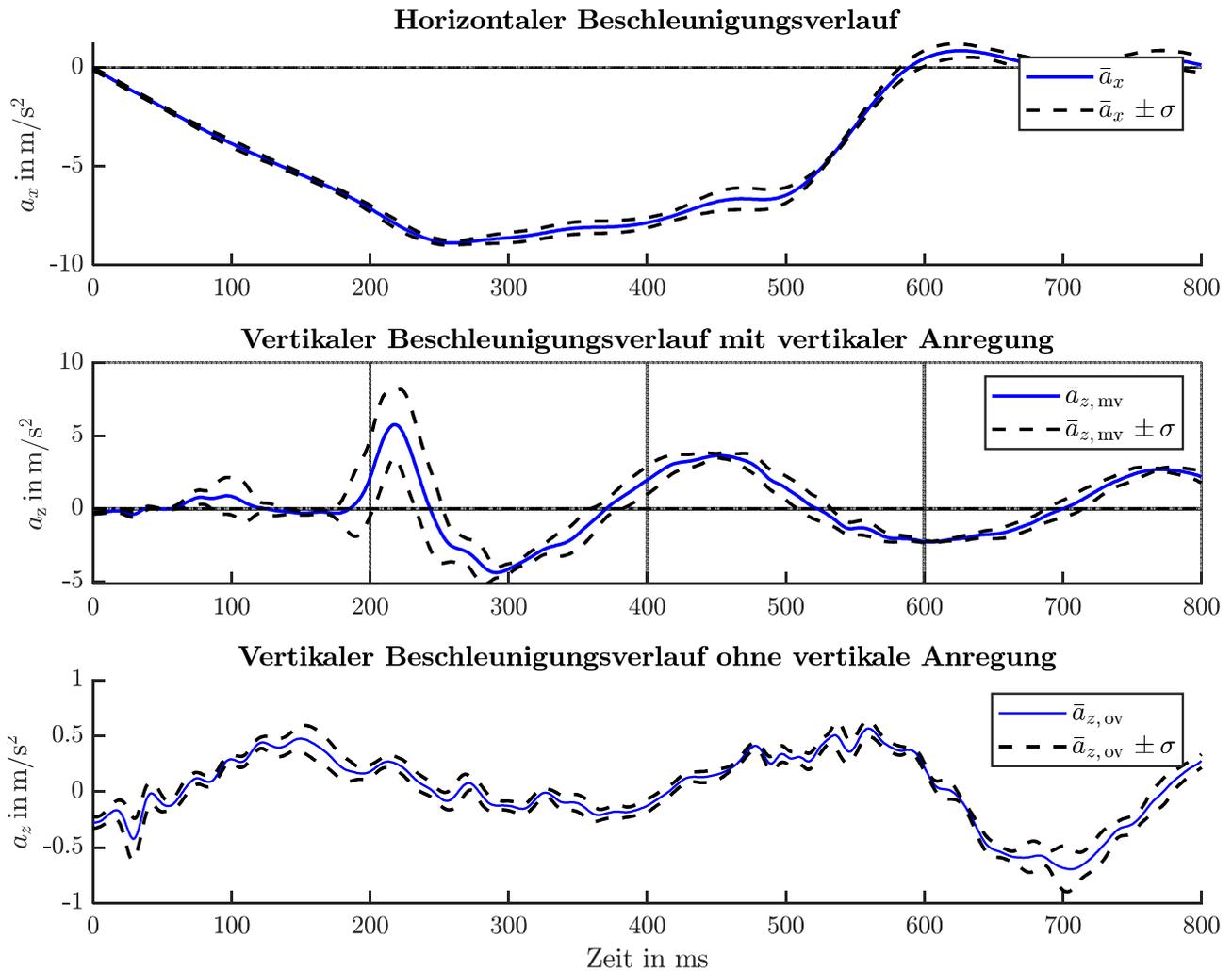


Abbildung A-14 Beschleunigungsverlauf Versuch RCU ohne Sicherung

Tabelle 24 Vergleich und Auswertung der Geschwindigkeit und Beschleunigungen Versuch Sperrbalken

