



WHZ Westsächsische
Hochschule Zwickau
Hochschule für Mobilität

Diplomarbeit

Untersuchung dynamischer Abschleppvorgänge und deren Einfluss auf die Karosserie- und Fahrwerksstruktur in Bezug auf die Verkehrssicherheit

eingereicht an der
Fakultät Kraftfahrzeugtechnik der
Westsächsischen Hochschule Zwickau
am 17.08.2026

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: cand. Ing.

Gajewski, Tim

geb. am: 09.06.2004

Studiengang Kraftfahrzeugtechnik
Studienschwerpunkt Instandhaltung und Unfallanalyse

Erstbetreuer: Prof. Dr.-Ing. Christian Erbsmehl
Zweitbetreuer: Prof. Dr.-Ing. Jan Schubert

Autorenreferat

In der vorliegenden Arbeit werden die strukturellen und geometrischen Auswirkungen dynamischer Abschleppvorgänge auf Personenkraftwagen experimentell untersucht und hinsichtlich der Verkehrssicherheit bewertet. Hierfür werden an zwei baugleichen Fahrzeugen Zugversuche über die Abschleppöse und die Anhängerkuppelung durchgeführt, jeweils bei zwei Geschwindigkeitsstufen und unter einem Schrägzug von 30 Grad.

Erfasst werden die auftretenden Zugkräfte mit einer Kraftmessdose. Zudem erfolgt die Vermessung der Karosserie- und der Achsgeometrie jeweils vor und nach der Belastung. Die Kräfte werden dem normativen Prüfwert der Abschleppeinrichtung gegenübergestellt und die festgestellten Struktur- und Geometrieveränderungen bewertet. Herausforderung ist die Reproduzierbarkeit der impulsartigen Belastung sowie die Abgrenzung realer, last-induzierter Veränderungen von der Streuung der Messsysteme.

Die Ergebnisse zeigen, in welchem Umfang dynamische Abschleppvorgänge die Fahrzeugstruktur beeinflussen, dass die auftretenden Kräfte den Prüfwert überschreiten und für die Verkehrssicherheit relevante Veränderungen entstehen können. Daraus wird ein Prüf- und Begutachtungsbedarf für das Sachverständigenwesen abgeleitet.



Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit in allen Teilen selbstständig angefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form in noch keiner anderen Prüfung vorgelegen hat. Mir ist bewusst, dass ich Autor/in der vorliegenden Arbeit bin und volle Verantwortung für den Text trage.



Ich erkläre, dass ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken – dazu gehören auch Internetquellen – übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht und die entsprechenden Quellen angegeben habe.



Mir ist bewusst, dass meine Arbeit auf Plagiate überprüft werden kann. Mir ist bekannt, dass es sich bei der Abgabe eines Plagiats um ein schweres akademisches Fehlverhalten handelt und dass Täuschungen nach der für mich gültigen Prüfungsordnung geahndet werden.



Zusätzlich versichere ich, dass ich auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Werkzeuge nur in Absprache mit den Prüfern verwendet habe. Dabei stand meine eigene geistige Leistung im Vordergrund, und ich habe jederzeit den Prozess steuernd bearbeitet.



Diese Werkzeuge habe ich im Quellenverzeichnis in der Rubrik „Übersicht verwendeter Hilfsmittel“ mit ihrem Produktnamen und einer Übersicht des im Rahmen dieser Prüfungs-/Studienarbeit genutzten Funktionsumfangs unter Angabe der Textstelle in der Arbeit vollständig aufgeführt.



Ich versichere, dass ich keine KI-basierten Tools verwendet habe, deren Nutzung die Prüfer explizit schriftlich ausgeschlossen haben. Ich bin mir bewusst, dass die Verwendung von Texten oder anderen Inhalten und Produkten, die durch KI-basierte Tools generiert wurden, keine Garantie für deren Qualität darstellt.



Ich verantworte die Übernahme jeglicher von mir verwendeter maschinell generierter Passagen vollumfänglich selbst und trage die Verantwortung für eventuell durch die KI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte, fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate.



Zwickau, 17.08.2026

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

I.	Abbildungsverzeichnis.....	I
II.	Tabellenverzeichnis	IV
III.	Abkürzungsverzeichnis.....	VI
IV.	Formelzeichenverzeichnis	VIII
V.	Begriffs- und Definitionsverzeichnis.....	XI
1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangslage und Problemstellung.....	2
1.2	Forschungsfrage und Hypothesen	3
1.3	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit.....	4
2	Begriffe und theoretische Grundlagen.....	6
2.1	Untersuchungen zu Abschleppvorrichtungen und deren strukturellen Auswirkungen	6
2.1.1	Numerisch-simulative Untersuchungen	6
2.1.2	Experimentelle Untersuchungen unter Laborlasten	7
2.1.3	Militärische Prüfvorschriften als Referenzrahmen.....	8
2.1.4	Untersuchungen zur Anhängerkupplung als alternativer Krafteinleitungspunkt	9
2.1.5	Synthese und Forschungslücke.....	10
2.2	Normative Grundlagen für Abschlepp- und Anhängervorrichtungen	11
2.2.1	Systemübersicht und Begriffsdifferenzierung.....	11
2.2.2	Anforderungen an mechanische Verbindungseinrichtungen nach ECE-R55.....	12
2.2.3	Normierung nach DIN 74 054 und DIN 74 056	12
2.3	Strukturelle Auswirkungen auf Karosserie und Fahrwerk.....	13
2.3.1	Selbsttragende Karosserie und Strukturprinzip	13

2.3.2	Werkstoffe und erwartetes Versagensverhalten	14
2.3.3	Strukturelle Auswirkungen außergewöhnlicher Belastungen	15
2.4	Fahrwerksgeometrie und Verkehrssicherheit.....	16
2.4.1	Geometrische Kenngrößen.....	16
2.4.2	Einfluss von Strukturveränderungen auf die Geometrie	17
2.4.3	Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit	18
2.5	Prüf- und Begutachtungspraxis im Sachverständigenwesen	18
2.5.1	Begutachtung durch Kfz-Sachverständige.....	19
2.5.2	Lücke in der Prüfpraxis	19
3	Versuchskonzept und Methodik	20
3.1	Zieldefinition und Versuchsplanung	20
3.1.1	Untersuchungsziele	20
3.1.2	Auswahl der Versuchsfahrzeuge	20
3.1.3	Versuchsmatrix	21
3.2	Versuchsaufbau	22
3.2.1	Anforderungen an den Versuchsaufbau	23
3.2.2	Fixierung der Versuchsfahrzeuge	23
3.2.3	Zugrichtung.....	28
3.2.4	Anzugsgeschwindigkeit	30
3.2.5	Verbindungsmittel	32
3.2.6	Vorabschätzung der zu erwartenden Belastungen	35
3.2.7	Synthese zum Versuchsaufbau	38
3.2.8	Sicherheitskonzept	42
3.3	Messtechnisches Konzept	43
3.3.1	Anforderungen an die Messtechnik	43
3.3.2	Kraftmesskette.....	45
3.3.3	Karosserievermessung	46

3.3.4	Achsvermessung	49
3.3.5	Videodokumentation	51
3.3.6	Erfassung der Fahrbahntemperatur	52
3.4	Auswertungsmethodik.....	52
3.4.1	Auswertung der Kraft-Zeit-Verläufe.....	52
3.4.2	Auswertung der Geometrieabweichungen.....	53
3.4.3	Bewertungskriterien zur Hypothesenprüfung	55
4	Versuchsdurchführung und Ergebnisdarstellung	57
4.1	Rahmenbedingungen der Versuchsdurchführung.....	57
4.2	Vorbereitung der Versuchsfahrzeuge.....	58
4.3	Vorversuche zur Reproduzierbarkeit der Anzugsgeschwindigkeit.....	59
4.4	Aufbau des Versuchsstands	62
4.5	Durchführung der Zugversuche	64
4.6	Ergebnisdarstellung	65
4.6.1	Zustand der Krafteinleitungspunkte	66
4.6.2	Ergebnisse der Kraftmessung.....	68
4.6.3	Ergebnisse der Karosserievermessung	72
4.6.4	Ergebnisse der Achsvermessung	74
5	Bewertung der Versuchsergebnisse	77
5.1	Prüfung der Hypothesen	77
5.2	Vergleich der Krafteinleitungspunkte.....	82
5.3	Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext.....	84
5.4	Handlungsempfehlungen	85
5.5	Kritische Reflexion und Limitationen	87
6	Zusammenfassung und Ausblick	88
6.1	Beantwortung der Forschungsfrage.....	88
6.2	Fazit.....	88

6.3	Ausblick	89
	Literaturverzeichnis	90
	Anhang	

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Übersicht der Kapitel [Eigene Darstellung]	4
Abbildung 2.1: Diagramm zur plastischen Verformung der lokalen Stellen (vgl. [2, Abb. 6])	7
Abbildung 2.2: Untersuchte Kräfteeinwirkung an der Anhängerkupplung (vgl. [7, S. 12])	9
Abbildung 2.3: Darstellung der Forschungslücken [Eigene Darstellung]	10
Abbildung 2.4: Einbaulage Abschleppeinrichtung und Anhängervorrichtung [9].....	11
Abbildung 2.5: Darstellung einer selbsttragenden Karosserie [9].....	13
Abbildung 2.6: Vergleich Streckgrenze und Zugfestigkeit, Werte nach [18] [19] ...	14
Abbildung 2.7: Verschiebung des Frontrahmens bei 50 km/h (vgl. [20, Abb. 16]) ..	15
Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der geometrischen Kenngrößen [9] ...	16
Abbildung 2.9: Einfluss einer Anlenkpunktverschiebung auf die Radstellung [9] ..	17
Abbildung 2.10: Wirkungskette von Strukturverformung bis Verkehrssicherheit [Eigene Darstellung]	18
Abbildung 3.1: Versuchsfahrzeuge, links mit AHK, rechts mit AÖ	21
Abbildung 3.2: Fixierung Variante A, schematische Darstellung der Fixierung über Bremsspanner	24
Abbildung 3.3: Fixierung Variante B, schematische Darstellung der Fixierung der Vorderräder an Bodenankerpunkten	25
Abbildung 3.4: Fixierung Variante D, schematische Darstellung der Fixierung am vorderen Längsträger	26
Abbildung 3.5: Zugrichtung Variante A, schematische Darstellung Parallelzug.....	28
Abbildung 3.6: Zugrichtung Variante B, schematische Darstellung 30° zur Fahrzeuglängsachse	29
Abbildung 3.7: Verbindungsmittel Variante E, Kette mit Sollbruchglied	33