Bezeichnung	vertikale Anregung	Formelzeichen	Zahlenwert
max. Geschwindigkeit	o/ m	$\bar{v}_{x,max} \pm \sigma$	$3,27 \pm 0,04$ m/s
min. vert. Beschleunigung	m	$\bar{a}_{z,min,mv} \pm \sigma$	$-4,4 \pm 0,38$ m/s ²
min. vert. Beschleunigung	o	$\bar{a}_{z,min,ov} \pm \sigma$	$-0,67 \pm 0,06$ m/s ²
min. hor. Beschleunigung.	o/ m	$\bar{a}_{x,Verzögerung} \pm \sigma$	$-8,93 \pm 0,11$ m/s ²
min. hor. Beschleunigung	o	$\bar{a}_{x,Verzögerung,ov} \pm \sigma$	$-8,91 \pm 0,13$ m/s ²
min. hor. Beschleunigung	m	$\bar{a}_{x,Verzögerung,mv} \pm \sigma$	$-8,96 \pm 0,07$ m/s ²

A8 Sackware Kaliumsulfat

A8.1 Versuchsergebnisse Verschiebung

Tabelle 25 Versuchsergebnisse relative Verschiebung der Sackware Kaliumsulfat zwischen den jeweiligen Versuchen

	Versuch Nr.	Verschiebung in mm			Vorspannkraft nach dem Versuch in N	Max. Kraft- amplitude in N
		Höhe Palette	Höhe 400 mm	Höhe 800 mm		
Ladeinheit 1 ohne vertikale Anregung	1	0	18	19	3488	5382
	2	1	20	16	2707	4778
	3	20	22	22	2034	4460
Mittelwert		7	20	19	-	-
Standardabweichung		11,27	2	3	-	-
Ladeinheit 2 mit vertikaler Anregung	1	9	19	18	3331	5259
	2	12	19	20	2344	4685
	3	11	19	20	1525	4302
Mittelwert		10,6	19	19,3	-	-
Standardabweichung		1,5	2,2	1,5	-	-

A8.2 Messdaten Prüfstand

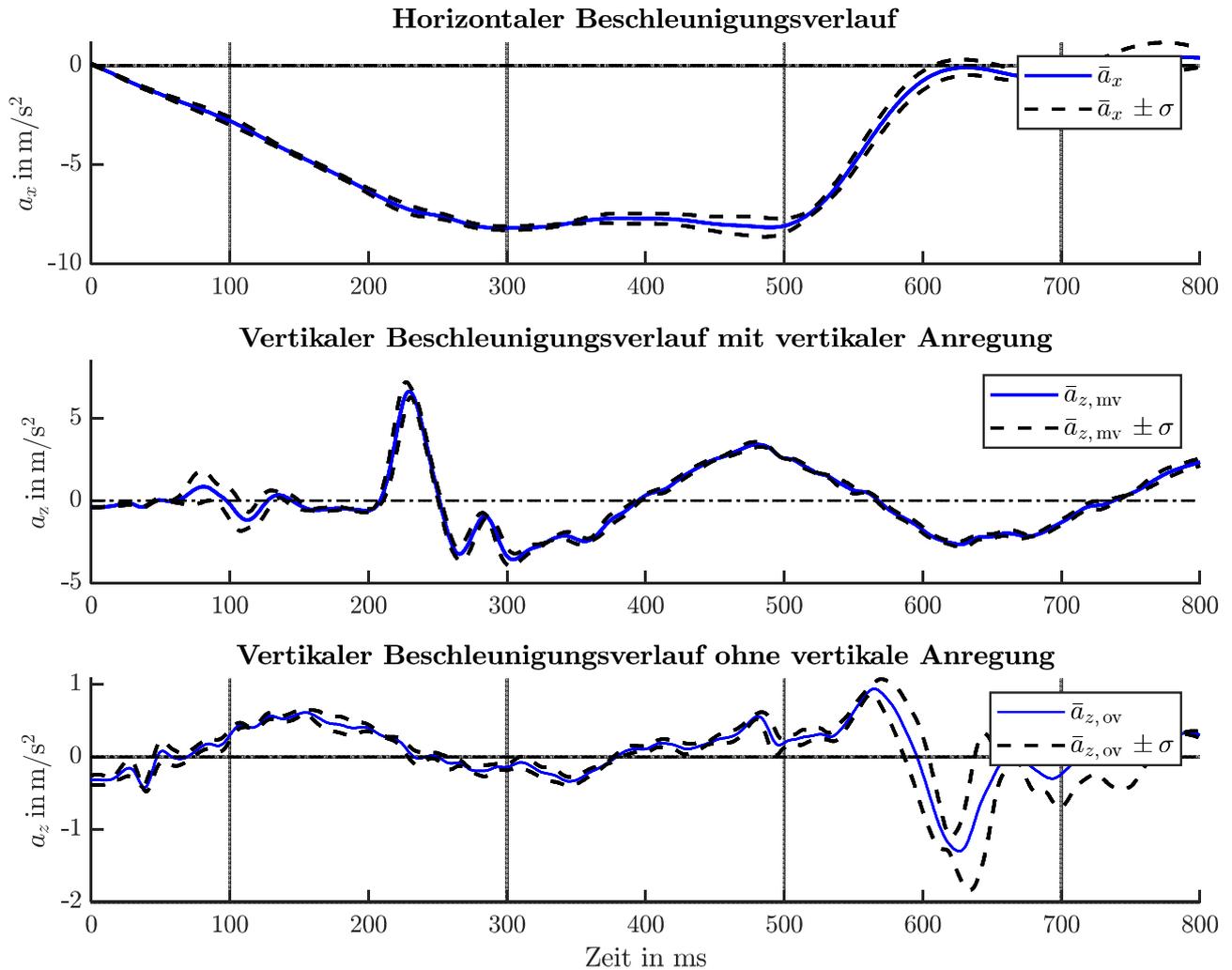


Abbildung A-15 Beschleunigungsverlauf Versuch Sackware Kaliumsulfat

Tabelle 26 Übersicht Beschleunigungskennwerte Versuch Sackware Kaliumsulfat

Bezeichnung	vertikale Anregung	Formelzeichen	Zahlenwert
max. Geschwindigkeit	o/ m	$\bar{v}_{x,max} \pm \sigma$	$3,23 \pm 0,02$ m/s
min. vert. Beschleunigung	m	$\bar{a}_{z,min,mv} \pm \sigma$	$-3,59 \pm 0,1$ m/s ²
min. hor. Beschleunigung.	o/ m	$\bar{a}_{x,Verzögerung} \pm \sigma$	$-8,38 \pm 0,27$ m/s ²
min. hor. Beschleunigung	o	$\bar{a}_{x,Verzögerung,ov} \pm \sigma$	$-8,6 \pm 0,18$ m/s ²
min. hor. Beschleunigung	m	$\bar{a}_{x,Verzögerung,mv} \pm \sigma$	$-8,17 \pm 0,14$ m/s ²