Abbildung 3.8: Schematischer Gesamtaufbau des Versuchs, Zugfahrzeug, Zugkette mit Kraftmessdose und Stahlseil im Schrägzug von 30°	39
Abbildung 3.9: Kraftmessdose AEP transducers Typ 20, Mobile Anzeige AE 703	45
Abbildung 3.10: Einbindung der Kraftmessdose in die Zugkette	46
Abbildung 3.11: Car-O-Tronic, System zur Vermessung der Karosseriegeometrie	47
Abbildung 3.12: Lage der Messpunkte für die Karosserievermessung	48
Abbildung 3.13: Bosch FWA 4630 zur Vermessung der Achsgeometrie	50
Abbildung 4.1: Heckansicht der beiden Versuchsfahrzeuge mit den unterschiedlichen Krafteinleitungspunkten	58
Abbildung 4.2: Darstellung des verwendeten Zugfahrzeugs	60
Abbildung 4.3: Ergebnisse des Vorversuchs zur Ermittlung der Wegstrecken für 5 km/h und 15 km/h.....	61
Abbildung 4.4: Schematische Darstellung zur realen Ermittlung des 30° Winkels	62
Abbildung 4.5: Grundaufbau des realen Zugversuchs, am Beispiel des Opel Corsa mit Abschleppöse	64
Abbildung 4.6: Anhängerkupplung vor den Zugversuchen	66
Abbildung 4.7: Anhängerkupplung nach dem 5 km/h Zugversuch	66
Abbildung 4.8: Anhängerkupplung nach dem 15 km/h Zugversuch	67
Abbildung 4.9: Abschleppöse vor den Zugversuchen	67
Abbildung 4.10: Abschleppöse nach dem 5 km/h Zugversuch	67
Abbildung 4.11: Abgerissene Abschleppöse & Stelle an der Karosserie	68
Abbildung 4.12: Kraft-Zeit-Verlauf, Zugversuch 5 km/h an der Anhängerkupplung	69
Abbildung 4.13: Kraft-Zeit-Verlauf, Zugversuch 15 km/h an der Anhängerkupplung	70
Abbildung 4.14: Kraft-Zeit-Verlauf, Zugversuch 5 km/h an der Abschleppöse	71
Abbildung 4.15: Kraft-Zeit-Verlauf, Zugversuch 15 km/h an der Abschleppöse	72

Abbildung 5.1: Grafische Darstellung der gemessenen Kräfte im Vergleich	78
Abbildung 5.2: Gesonderte Betrachtung ausgewählter Kenngrößen nach Achsvermessung.....	80
Abbildung 5.3: Änderung der Direktlänge je Messpunkt beider Fahrzeuge nach dem zweiten Versuch im Vergleich zum Streubereich von ± 3 mm	83

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Erfassung ausgewählter Belastungsereignisse und Schadensmerkmale in der Prüfpraxis nach eigener Einschätzung	19
Tabelle 3.1: Versuchsmatrix der experimentellen Untersuchung	21
Tabelle 3.2: Bewertung der Fixierungsvarianten (Nutzwertanalyse).....	27
Tabelle 3.3: Bewertung der Zugrichtungsvarianten (Nutzwertanalyse)	30
Tabelle 3.4: Bewertung der Anzugsgeschwindigkeit (Nutzwertanalyse).....	31
Tabelle 3.5: Bewertung der Verbindungsmittel (Nutzwertanalyse)	34
Tabelle 3.6: Belastbarkeit der Zugkettenelemente gegenüber abgeschätzter Kraft	37
Tabelle 3.7: Gesamtübersicht der Variantenentscheidung	39
Tabelle 3.8: Bewertungskriterien zur Prüfung der Hypothesen.....	56
Tabelle 4.1: Temperaturen an allen vier Rädern beider Versuchsfahrzeuge vor jedem Versuch	57
Tabelle 4.2: Spitzenkräfte der durchgeführten Zugversuche	68
Tabelle 4.3: Karosserievermessung, Differenz der Direktlänge Nullpunkt zum jeweiligen Bezugspunkt für Fahrzeug A mit AHK in mm.....	72
Tabelle 4.4: Karosserievermessung, Differenz der Direktlänge Nullpunkt zum jeweiligen Bezugspunkt für Fahrzeug B mit AÖ in mm.....	73
Tabelle 4.5: Achsvermessung, Veränderung der Hinterachswerte gegenüber Vorvermessungen	75
Tabelle 4.6: Achsvermessung, Veränderung der Vorderachswerte gegenüber Vorvermessungen	76
Tabelle 5.1: Zusammenfassender Vergleich der Krafteinleitungspunkte	82
Tabelle 5.2: Darstellung der Gerätemessunsicherheiten	87

Tabelle D. 1: Änderung der Bezugspunktanordnung.....	4
Tabelle D. 2: Zusammenfassung Koordinaten Karosserievermessung, AHK, Vorvermessung	8
Tabelle D. 3: Zusammenfassung Koordinaten Karosserievermessung, AHK, 5 km/h	12
Tabelle D. 4: Zusammenfassung Koordinaten Karosserievermessung, AHK, 15 km/h	16
Tabelle D. 5: Zusammenfassung Koordinaten Karosserievermessung, AÖ, Vorvermessung	20
Tabelle D. 6: Zusammenfassung Koordinaten Karosserievermessung, AÖ, 5 km/h	24
Tabelle D. 7: Zusammenfassung Koordinaten Karosserievermessung, AÖ, 15 km/h	28

III. Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil Club
AHK	Anhängerkupplung
AÖ	Abschleppöse
CAE	Computer Aided Engineering
CARLOS TC	Car Loading Standard Trailer Coupling
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnungsmessstreifen
ECE	Economic Commission for Europe
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
FAKRA	Fachnormenausschuss Kraftfahrzeuge
FEM	Finite-Elemente-Methode
GLONASS	Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
H1, H2, H3	Hypothese 1, 2 und 3
HU	Hauptuntersuchung
ISBN	Internationale Standardbuchnummer

ISO	International Organization for Standardization
Kfz	Kraftfahrzeug
LBF	Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit
Lkw	Lastkraftwagen
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale
Pkw	Personenkraftwagen
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SUV	Sport Utility Vehicle
TOP	Test Operations Procedure
ULSAB-AVC	UltraLight Steel Auto Body – Advanced Vehicle Concepts
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
V1, V2	Zugversuch 1 und 2
VO	Verordnung
WLL	Working Load Limit

IV. Formelzeichenverzeichnis

Kleinbuchstaben

f_a	Hz	Abtastfrequenz
$f_{s,max}$	Hz	höchste im Signal enthaltene Frequenzkomponente
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
l	m	Länge der Konstruktionslinie zur Einstellung des Zugwinkels
m_F	kg	Masse des Versuchsfahrzeugs
m_{Lkw}	kg	Masse des Zugfahrzeugs
m_{zul}	kg	technisch zulässige Gesamtmasse des Versuchsfahrzeugs
n	mm	Nachlaufstrecke
p_{Lkw}	kg · m/s	Impuls des Zugfahrzeugs
t	s	Zeit
v	m/s	Geschwindigkeit des Zugfahrzeugs

Großbuchstaben

D	kN	D-Wert
F	kN	mittlere Kraft während der Anstiegszeit
$F_{H,max}$	kN	maximale Haftreibungskraft
F_{max}	kN	Spitzenkraft des Zuges
F_{ref}	kN	normativer Referenzwert der Kraft

F_x	kN	Längskraft an der Kupplungskugel
F_y	kN	Seitenkraft an der Kupplungskugel
F_z	kN	Vertikalkraft an der Kupplungskugel
R	t	technisch zulässige Gesamtmasse des Anhängers
R_e	N/mm ²	Streckgrenze
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
S	kg	Stützlast der Anhängerkupplung
$S_{i,nach}$	mm	Direktlänge eines Bezugspunkts i nach dem Versuch
$S_{i,vor}$	mm	Direktlänge eines Bezugspunkts i vor dem Versuch
T	t	technisch zulässige Gesamtmasse des Zugfahrzeugs

Griechische Buchstaben

α	Grad	Achseinstellgröße
α_{nach}	Grad	Achseinstellwert nach dem Versuch
α_{vor}	Grad	Achseinstellwert vor dem Versuch
β	Grad	Sturzwinkel
γ	Grad	Nachlaufwinkel
δ	Grad	Spreizungswinkel
$\Delta\alpha$	Grad	Veränderung der Achseinstellgröße zwischen Vor- und Nachvermessung

ΔS_i	mm	Veränderung der Direktlänge des Bezugspunkts i
Δ_{ref}	mm	Signifikanzschwelle der Karosserievermessung
Δt	s	Anstiegszeit des Kraftaufbaus
μ_H	-	Haftreibungskoeffizient

V. Begriffs- und Definitionsverzeichnis

Begriff	Definition
Abschleppereinrichtung	Passiver Kraftaufnahmepunkt am Fahrzeug, der ausschließlich zur temporären Bergung eines nicht mehr fahrtüchtigen Fahrzeugs dient und auf statische Zugkräfte ausgelegt ist.
Abschleppöse	Einschraubbare oder fest verbaute Öse zur Aufnahme eines Abschleppmittels, typischerweise vorn und hinten am Fahrzeug.
Anhängerkupplung	Mechanische Verbindungseinrichtung am Heck eines Kraftfahrzeugs zum dauerhaften Betrieb mit Anhängern, ausgelegt auf wiederkehrende dynamische Wechselbelastungen im Gespannbetrieb.
Anlenkpunkt	Verbindungspunkt zwischen Fahrwerk und Karosserie, an dem die Radaufhängung mit der tragenden Struktur verbunden ist.
Bezugspunkt	Vom Fahrzeughersteller definierter Karosseriepunkt mit dokumentierter räumlicher Sollposition, der als Referenz für die Karosserievermessung dient.
Plastische Verformung	Bleibende, irreversible Verformung eines Werkstoffs nach Überschreiten der Streckgrenze.

Vorwort

Mit der Abgabe der hier vorliegenden Diplomarbeit neigt sich das Studium zum Dipl.-Ing. (FH) für Kraftfahrzeugtechnik, Schwerpunkt Instandhaltung und Unfallanalyse, an der Westsächsischen Hochschule Zwickau dem Ende zu. Diese Arbeit soll zeigen, dass ich das Gelernte anwenden und eine Problemstellung selbstständig wissenschaftlich bearbeiten kann.