A9 Stahlpundfässer auf Europalette: Messdaten Prüfstand

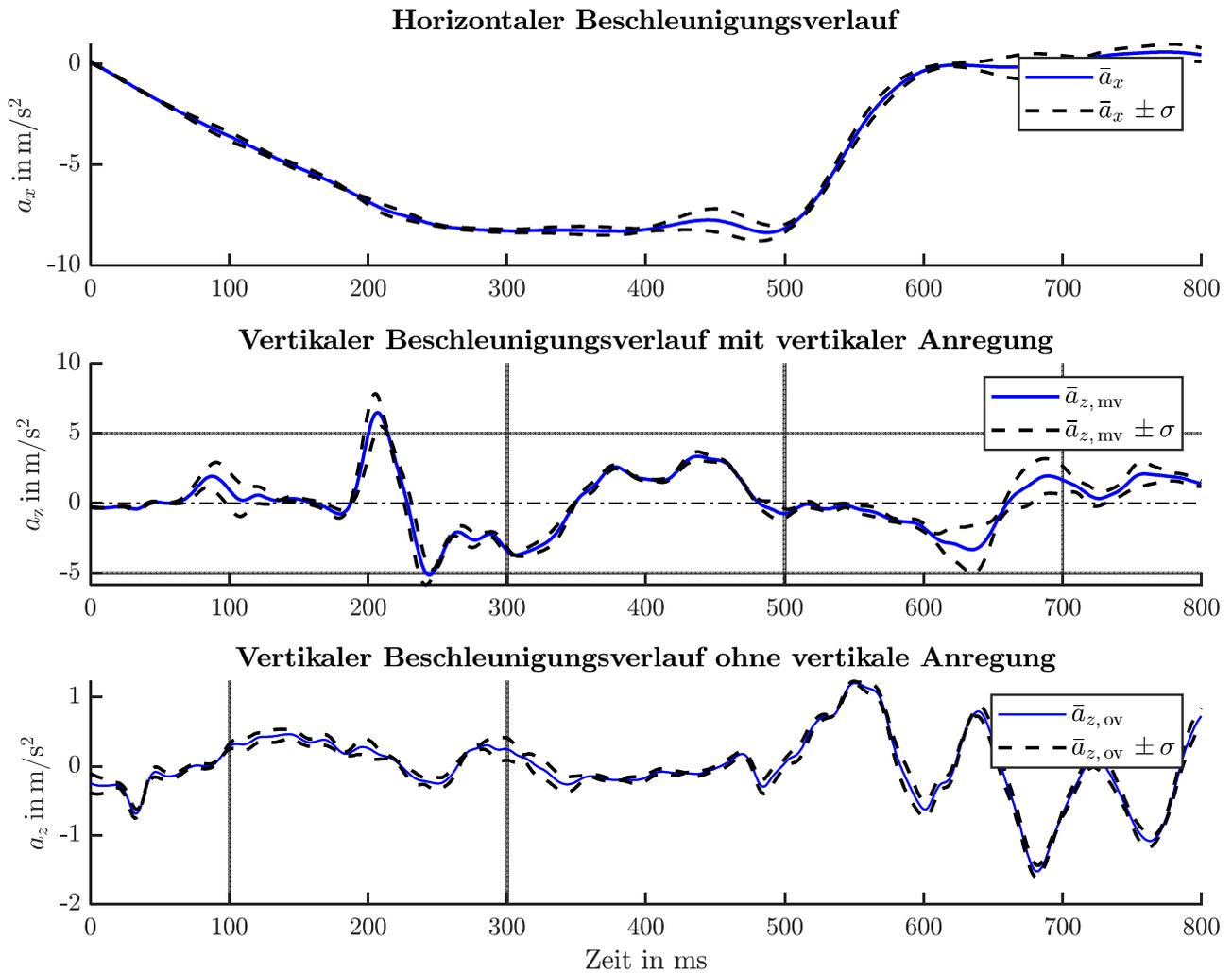


Abbildung A-16 Beschleunigungsverlauf Versuch Stahlpundfässer

Tabelle 27 Übersicht Beschleunigungskennwerte Versuch Stahlpundfässer

Bezeichnung	vertikale Anregung	Formelzeichen	Zahlenwert
max. Geschwindigkeit	o/ m	$\bar{v}_{x,max} \pm \sigma$	$3,3 \pm 0,01$ m/s
min. vert. Beschleunigung	m	$\bar{a}_{z,min,mv} \pm \sigma$	$-5,15 \pm 0,53$ m/s ²
min. hor. Beschleunigung.	o/ m	$\bar{a}_{x,Verzögerung} \pm \sigma$	$-8,6 \pm 0,15$ m/s ²
min. hor. Beschleunigung	o	$\bar{a}_{x,Verzögerung,ov} \pm \sigma$	$-8,73 \pm 0,1$ m/s ²
min. hor. Beschleunigung	m	$\bar{a}_{x,Verzögerung,mv} \pm \sigma$	$-8,48 \pm 0,03$ m/s ²