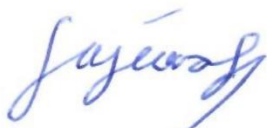
Bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Erbsmehl, dessen Ratschläge, konstruktiv ehrliche Kritik und wissenschaftliche Expertise entscheidend zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen haben. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan Schubert für die zusätzliche Begleitung und Expertise dieser Arbeit als Zweitbetreuer bedanken.

Ein besonderer Dank gilt ebenso Herrn Dipl.-Ing. (FH) Toni Dietel, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Guido Bau, Herrn Udo Frank und Herrn M.Sc. Marco Riedel, deren tatkräftige Unterstützung die praktische Umsetzung dieser Arbeit erst möglich gemacht haben. Bei der Vorbereitung, der Durchführung der Versuche und dem Umgang mit der Messtechnik standen mir diese jederzeit mit Rat und Tat zur Seite und haben mit ihrer Erfahrung wesentlich zum Gelingen des praktischen Teils beigetragen.

Auch bei meiner Familie und meinen Freunden möchte ich mich bedanken, dass sie mir während des gesamten Studiums und vor allem während der Zeit der Erstellung dieser Abschlussarbeit den nötigen Rückhalt gegeben und mich unterstützt haben.

Die Bearbeitung der „Untersuchung dynamischer Abschleppvorgänge und deren Einfluss auf die Karosserie- und Fahrwerksstruktur in Bezug auf die Verkehrssicherheit“ hat mir einen tiefen Einblick in die Faszination, Vielfalt und Komplexität fahrzeugtechnischer Fragestellungen gegeben. Dadurch bin ich motivierter denn je.

Zwickau, 17. August 2026



Tim Gajewski

1 Einleitung

Das Herausziehen festgefahrenen Personenkraftwagen durch andere Kraftfahrzeuge ist eine im Straßenverkehr regelmäßig auftretende Situation, die insbesondere unter widrigen Wetterbedingungen und abseits befestigter Fahrbahnen vorkommt. Allein der ADAC verzeichnete im Jahr 2025 insgesamt 3,7 Millionen Pannenhilfeeinsätze in Deutschland, statistisch gesehen einen Notruf alle neun Sekunden. Der pannenreichste Tag war dabei im Dezember. [1] Genau die Jahreszeit, in der festgefahrenen Fahrzeuge auf verschneiten Straßen und aufgeweichten Feldwegen besonders häufig auftreten. Diese Zahlen erfassen ausschließlich die Einsätze eines einzigen Automobilclubs und nur jene Fälle, in denen professionelle Hilfe angefordert wurde. Wie viele Bergungsversuche täglich durch Privatpersonen mit Abschleppseil oder Spanngurt unternommen werden, ohne in einer Statistik zu erscheinen, bleibt unbekannt.

Zwei exemplarisch fiktive Szenarien illustrieren die technische Ausgangssituation dieser Arbeit:

- Im ersten Fall gerät ein Pkw auf einem Feldweg zwischen Zwickau und Glauchau nach einem missglückten Wendemanöver in aufgeweichten Untergrund und sitzt tief im Schlamm fest. Ein Helfer befestigt ein Abschleppseil an der hinteren Abschleppöse des festgefahrenen Fahrzeugs und unternimmt mehrere Bergungsversuche mit zunehmendem Anlauf und größerer Seillänge. Das festgefahrenen Fahrzeug löst sich nur stückweise. Es wird schließlich durch einen Abschleppdienst mit Krangerät geborgen.
- Im zweiten Fall läuft ein Pkw auf einer Landstraße nördlich von Chemnitz nach starkem Schneefall auf einer Böschung auf und hängt mit dem Unterboden auf der Schneekuppe fest. Ein Helfer befestigt ein Seil an der Anhängerkupplung des festsitzenden Fahrzeugs und unternimmt drei Bergungsversuche mit steigendem Krafteinsatz, ohne Erfolg. Das Fahrzeug wird anschließend durch einen Pannendienst mit Seilzug befreit.

Beide Szenarien haben aus fahrzeugtechnischer Perspektive ein entscheidendes gemeinsames Merkmal, das gezogene Fahrzeug bleibt in allen Versuchen ungelöst. Jedes Mal, wenn das Zugseil straff wird, wird die kinetische Energie des ziehenden Fahrzeugs als impulsartiger Kraftstoß in die Fahrzeugstruktur eingeleitet.

In beiden Fällen über Krafteinleitungspunkte am Fahrzeugheck, im ersten Fall über die hintere Abschleppöse und im zweiten über die Anhängerkupplung in die hintere Trägerstruktur. Da das festsitzende Fahrzeug die eingeleitete Energie nur begrenzt durch Bewegung abbauen kann, wird sie überwiegend von der Struktur aufgenommen. Bleibt ein Versuch erfolglos, wird der nächste denkbar mit größerem Anlauf unternommen, sodass das Fahrzeug jeden dieser Schläge ohne Ausweichmöglichkeit aufnimmt. Die Auswirkungen auf die Fahrzeugstruktur, Fahrwerk und Abschleppvorrichtung sind dabei bislang technisch nicht ausreichend erfasst.

Als Zugfahrzeug kommen im realen Bergungsfall die unterschiedlichsten Fahrzeugtypen zum Einsatz. Das Spektrum reicht vom kleinen Pkw über schwere Geländewagen und SUVs bis hin zu Lkw, Unimog und Winterdienst- oder Räumfahrzeugen. Gerade unter winterlichen Bedingungen, unter denen Fahrzeuge sich besonders häufig festfahren, sind schwere Bergungsfahrzeuge ohnehin im Einsatz und werden zum Herausziehen eingesetzt. Mit größerer Masse und Motorleistung des Zugfahrzeugs steigt dabei die übertragbare Zugkraft, sodass schwere Zugfahrzeuge deutlich höhere Belastungen in die Struktur des gezogenen Fahrzeugs einleiten können als leichtere.

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Das Herausziehen festgefahrenen Fahrzeuge unterscheidet sich grundlegend vom klassischen Abschleppen eines fahrunfähigen, aber frei rollenden Fahrzeugs. Beim regulären Abschleppen wirkt denkbar eine weitgehend gleichmäßige, quasistatische Zugkraft auf die Fahrzeugstruktur. Beim Bergungsvorgang entsteht hingegen ein hochdynamischer Belastungszustand. Die kinetische Energie des ziehenden Fahrzeugs wird beim Straffen des Seils innerhalb kürzester Zeit als Kraftstoß in die Struktur des festsitzenden Fahrzeugs eingeleitet. Die dabei auftretenden Kraftspitzen können die normativen Prüflasten für Abschlepp- und Anhängervorrichtungen vermutlich erheblich überschreiten. Eine systematische experimentelle Untersuchung hierzu existiert bislang nicht.

Besonders kritisch sind Fälle, in denen der erste Bergungsversuch erfolglos bleibt. In der Praxis reagieren Fahrzeugführer auf einen misslungenen Versuch häufig mit einer Steigerung der Einwirkung durch größeren Anlaufweg, höhere Geschwindigkeit und ein längeres effektives Zugseil. Physikalisch bedeutet dies eine

überproportionale Zunahme der übertragenen Impulskräfte. Mehrere erfolglose Versuche können so zu einer kumulativen Belastung der Fahrzeugstruktur führen, deren Gesamtauswirkung auf Fahrzeugstruktur, Fahrwerk und Abschleppvorrichtung bislang vollständig unbekannt ist.

Überschreiten die eingeleiteten Kräfte die Elastizitätsgrenze der betroffenen Bauteile, entstehen plastische Verformungen, die weder vom Fahrzeugführer noch im Rahmen einer Sichtprüfung erkannt werden können. Bereits geringfügige bleibende Verformungen im Bereich der hinteren Fahrwerksanbindungen können sicherheitsrelevante Fahrwerksparameter, insbesondere Spur und Sturz an der Hinterachse, verändern und damit Fahrstabilität sowie Bremsverhalten beeinträchtigen.

Der rechtliche und normative Rahmen erfasst diese Belastungssituation nicht. Die geltenden Vorschriften der StVZO sowie europäische Regelwerke definieren Anforderungen an Abschlepp- und Anhängervorrichtungen ausschließlich für statische Prüflasten und den regulären Anhängerbetrieb. Eine Regelung, die den Lastfall des Herausziehens festgefahrener Fahrzeuge erfasst, existiert nicht. Ebenso fehlt eine technische Grundlage, anhand derer im Sachverständigenwesen beurteilt werden könnte, ob ein Fahrzeug nach einem Bergungsvorgang einer weitergehenden Überprüfung bedarf. Die Frage ob die Betriebserlaubnis durch entstandene Strukturveränderungen berührt wird, bleibt offen.

1.2 Forschungsfrage und Hypothesen

Die vorliegende Arbeit verfolgt einen hypothesengeleiteten Ansatz. Auf Basis der in Kapitel 2.1.5 identifizierten Forschungslücke werden dazu drei prüfbare Hypothesen formuliert, die den experimentellen Untersuchungen in Kapitel 4 zugrunde liegen.

Hypothese 1 (H1)

Beim dynamischen Abschleppen festgefahrener Pkw über die hintere Abschleppöse oder die Anhängerkupplung treten impulsartige Zugkräfte auf, die normativ geprüfte statische Mindestlasten deutlich überschreiten. Die Kraftspitzen nehmen mit steigender Anzugsgeschwindigkeit zu.

Hypothese 2 (H2)

Wiederholte, erfolglose Bergungsversuche führen zu messbaren, plastischen Verformungen der Karosseriestruktur des gezogenen Fahrzeugs, speziell im Bereich

der Krafteinleitung. Diese Verformungen sind ohne gezielte messtechnische Untersuchung nicht erkennbar.

Hypothese 3 (H3)

Die durch Bergungsvorgänge verursachten strukturellen Veränderungen bewirken messbare Abweichungen sicherheitsrelevanter Fahrwerksparameter, insbesondere von Spur und Sturz an der Hinterachse, die über die Herstellertoleranzen hinausgehen.

Als Forschungsfrage stellt sich, welche strukturellen Auswirkungen dynamische und wiederholte Abschleppvorgänge auf die Fahrzeugstruktur und das Fahrwerk von Personenkraftwagen haben und wie diese die Verkehrssicherheit beeinflussen.