A10 Kunststofffässer auf Europalette: Messdaten Prüfstand

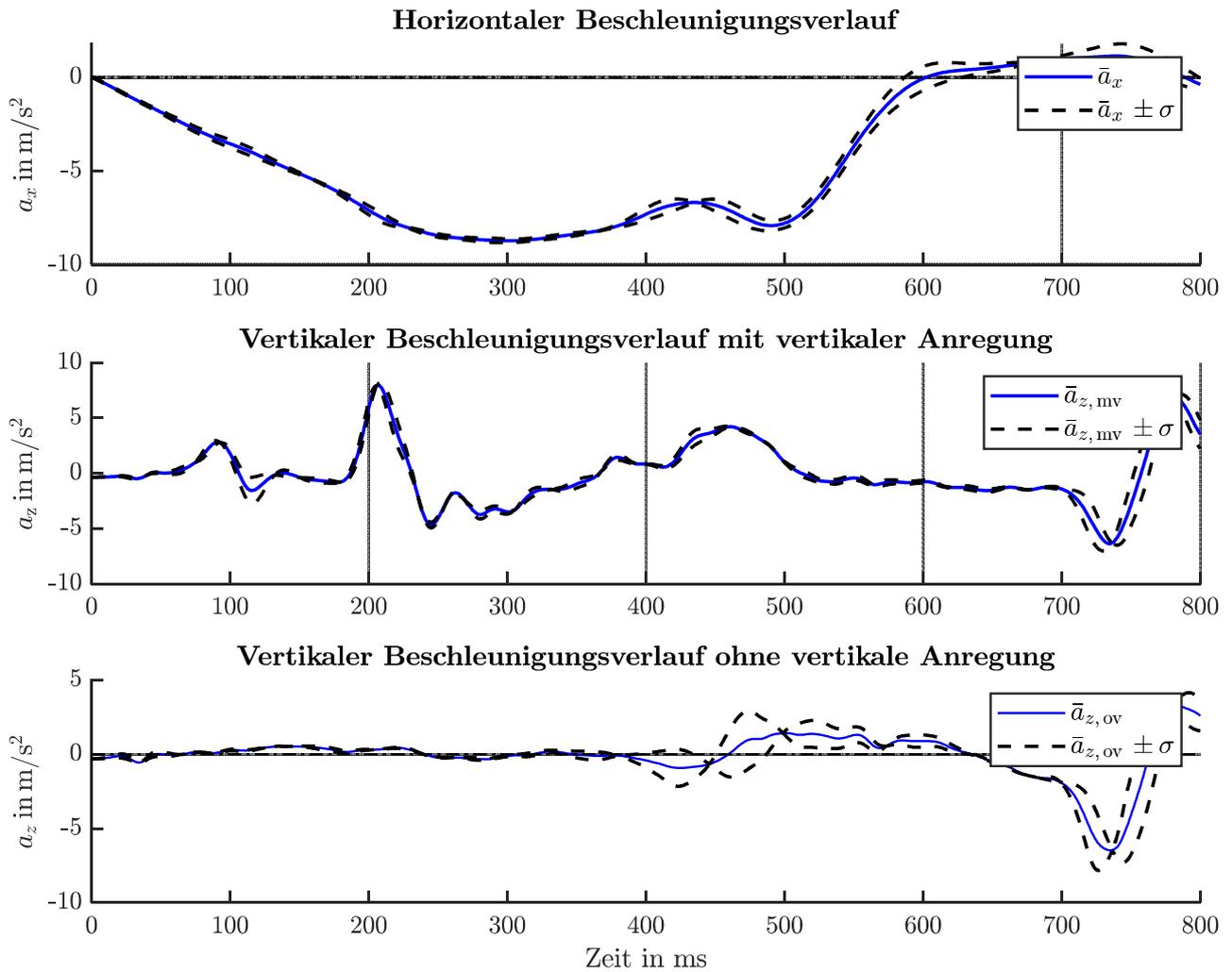


Abbildung A-17 Beschleunigungsverlauf Versuch Kunststofffässer

Tabelle 28 Übersicht Beschleunigungskennwerte Versuch Stahlspundfässer

Bezeichnung	vertikale Anregung	Formelzeichen	Zahlenwert
max. Geschwindigkeit	o/ m	$\bar{v}_{x,max} \pm \sigma$	$3,27 \pm 0,01$ m/s
min. vert. Beschleunigung	m	$\bar{a}_{z,min,mv} \pm \sigma$	$-4,69 \pm 0,26$ m/s ²
min. hor. Beschleunigung.	o/ m	$\bar{a}_{x,Verzögerung} \pm \sigma$	$-8,74 \pm 0,08$ m/s ²
min. hor. Beschleunigung	o	$\bar{a}_{x,Verzögerung,ov} \pm \sigma$	$-8,74 \pm 0,05$ m/s ²
min. hor. Beschleunigung	m	$\bar{a}_{x,Verzögerung,mv} \pm \sigma$	$-8,73 \pm 0,13$ m/s ²

Literaturverzeichnis

allsafe GmbH & Co. KG: Datenblatt KAT AJS 1100

allsafe GmbH & Co. KG: Datenblatt KAT AJS 1100; https://www.allsafe24.com/shop/de-DE/Ladungssicherung/Faktor_4_-_Sperr Elemente_nach_Ma%C3%9F/KAT_-_Sperrbalken_nach_Ma%C3%9F/KAT_AJS_-_Sperrbalken_nach_Ma%C3%9F//a_511307-0005&basennummer=511307, Zugriff 16.04.2019

BMJV: Straßenverkehrs-Ordnung § 22 Ladung (2018)

Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz: Straßenverkehrs-Ordnung § 22 Ladung; https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/___22.html, 2018, Zugriff 10.12.2018

CCMTA: Effect of cargo and tiedown characteristics

Canadian Council Of Motor Transport Administrators: Effect of cargo and tiedown characteristics on equalization of tension in the spans of tiedowns, in:

CCMTA: NSC Cargo Securement Standard (2013)

Canadian Council Of Motor Transport Administrators: NSC Cargo Securement Standard, 2013

DESTASIS: Beförderungsmenge nach Hauptverkehrsrelationen und Verkehrsträgern 2017

Statistisches Bundesamt: Beförderungsmenge nach Hauptverkehrsrelationen und Verkehrsträgern 2017;

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Gueterverkehr/Tabelle/VerkehrstraegerHauptverkehrsRelationA.html>, Zugriff 10.12.2018

DIN: DIN 30781-1

Deutsche Institut für Normung e. V.: DIN 30781-1:1989-05, Transportkette; Grundbegriffe, Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN: DIN EN 12195-2

Deutsche Institut für Normung e. V.: DIN EN 12195-2:2001-02, Ladungssicherungseinrichtungen auf Straßenfahrzeugen - Sicherheit - Teil 2: Zurrgurte aus Chemiefasern; Deutsche Fassung EN_12195-2:2000, Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN: EN 12642:2006

Deutsche Institut für Normung e. V.: DIN EN 12642:2006

DIN: 12195-1:2010 (2011)

Deutsche Institut für Normung e. V.: DIN EN 12195-1:2010, 2011

Dolezych GmbH & Co. KG: Ladungssicherungsmittel und Hebeteknik

Dolezych GmbH & Co. KG: Produkte | Dolezych › Dolezych - Ladungssicherungsmittel und Hebeteknik; <https://dolezych.de/produkte>, Zugriff 09.04.2019

DR. THOMAS + PARTNER GmbH & Co. KG: Packmittel - Logistik KNOWHOW (2013)

DR. THOMAS + PARTNER GmbH & Co. KG: Packmittel - Logistik KNOWHOW; <https://logistikknowhow.com/sorter-packerei/packmittel/>, 2013, Zugriff 10.04.2019

EUMOS: EUMOS 40509 - Test method for unit rigidity (2012)

European Safe Logistics Association: EUMOS 40509 - Test method for unit rigidity, in: , 2012