1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist die experimentelle Untersuchung dynamischer Abschleppvorgänge und die Bewertung ihrer strukturellen Auswirkungen auf Fahrzeugstruktur und Fahrwerk von Personenkraftwagen im Kontext der Verkehrssicherheit. Die Arbeit ist so konzipiert, dass ihre Ergebnisse als Grundlage für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen sowie für technische Bewertungen im Rahmen des Sachverständigenwesens verwendbar sind.

Die Herangehensweise zur Bearbeitung der vorliegenden Aufgabenstellung gliedert sich wie folgt (Abbildung 1.1).

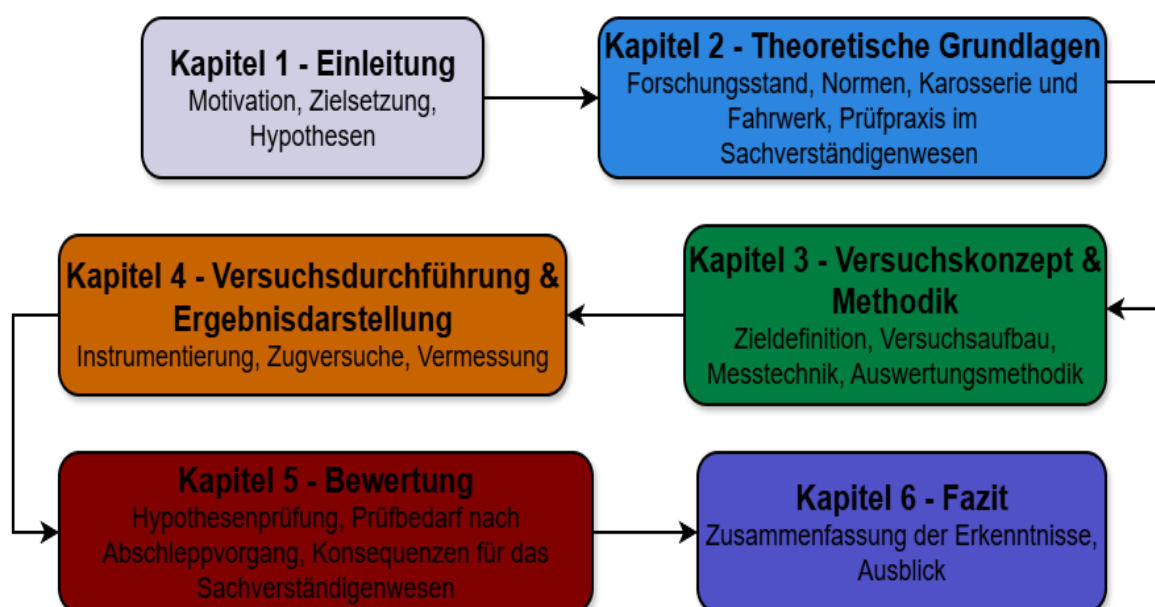


Abbildung 1.1: Übersicht der Kapitel [Eigene Darstellung]

Kapitel 2 schafft die theoretische Grundlage der Arbeit. Es zeigt den Stand der Technik zu Prüfverfahren für Abschleppvorrichtungen und zu vergleichbaren Belastungsuntersuchungen auf. Anschließend werden der normative und rechtliche Rahmen, die relevanten Strukturbereiche von Karosserie und Fahrwerk sowie die Kenngrößen der Fahrwerksgeometrie behandelt. Den Abschluss bildet die Prüf- und Begutachtungspraxis im Sachverständigenwesen.

In **Kapitel 3** erfolgt die Versuchsplanung. Aus der Zieldefinition werden die Versuchsfahrzeuge ausgewählt, der Versuchsaufbau begründet, die Messtechnik festgelegt und den Hypothesen die Prüfkriterien zugeordnet.

Kapitel 4 bildet den praktischen Kern der Arbeit. Der Versuchsstand wird aufgebaut, die Abschleppversuche durchgeführt und die erfassten Messdaten dargestellt. Diese umfassen die Zugkraftverläufe sowie die Karosserie- und Achsvermessung vor und nach den Versuchen.

Kapitel 5 bewertet die Ergebnisse. Die drei Hypothesen werden anhand der Messdaten geprüft, die beiden Krafteinleitungspunkte verglichen und die Ergebnisse in den Stand der Technik eingeordnet. Daraus werden Handlungsempfehlungen für die Prüf- und Begutachtungspraxis abgeleitet, gefolgt von einer kritischen Reflexion der Methodik.

Die Schlussbetrachtung in **Kapitel 6** fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammen, beantwortet die Forschungsfrage und gibt einen Ausblick auf weiterführende Untersuchungen.

2 Begriffe und theoretische Grundlagen

Dynamische Abschleppvorgänge und deren strukturelle Auswirkungen auf Pkw sind in der wissenschaftlichen Literatur bislang kaum systematisch untersucht. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zu den relevanten Themenbereichen. Dies umfasst Abschleppvorrichtungen und ihre normative Prüfung, strukturelle Belastungen von Karosserie und Fahrwerk sowie die Bewertungspraxis in Bezug auf die Verkehrssicherheit im Sachverständigenwesen. Auf dieser Grundlage wird die bestehende Forschungslücke identifiziert und die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit konkretisiert.

2.1 Untersuchungen zu Abschleppvorrichtungen und deren strukturellen Auswirkungen

Abschleppvorrichtungen an Pkw stehen im Spannungsfeld zweier grundlegend verschiedener Anforderungen. Einerseits müssen sie die normative Mindestfestigkeit erfüllen, die im Rahmen der Fahrzeugtypgenehmigung nachgewiesen wird. Andererseits unterliegen sie der tatsächlichen Beanspruchung im Betrieb, die von der entsprechenden Prüfgröße erheblich abweichen kann. Wissenschaftliche Untersuchungen zu diesem Themenfeld lassen sich in drei methodische Kategorien einteilen:

- Numerisch-simulative Strukturanalysen
- Experimentelle Untersuchungen unter definierten Laborlasten
- Prüfvorschriften mit Feldbezug

2.1.1 Numerisch-simulative Untersuchungen

Wang untersuchte unter anderem die Festigkeit einer vorderen Abschleppöse mittels der Finite-Elemente-Methode (**FEM**) unter zwei definierten Lastfällen. Einem axialen Geradeauszug sowie einem Schrägzug unter 30° zur Fahrzeuglängsachse. Unter dem axialen Lastfall blieb die maximale Spannung mit 132 MPa deutlich unterhalb der Zugfestigkeit des verwendeten Werkstoffs Q235-A von 422 MPa, die Restverformung nach Entlastung betrug 2,4 mm. Unter dem Schrägzug überschritt die Spannung mit 447 MPa die Zugfestigkeit, die plastische Restverformung betrug etwa 25 mm, vgl. Abbildung 2.1. [2, S. 1114 f.]

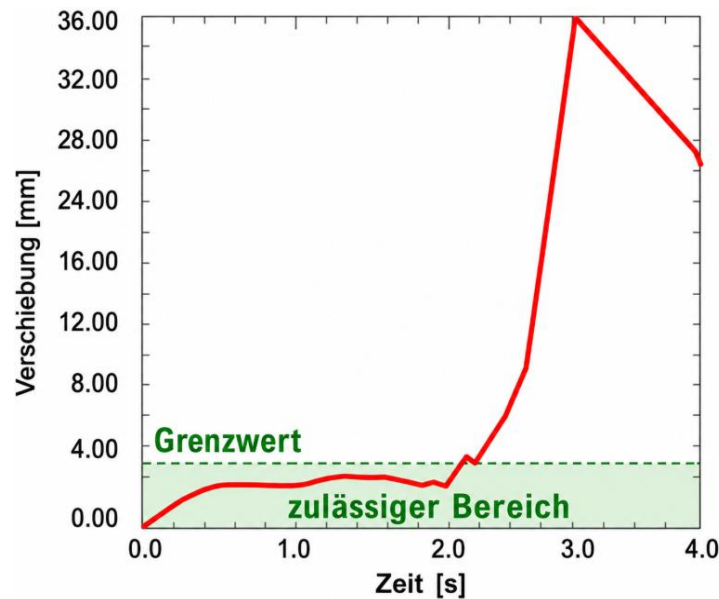


Abbildung 2.1: Diagramm zur plastischen Verformung der lokalen Stellen (vgl. [2, Abb. 6])

Für die vorliegende Arbeit ist dies relevant, da der Schrägzug damit vermutlich einen deutlich kritischeren Lastfall als der axiale Zug darstellt. Zugleich deutet sich an, dass plastische Verformungen im Inneren der Krafteinleitungsstruktur entstehen könnten, ohne äußerlich erkennbar zu sein. Die Untersuchung beschränkt sich jedoch auf statische, numerisch simulierte Lasten. Reale Zugkräfte werden nicht gemessen sowie Auswirkungen auf Karosserie und Fahrwerk nicht direkt betrachtet.

2.1.2 Experimentelle Untersuchungen unter Laborlasten

Eine bekannte Studie, bei welcher an einer Abschleppöse Zugbedingungen getestet wurden, stammt von Santos. [3, S. 1] Die Autoren applizierten Delta-Rosetten-DMS an der Grundplatte einer Lkw-Abschleppöse und brachten bei blockierten Rädern eine horizontal einwirkende Zugkraft von 181 kN auf. [3, S. 5 f.] Die bleibende Restverschiebung der Grundplatte betrug 0,9 mm [3, S. 10] und bestätigt eine plastische Verformung des Werkstoffs an der Messstelle.

Die Untersuchung weist drei wesentliche Einschränkungen auf, die für das hier untersuchte Szenario entscheidend sind:

- Erstens wurde die Last quasistatisch aufgebracht, also mit kontinuierlicher Kraftsteigerung bis etwa 110 Sekunden. [3, Abb. 16] Der für Bergungsvorgänge charakteristische, impulsartige Krafteintrag durch schlagartiges Straffwerden eines Seils wurde nicht reproduziert.

- Zweitens bezieht sich die Untersuchung auf einen Lkw, nicht auf die Struktur eines Pkw.
- Drittens wurden nicht die Auswirkungen auf die umgebende Karosserie oder die Fahrwerksgeometrie gesondert untersucht.

Petracconi untersuchte das Ermüdungsverhalten einer hinteren Abschleppöse eines Pkw. Die Baugruppe wurde zyklisch mit Lasten beaufschlagt, die zuvor während des Schiffstransports von Fahrzeugen aufgezeichnet worden waren. Eine Rissinitiierung trat nach durchschnittlich 963 Lastzyklen auf, unterhalb der spezifizierten Mindestlebensdauer von 1.000 Zyklen. Als kritische Schwachstelle wurden die Schweißnähte zwischen Crashbox und Grundplatte identifiziert. [4, S. 462]

Bedeutsam für die vorliegende Arbeit ist die Verteilung der Schadensanteile. Eine geringe Anzahl von Lastzyklen mit einer Spannungsschwingbreite oberhalb von 400 MPa war für den überwiegenden Anteil der Ermüdungsschädigung verantwortlich, während viele kleine Amplituden nur marginal beitrugen. [4, S. 462] Übertragen auf den Abschleppvorgang legt es nahe, dass einzelne impulsartige Zugspitzen ein höheres Schadensrisiko darstellen als eine Vielzahl subkritischer Lastzyklen. Die Untersuchung beschränkt sich jedoch auf reproduzierbare Transportlasten, impulsartige Bergungskräfte wurden nicht betrachtet.

2.1.3 Militärische Prüfvorschriften als Referenzrahmen

Der einzige bekannte institutionelle Rahmen, der reale Bergungsvorgänge messtechnisch erfasst, stammt aus dem militärischen Bereich. Das U.S. Army Test and Evaluation Command veröffentlichte dazu die „Test Operations Procedure TOP 02-2-618 Towing and Recovery“. [5] Sie prüft die Abschlepp- und Bergefähigkeit von Bergefahrzeugen. Für die Zugkraftmessung an der Anhängervorrichtung fordert diese eine Messunsicherheit von $\pm 0,5$ % des Vollausschlags. [5, S. 8] Für die Seilkraftmessung der Winde gilt eine Mindestdatenerfassungsrate von 100 Hz. [5, S. 33]

Für zivile Pkw-Bergungsszenarien ist die Vorschrift dennoch nur begrenzt aussagekräftig. Ihre Abschleppprüfungen sind primär auf Abschleppstangen ausgerichtet, die Prüfung von Ketten und Anschlagmitteln ist ausgenommen. [5, S. 3] Die Festigkeitsanforderungen für die Abschleppstangen sind rein statisch als Vielfaches der Fahrzeugmasse definiert. [5, S. 23] Dynamische Anteile aus Anfahren und

ruckartigem Anziehen sind nur als Bemessungsgrund für den Sicherheitsfaktor der Anschlagmittel genannt. [5, S. 24] In die Beurteilung des Krafteinleitungspunkts am Fahrzeug fließen sie nicht ein.

2.1.4 Untersuchungen zur Anhängerkupplung als alternativer Krafteinleitungspunkt

Neben der Abschleppöse stellt die Anhängerkupplung den zweiten wesentlichen Krafteinleitungspunkt am Fahrzeugheck dar. Konstruktion und Normung beider Vorrichtungen behandelt Kapitel 2.2. Für den Forschungsstand ist relevant, dass die Prüfanforderungen nach ECE-R55 auf Lasten im Gespannbetrieb beruhen. [6, Abs. 1.2.2] Ausgangsgröße der dynamischen Prüfung ist der D-Wert, definiert als theoretischer Vergleichswert für die Deichselkraft zwischen Zugfahrzeug und Anhänger. [6, Anh. 6, Abs. 1.5] Der Lastfall eines festgefahrenen, unbeweglichen Fahrzeugs unter impulsartiger Zugkraft ist normativ nicht definiert.

Das am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit entwickelte Prüfverfahren **CARLOS TC** bildet die Belastung deutlich realitätsnäher ab. Es beruht auf 42 Verifikationsversuchen und Messungen von Fahrzeugherstellern und berücksichtigt die an der Kupplungskugel wirkenden Längs-, Seiten- und Vertikalkräfte, siehe Abbildung 2.2. [7, S. 10, 12]

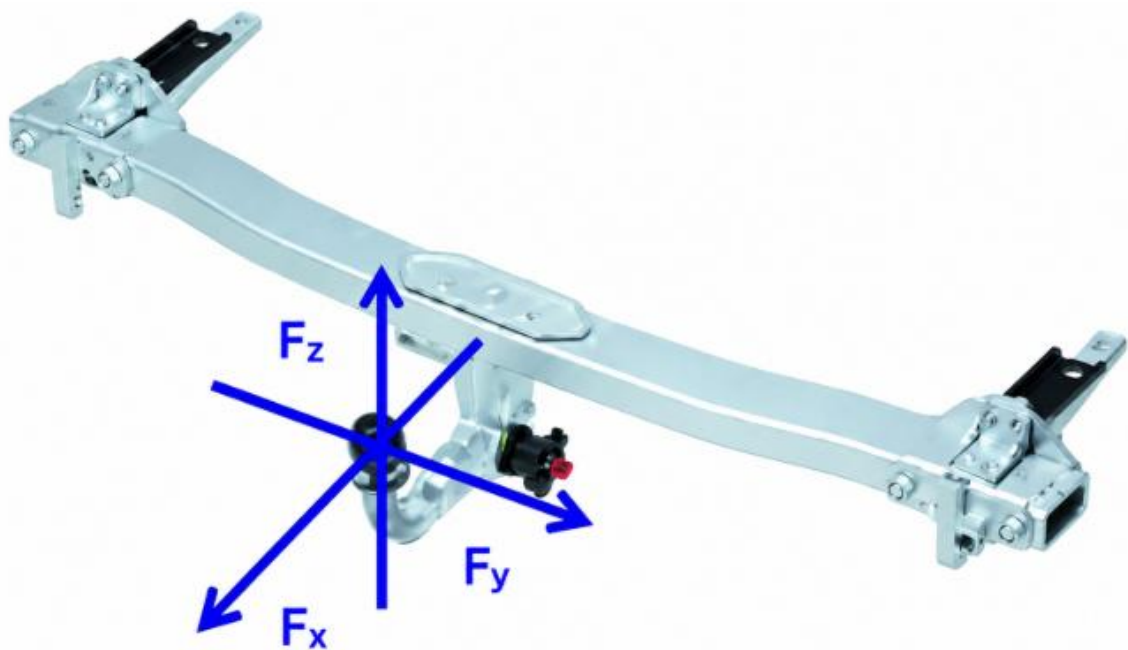


Abbildung 2.2: Untersuchte Kräfteeinwirkung an der Anhängerkupplung (vgl. [7, S. 12])

Die Prüfung erfolgt am Fahrzeug einschließlich Karosserie. [7, S. 17] Dadurch werden auch Schäden in der umgebenden Struktur erfasst. [7, S. 22 ff.] Für das untersuchte Szenario ist **CARLOS TC** dennoch nicht anwendbar. Die zugrundeliegenden Messungen stammen aus dem Betrieb mit Anhängern. Bergungsvorgänge an festgefahrenen Fahrzeugen werden nicht untersucht. Zudem zielt das Verfahren auf den Ermüdungsnachweis unter wiederholten Betriebslasten ab, nicht auf die Wirkung einzelner impulsartiger Lastspitzen.

2.1.5 Synthese und Forschungslücke

Die Analyse der vorhandenen Literatur zeigt ein konsistentes Bild. Keine der bekannten Untersuchungen bildet die impulsartige Krafteinleitung nach, die beim dynamischen Ziehen an einem festgefahrenen Fahrzeug entsteht. Daraus ergeben sich vier kausal aufeinander aufbauende Forschungslücken, siehe Abbildung 2.3.

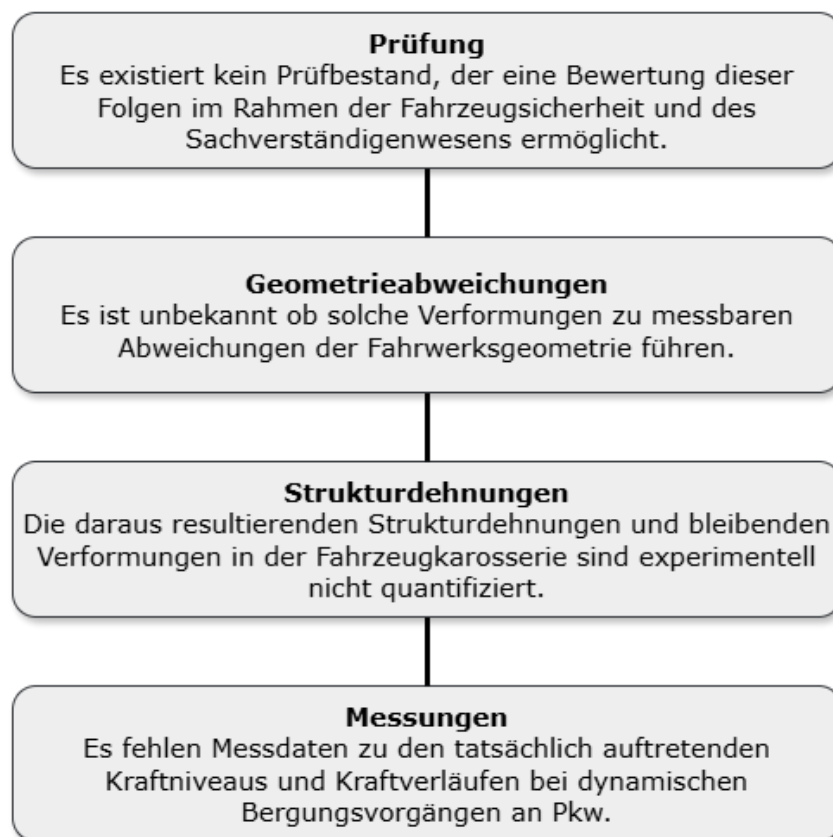


Abbildung 2.3: Darstellung der Forschungslücken [Eigene Darstellung]

Die vorliegende Arbeit adressiert diese vier Lücken durch einen experimentellen Ansatz, der reale Bergungsszenarien unter kontrollierten Bedingungen nachstellt und dabei die Zugkraft, die Karosseriegeometrie und die Fahrwerksgeometrie durchgängig erfasst.