Europäische Union: Techn. Unterwegskontrolle d. Verkehrs- und Betriebssicherheit von Nfz (2014)

Europäische Union Richtlinie 2014/47/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 3. April 2014 über die technische Unterwegskontrolle der Verkehrs- und Betriebssicherheit von Nutzfahrzeugen, die in der Union am Straßenverkehr teilnehmen, und zur Aufhebung der Richtlinie 2000/30/EG; 2014/47, 29.04.2014

Fahrzeugwerk Bernard KRONE GmbH & Co. KG: Multi Safe System

Fahrzeugwerk Bernard KRONE GmbH & Co. KG: Multi Safe System – Fahrzeugwerk Bernard

KRONE GmbH & Co. KG; <https://www.krone-trailer.com/produkte/ladungssicherung/multi-safe-system/>, Zugriff 24.04.2019

GeneSys Eletronik GmbH: ADMA-Familie GNSS/Inertialsystem Automotive/Bahn (2019)
GeneSys Eletronik GmbH: ADMA-Familie GNSS/Inertialsystem Automotive/Bahn;
<https://www.genesys-offenburg.de/produkte/adma-familie-gnssinertialsystem-automotivebahn/>,
2019, Zugriff 28.03.2019

HBM: Datenblatt Wägezelle U2A

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: U2A Load Cell Data Sheet;
<http://www.mikropul.com.cn/contact/tupian/HBM/U2A.pdf>, Zugriff 17.05.2019

Hompel, M. ten; Heidenblut, V.: Taschenlexikon Logistik (2011)

Hompel, Michael ten; Heidenblut, Volker: Taschenlexikon Logistik, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011

Juwet, M. et al.: Acceleration test machine

Juwet, Marc; Bruggeman, Koert; De Bal, Filip: Acceleration test machine, in:

Kamil, K.: Diss., Entw. einer Prüf- & Bewertungsmeth. für LaSiSysteme (2017)

Kamil, Klonecki: Entwicklung einer Prüf- und Bewertungsmethodik für Ladungssicherungssysteme, Dissertation Technische Universität Darmstadt, 2017

KBA: Gütergewicht im Versand mit deutschen Lastkraftfahrzeugen im Jahr 2017

Kraftfahrt-Bundesamt: Gütergewicht im Versand mit deutschen Lastkraftfahrzeugen im Jahr 2017;
https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/Gueterbefoerderung/2017_vd4_gueter_versand.html?nn=666056, Zugriff 10.12.2018

Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren (2011)

Kleppmann, Wilhelm: Taschenbuch Versuchsplanung, Praxisreihe Qualitätswissen, 7. Auflage, Hanser, München, 2011

Klonecki, K. Dr.; Winner, H. Prof. Dr. rer. nat.: Verfahren zur Untersuchung von Ladungssicherungsmaßnahmen (2014)

Klonecki, Kamil Dr.; Winner, Hermann Prof. Dr. rer. nat.: Ein neuartiges Verfahren zur Untersuchung des Verhaltens von Ladung und Ladungssicherungsmaßnahmen, in: VDI Berichte (2224), 2014

Minitab GmbH: Minitab® 18 - Liste der Funktionen

Minitab GmbH: Minitab® 18 - Liste der Funktionen; <https://www.minitab.com/de-de/products/minitab/features-list/>, Zugriff 21.05.2019

Minitab GmbH: Wiederholungen und Replikationen (2019)

Minitab GmbH: Wiederholungen und Replikationen in Versuchsplänen;
<https://support.minitab.com/de-de/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/basics/replicates-and-repeats-in-designed-experiments/>, 2019, Zugriff 01.04.2019

Minitab GmbH: Pareto-Diagramm, Standardisierte Effekte (2019)

Minitab GmbH: Effektediagramme für Faktoriellen Versuchsplan analysieren;
<https://support.minitab.com/de-de/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/factorial/analyze-factorial-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/effects-plots/>, 2019, Zugriff 08.05.2019

Minitab GmbH: p-Wert (2019)