2.2 Normative Grundlagen für Abschlepp- und Anhänger- vorrichtungen

2.2.1 Systemübersicht und Begriffsdifferenzierung

Im Fahrzeugbereich sind zwei Systeme mit unterschiedlichen Prüfanforderungen zu unterscheiden, siehe Abbildung 2.4. Eine strikte Trennung besteht dabei nicht, da die Funktion der hinteren Abschleppeinrichtung auch von einer mechanischen Verbindungseinrichtung erfüllt werden kann. [8, Anh. VII, Abs. 1.1.3]

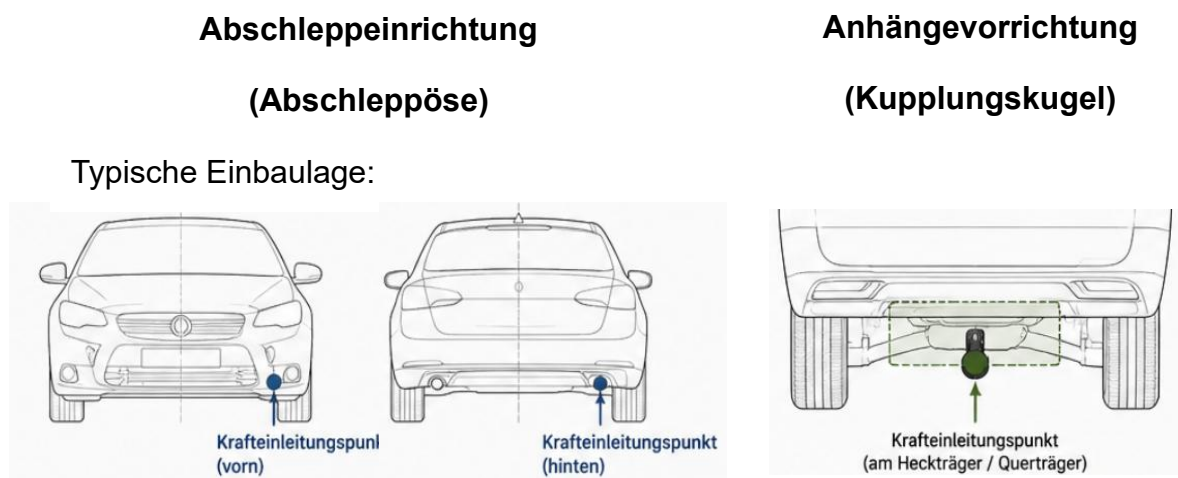


Abbildung 2.4: Einbaulage Abschleppeinrichtung und Anhängevorrichtung [9]

Abschleppeinrichtungen sind nach Verordnung **(EU) 2019/2144** typgenehmigungspflichtig. [10, Anh. II, F8] Die technischen Anforderungen legt die Durchführungsverordnung **(EU) 2021/535** in Anh. VII fest. [8, Anh. VII] Danach wird mit einer statischen Zug- und Druckkraft geprüft. Diese entspricht der Schwerkraft, die auf mindestens die halbe technisch zulässige Gesamtmasse des beladenen Fahrzeugs wirkt. Die Prüfkraften werden ausschließlich horizontal in Fahrzeuginnenrichtung aufgebracht. (vgl. [8, Anh. VII, Abs. 1.2.1, 2.2])

Die Pflicht zur Vorhaltung ergibt sich zusätzlich aus **§ 43 Abs. 2 StVZO**. Danach müssen mehrspurige Kraftfahrzeuge mit mehr als einer Achse vorn eine ausreichend bemessene Einrichtung zum Befestigen eines Abschleppmittels aufweisen. Pkw benötigen eine solche Einrichtung auch hinten, sofern nach der Betriebserlaubnis eine Anhängelast zulässig ist. [11, § 43 Abs. 2]

Die Anhängevorrichtung ist für den Gespannbetrieb bestimmt. [6, Abs. 1.2.2] Ihre Festigkeit ist über einen Dauerschwingversuch nachzuweisen. [6, Anh. 6, Abs. 1.2]

Für keines der beiden Systeme ist der dynamische Lastfall am unbeweglichen Fahrzeug definiert oder geprüft.

2.2.2 Anforderungen an mechanische Verbindungseinrichtungen nach ECE-R55

Für Anhängervorrichtungen gilt die in der Verordnung **(EU) 2019/2144** referenzierte **ECE-Regelung Nr. 55**. [10, Anh. I] Für den Pkw-Bereich ist die Kupplungskugel mit 50 mm Durchmesser nach **DIN 74 058** genormt. [12] Die zentrale Auslegungsgröße der Norm ist der D-Wert. Er gilt als theoretischer Vergleichswert zwischen Zugfahrzeug und Anhänger für die Deichselkraft. Als solcher dient er als Ausgangswert für eine horizontale Prüfkraft bei dynamischen Prüfungen. [6, Abs. 2.11.1] Für Einrichtungen, die keine Stützlasten übertragen, berechnet er sich nach:

$$D = g \cdot \frac{T \cdot R}{T + R} \quad (2.1)$$

Dabei bezeichnen T die technisch zulässige Gesamtmasse des Zugfahrzeugs in Tonnen, R die technisch zulässige Gesamtmasse des Anhängers mit senkrecht freibeweglicher Zugeinrichtung in Tonnen sowie g die Erdbeschleunigung mit $9,81 \text{ m/s}^2$. [6, Abs. 2.11.1]

Der **D-Wert** ist für die vorliegende Arbeit bedeutsam, weil er die maßgebliche normierte Kenngröße für die horizontale Belastbarkeit einer Anhängerkupplung darstellt. Er beschreibt jedoch eine Betriebslast im Gespannbetrieb und ist nicht auf impulsartige Bergungslasten übertragbar. Damit ergibt sich für die Anhängerkupplung ebenso eine normative Lücke wie für die Abschleppeinrichtung.

2.2.3 Normierung nach DIN 74 054 und DIN 74 056

Für Zugösen im Nutzfahrzeugbereich legt **DIN 74 054 Teil 1** Abmessungen und Werkstoffe fest. [13] Die zulässige Belastung wird über den D-Wert bestimmt, der sich rechnerisch aus der zulässigen Gesamtmasse von Zug- und Anhängefahrzeugen ergibt, vgl. (2.1). **DIN 74 054 Teil 2** begrenzt die Anwendung auf Fahrzeuge bis 25 km/h mit einem maximalen D-Wert von 65 kN. [14] Für Pkw-Abschleppösen sind diese Normen nicht unmittelbar anwendbar, entsprechend gilt der **normative Prüfwert**, siehe Abschnitt 3.4.1. Auch die Abschleppkupplung nach **DIN 74 056** gibt mit dem zulässigen Anhängegesamtgewicht eine quantitative Bemessungsgröße vor, ohne dabei auf eine bestimmte Fahrzeugklasse beschränkt zu sein. [15]

2.3 Strukturelle Auswirkungen auf Karosserie und Fahrwerk

2.3.1 Selbsttragende Karosserie und Strukturprinzip

Die Karosserie übernimmt bei der selbsttragenden Bauweise selbst die tragende Funktion, siehe Abbildung 2.5. Fahrwerksteile und Aggregate sind unmittelbar an ihr befestigt. [16, S. 498] Die Anschraubpunkte von Fahrwerksteilen liegen direkt an steifen Bereichen der Karosserie. [16, S. 510] Veränderungen dieser Strukturbereiche wirken sich daher unmittelbar auf die Lage der Anlenkpunkte aus.

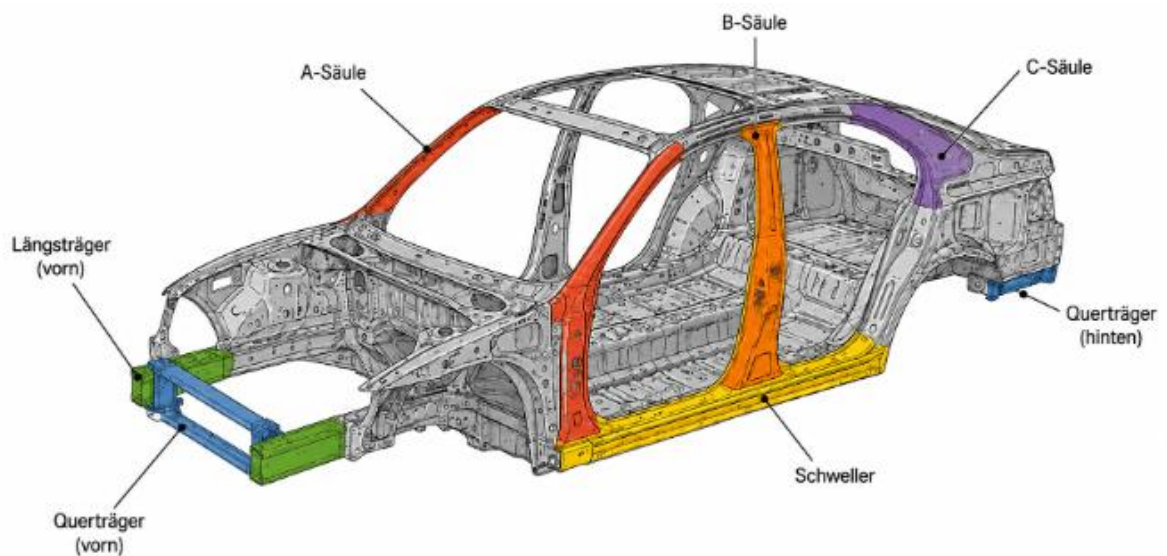


Abbildung 2.5: Darstellung einer selbsttragenden Karosserie [9]

Die Lastpfade des Vorder- und Hinterwagens sind denkbar primär auf axiale Druckbeanspruchung ausgelegt. Unter axialer Druckbelastung sollen die Profile durch fortlaufende Faltenbildung versagen. [17, S. 144 ff.] Im Fahrzeug soll der Energieabbau bei einem Frontalaufprall vorrangig in der Vorderwagenstruktur und den Längsträgern erfolgen. [16, S. 511] Wird eine Kraft über die Abschleppereinrichtung oder die Anhängerkupplung eingeleitet, erfolgt die Weiterleitung über dieselben Strukturbauteile, jedoch als Zugbeanspruchung. Die Anbindung liegt dabei in der tragenden Struktur selbst. An einer exemplarischen Rohkarosserie ist bspw. die hintere Abschleppöse am Hinterrahmen befestigt, die vordere über eine eingeschweißte Verstärkung mit einer Gewindeplatte am Längsträger. [16, S. 502, 504] Normativ wird dieser Lastfall als statischer Prüfwert am Anbindungsbauteil geprüft, vgl. Abschnitt 2.2.1. Die Beanspruchung des anschließenden Lastpfads bleibt

ungeprüft. Damit besteht eine Differenz zwischen der Auslegung der Karosserie und dem dynamischen Lastfall eines Abschleppvorgangs.

2.3.2 Werkstoffe und erwartetes Versagensverhalten

Für die Bewertung möglicher Strukturschäden ist entscheidend, aus welchen Werkstoffen die beteiligten Bauteile bestehen. Der Vergleich der Festigkeiten von Krafteinleitungspunkt und tragender Karosseriestruktur zeigt, an welcher Stelle unter einer überhöhten Belastung eine bleibende Verformung zu erwarten ist.

Die Krafteinleitung über die Abschleppöse erfolgt unmittelbar in die tragenden Bauteile, siehe Abschnitt 2.3.1. Der Anteil des früher dominierenden Qualitätsstahls ST14 liegt in modernen Karosserien mittlerweile unter 50 Prozent und wurde durch Stähle mit teils deutlich höheren Streckgrenzen ersetzt. [16, S. 507 f.] Höher- und höchstfeste Sorten werden gezielt in einzelnen Bereichen zur Verstärkung eingesetzt, mit Streckgrenzen bis 1.500 MPa. [16, S. 504, 508] Für konventionelle weiche Stahlsorten weist die Werkstoffliste des ULSAB-AVC Konsortiums eine Streckgrenze von **140 MPa** bei einer Zugfestigkeit von **270 MPa** auf. [18, S. 115]

Abschleppösen und Anhängerkupplungen sind hingegen als kompakte, massive Bauteile konzipiert. Für Zugösen mit Schweißende legt DIN 74 054 Teil 1 den Stahl St 52-3 fest. [13, S. 4] Dessen Streckgrenze beträgt **355 MPa** bei einer Zugfestigkeit von **470 MPa**. [19, II 1/7] Diese Angaben stammen aus dem Nutzfahrzeugbereich und dienen als Anhaltswert für die Werkstoffklasse. Abbildung 2.6 stellt beide Werkstoffe gegenüber.

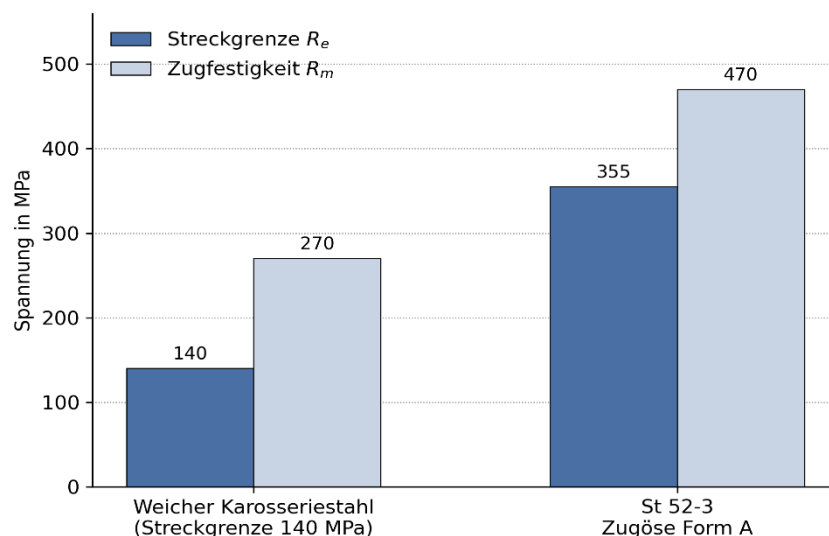


Abbildung 2.6: Vergleich Streckgrenze und Zugfestigkeit, Werte nach [18] [19]

Für die Anhängervorrichtung besteht keine vergleichbare Festlegung. **DIN 74 058** normt allein Maße und Freiräume der Kupplungskugel. [12] Die Absicherung erfolgt über die Bauartgenehmigung und die dazugehörigen Prüfkkräfte, nicht allein über eine Werkstoffvorgabe. [12]

Aus dem Vergleich ergibt sich jedoch eine Erwartung für den Versuch. Der Krafteinleitungspunkt besteht aus einem festeren Werkstoff als der umgebende Karosseriewerkstoff. Unter einer überhöhten Zugbelastung wäre daher weniger ein Versagen des Anbindungsbauteils zu erwarten als eine Verformung der Karosseriestruktur. Entscheidend ist allerdings nicht die Streckgrenze allein, sondern das Zusammenwirken von Werkstofffestigkeit und Bauteilquerschnitt.

2.3.3 Strukturelle Auswirkungen außergewöhnlicher Belastungen

Die Streckgrenze bezeichnet die Spannung, oberhalb derer ein Werkstoff bleibend verformt wird. Diese Verformungen verändern Geometrie und Steifigkeit der Struktur. Kim und Cho untersuchten Schweißreparaturen am Vorderrahmen eines Pkw durch Zugversuche und Kollisionssimulationen. Die Festigkeit des reparierten Bereichs reduzierte sich um 20 Prozent, die Steifigkeit um 2 bis 4 Prozent bei 30 km/h. Bei 50 km/h fällt die aufnehmbare Kraft deutlich ab, siehe Abbildung 2.7. [20, S. 274 f.] Selbst eine lokal begrenzte Strukturveränderung wirkt sich somit auf das Verhalten der umgebenden Struktur aus, auch wenn hier eine Schweißreparatur und keine Zugverformung die Ursache war. Ob eine impulsartige Zugbelastung am Krafteinleitungspunkt vergleichbare Folgen hat, ist damit nicht geklärt.

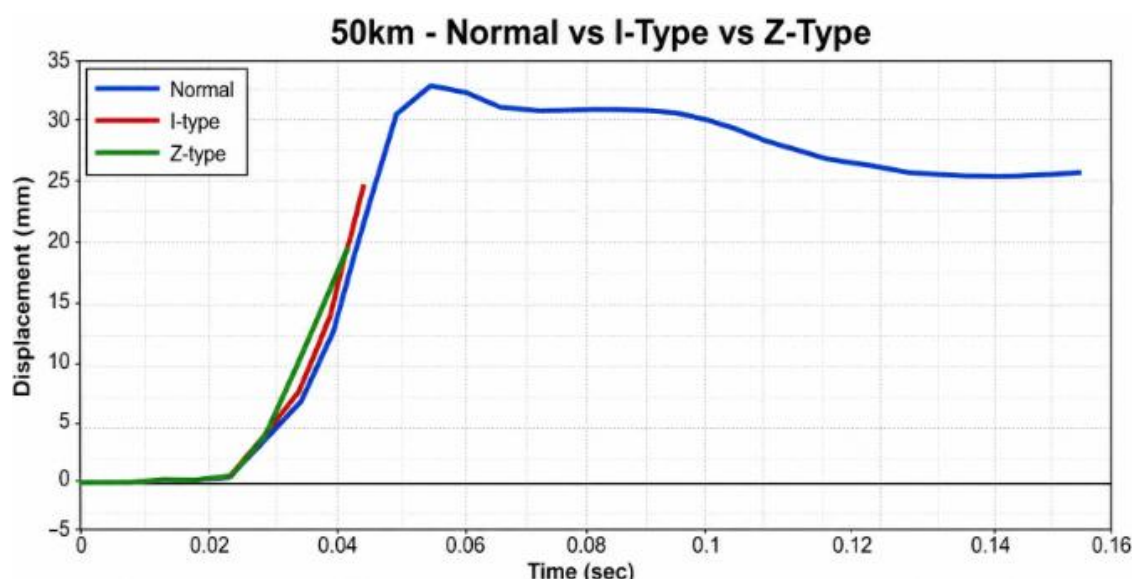


Abbildung 2.7: Verschiebung des Frontrahmens bei 50 km/h (vgl. [20, Abb. 16])

2.4 Fahrwerksgeometrie und Verkehrssicherheit

2.4.1 Geometrische Kenngrößen

Die Fahrwerksgeometrie eines Pkw wird durch eine Reihe definierter Winkel- und Lagebeziehungen zwischen Rad, Radaufhängung und Fahrzeugaufbau beschrieben. Die wichtigsten Kenngrößen sind **Spur**, **Sturz**, **Nachlauf** und **Spreizung**, diese werden in vereinfachter Form in Abbildung 2.8 dargestellt. Ein Teil dieser kinematischen Kenngrößen ist in ISO 8855 und DIN 70000 genormt. [16, S. 726]

- Die **Spur** ist positiv, wenn die Räder einer Achse in der Draufsicht vorne nach innen geneigt sind. Andernfalls liegt eine Nachspur vor. (vgl. [16, S. 726])
- Der **Sturz** beschreibt auf ebener Fahrbahn die Neigung des Rades zur Vertikalen. Bei einem negativen Sturz neigt die Oberseite des Rades in Richtung Fahrzeugmitte. (vgl. [16, S. 726])
- Der **Nachlauf** beschreibt die Neigung der Lenkdrehachse zur Vertikalen in der Seitenansicht. Die dazugehörige Nachlaufstrecke bildet mit dem Reifen nachlauf den Hebelarm der Seitenkraft und erzeugt ein rückstellendes Moment. (vgl. [16, S. 729])
- Die **Spreizung** beschreibt die Neigung der Lenkdrehachse zur Vertikalen in der Ansicht von hinten. (vgl. [16, S. 729])

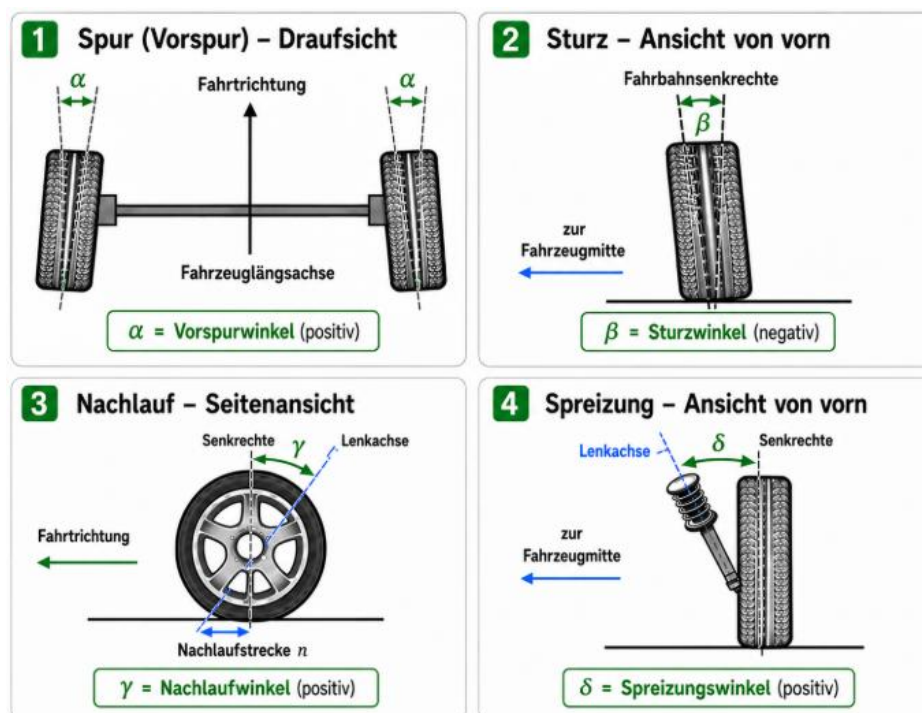


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der geometrischen Kenngrößen [9]

Nachlauf und Spreizung treten nur an der gelenkten Achse auf. Für die Hinterachse sind daher Spur und Sturz maßgeblich. Beide wirken unmittelbar auf das Fahrverhalten. Ein kleiner stationärer Vorspurwinkel lässt das Fahrzeug schneller auf Lenkwinkleingaben reagieren und stabiler geradeaus laufen. [16, S. 726 f.] Die Sollwerte legt der Fahrzeughersteller fest.