Minitab GmbH: Interpretieren eines p-Werts; <https://support.minitab.com/de-de/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/basics/example-of-getting-and-interpreting-a-p-value/>, 2019, Zugriff 15.05.2019

Northern Territory Government: MVR Information Bulletin V64 - Load Restraint

Northern Territory Government: MVR Information Bulletin V64 - Load Restraint;
https://nt.gov.au/__data/assets/pdf_file/0006/374361/v64-load-restraint.pdf, Zugriff 27.03.2019

NTC: LOAD RESTRAINT GUIDE (2018)

National Transport Commission: LOAD RESTRAINT GUIDE, 2018

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam: Versuchsplanung und Auswertung (2017)

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam: Versuchsplanung und Auswertung; [https://zies.hs-](https://zies.hs-duessel-)

[dorf.de/Lehre/Lehrveranstaltungen/Versuchsplanung%20und%20Auswertung/Documents/0_DoE_Vorlesung_Skript_aktuell.pdf](https://zies.hs-duessel-dorf.de/Lehre/Lehrveranstaltungen/Versuchsplanung%20und%20Auswertung/Documents/0_DoE_Vorlesung_Skript_aktuell.pdf), 2017, Zugriff 08.03.2019

Rakheja, S. et al.: Friction coefficients and vertical vibrations (1997)

Rakheja, S.; Sauvé, P.; Juras, D.: Experimental Evaluation of Friction Coefficients of Typical Loads and Trailer Decks under Vertical Vibration, in: CCMT Load Security Research Project Report # 2, 1997

Schaefer, N.: Diss., Ermittlung auftretender Fahrzeugschwingungen bei Nutzfahrzeugen (1983)

Schaefer, Norbert: Über die Ermittlung auftretender Fahrzeugschwingungen bei Nutzfahrzeugen und Arbeitsmaschinen und die Verminderung der Schwingungsbelastung von Fahrzeugführern durch schwingungstechnisch optimierte Fahrersitze, Dissertation Technische Universität Darmstadt, 1983

Seilnacht, T.: Kaliumsulfat (2018)

Seilnacht, Thomas: Kaliumsulfat; http://www.seilnacht.com/Chemie/ch_k2so4.html, 2018, Zugriff 03.04.2019

Siebertz, K. et al.: Statistische Versuchsplanung (2017)

Siebertz, Karl; van Bebber, David; Hochkirchen, Thomas: Statistische Versuchsplanung, VDI-Buch Ser, 2. Auflage, Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017

SpanSet GmbH & Co. KG: Ladungssicherungsmittel

SpanSet GmbH & Co. KG: SpanSet - Ladungssicherung; https://www.spanset.com/de_de/products/Ladungssicherung, Zugriff 09.04.2019

Strauch GmbH: Arbeitsanleitung Drumguard® Metall

Strauch GmbH: Arbeitsanleitung Drumguard® Duo Multi - Metall; <http://drumguard.eu/files/65/arbeitsanleitung-drumguard-duo-multi-stahl.pdf>, Zugriff 14.05.2019

Strauch GmbH: Drumguard® L-Ring-Fass

Strauch GmbH: Drumguard® Duo Multi - L-Ring-Fass; <http://drumguard.eu/files/56/arbeitsanleitung-drumguard-duo-multi-l-ring-fass.pdf>, Zugriff 14.05.2019

Toni Reinicke: Masterarbeit, Messen von formschlüssiger Ladungssicherungsmaßnahmen (2016)

Toni Reinicke: Entwicklung eines Systems zum Messen von Belastungen und Beanspruchungen formschlüssiger Ladungssicherungsmaßnahmen, Masterarbeit Technische Universität Darmstadt, 2016

UNECE/ EU: Gefahrgutbeförderung im Straßenverkehr (ADR)

UNECE/ EU: Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR); http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl217031_Anlageband.pdf, Zugriff 25.03.2019

VDI: LaSi auf Straßenfahrzeugen - Sicherungskräfte

Verein Deutscher Ingenieure: Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen - Berechnung von Sicherungskräften Grundlagen