2.4.2 Einfluss von Strukturveränderungen auf die Geometrie

Die Anlenkpunkte der Radaufhängung sind an tragenden Karosseriebereichen befestigt und teils verstärkt. [16, S. 510] Unter hohen Lasten können sich die Kinematikpunkte um einige Millimeter verschieben und dadurch Vorspur und Sturz verändern. [16, S. 730] Eine bleibende Verformung eines Anbindungspunkts schreibt eine solche Lageänderung dauerhaft fest. Abbildung 2.9 zeigt das Prinzip vereinfacht an einem Querlenker-Modell mit verändertem Sturz.

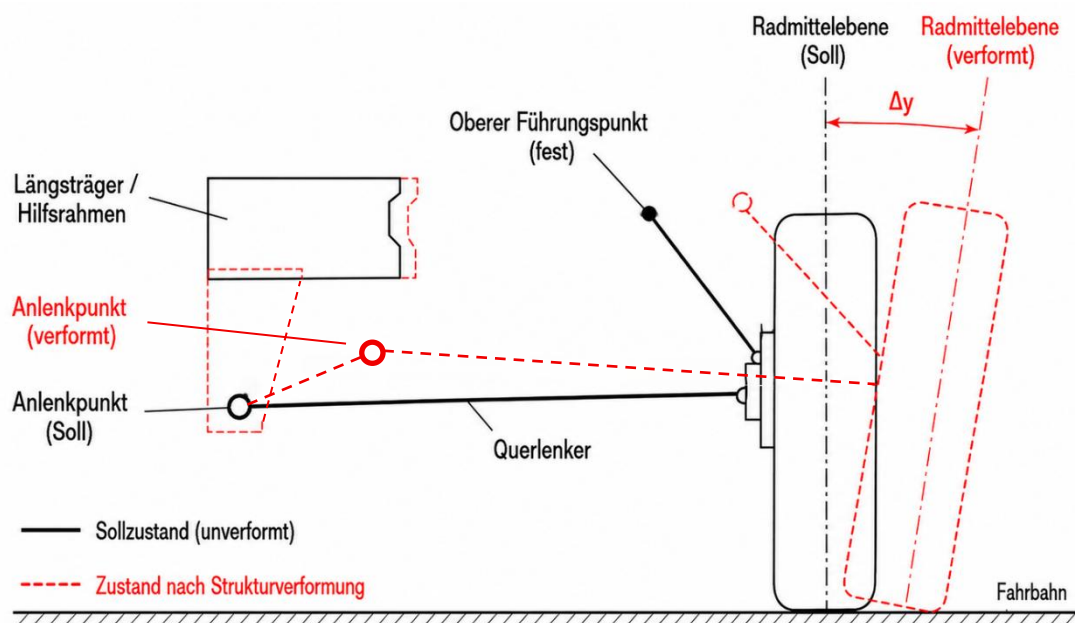


Abbildung 2.9: Einfluss einer Anlenkpunktverschiebung auf die Radstellung [9]

Baráth wies experimentell nach, dass dynamische Belastungen die Fahrwerksgeometrie verändern. [21, S. 33] Er erfasste die Vibrationen an den Querlenkern eines Versuchsfahrzeugs auf schlechter Fahrbahn und führte entsprechend Achsvermessungen durch. [21, S. 31] Trotz geringerer Kräfte an der Vorderachse überschritt die Spur bei den Vermessungen den zulässigen Bereich, an der Hinterachse blieben die Abweichungen innerhalb der Toleranz. [21, S. 32 f.] Da die Abweichungen im Bereich weniger Millimeter liegen, sind sie nur durch eine Achsvermessung sichtbar.

2.4.3 Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit

Die folgende Abbildung 2.10 zeigt den Gedanken der Wirkungskette von einem dynamischen Abschleppvorgang bis zu den Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit.

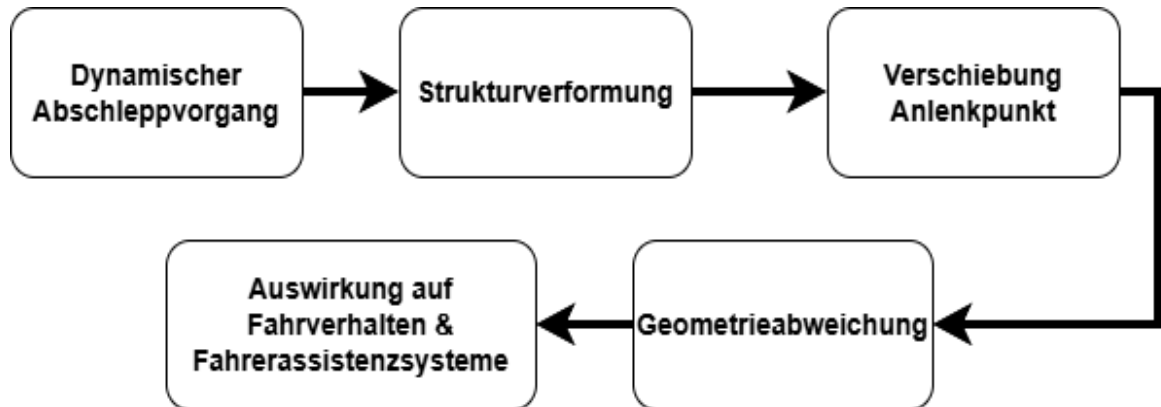


Abbildung 2.10: Wirkungskette von Strukturverformung bis Verkehrssicherheit [Eigene Darstellung]

Abweichungen der Fahrwerksgeometrie von den Sollwerten beeinträchtigen die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs. Unter anderem vermindert ein veränderter Sturz die Übertragbarkeit der Seitenkräfte von Reifen zu Fahrbahn. Ein veränderter Vorspurwinkel führt zur Beeinträchtigung des Geradeauslaufs. [16, S. 726] Kowalski simulierte während der Fahrt eintretende Fahrwerksschäden mit der Folge von Kontrollverlust und einer Kollision. [22, S. 15 ff.] Er ermittelte aus Werkstattdaten, dass die Wahrscheinlichkeit eines schadensfreien Fahrwerks bei voll beladenem Betrieb auf schlechter Fahrbahn bei 48.719 km auf 50 % sank. [22, S. 19] Hinzu kommt, dass ein Teil der Hersteller die Fahrerassistenzsysteme auf die Symmetrieachse der Karosserie kalibriert. [23, S. 33] Ein Winkelfehler dieses Bezugssystems kann die Fahrspurzuordnung somit verfälschen. [24, S. 8 f.] Damit könnten Strukturveränderungen durch dynamische Abschleppvorgänge unerkannt die Verkehrssicherheit beeinträchtigen.

2.5 Prüf- und Begutachtungspraxis im Sachverständigenwesen

Die periodische technische Überwachung von Kraftfahrzeugen ist in Deutschland durch **§ 29 StVZO** geregelt. [25, § 29 Abs. 1] Bei der Hauptuntersuchung (**HU**) werden Fahrzeuge auf ihre Verkehrssicherheit, Umweltverträglichkeit und die Einhaltung der Bau- und Wirkvorschriften untersucht. (vgl. [25, Anlage VIII Nr. 1.2.1])

Sie wird von amtlich anerkannten Sachverständigen oder Prüferingenieuren durchgeführt. [25, Anlage VIIIa Nr. 1] Die Untersuchung erfolgt zerstörungsfrei und ohne Ausbau von Teilen. [25, Anlage VIIIa Nr. 5] Eine messtechnische Erfassung von z. B. Spur und Sturz gehört nicht zum Pflichtumfang. [25, Anlage VIIIa Nr. 6.5] Ergänzungsuntersuchungen setzen einen aus Zustand oder Alter abgeleiteten Verdacht voraus, nicht die Belastungsgeschichte des Fahrzeugs. [25, Anlage VIIIa Nr. 2.2]

2.5.1 Begutachtung durch Kfz-Sachverständige

Außerhalb der periodischen Hauptuntersuchung erfolgen technische Begutachtungen anlassbezogen, insbesondere nach Unfällen, beim Gebrauchtwagenkauf oder in Versicherungsverfahren. Ein dynamischer Abschleppvorgang stellt für den Fahrzeugnutzer oft kein offenkundiges Schadensereignis dar, wenn das Fahrzeug nach der Bergung wieder rollfähig ist und keine sichtbaren Schäden aufweist. Eine systematische Begutachtung ist anschließend nicht etabliert, siehe Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Erfassung ausgewählter Belastungsereignisse und Schadensmerkmale in der Prüfpraxis nach eigener Einschätzung

Belastungsereignis, Schadensmerkmal	HU nach § 29 StVZO	Sachverständigenbegutachtung
Sichtbarer Unfallschaden	Bedingt	Ja
Verdeckte Crashverformung	Bedingt	Ja, anlassbezogen
Reparaturqualität	Bedingt	Ja, anlassbezogen
Dynamischer Abschleppvorgang	Nein	Nein

2.5.2 Lücke in der Prüfpraxis

Weder die periodische HU noch die anlassbezogene Begutachtung erfasst den Lastfall des dynamischen Abschleppvorgangs systematisch. Die Prüfplakette bescheinigt die Vorschriftsmäßigkeit nur zum Zeitpunkt der Untersuchung, die Belastungsgeschichte bleibt unberücksichtigt. [25, § 29 Abs. 3] Die anlassbezogene Begutachtung setzt einen erkennbaren Schadensverdacht voraus, der nach einem Bergungsvorgang typischerweise nicht gegeben ist. Strukturveränderungen mit Auswirkungen auf die Fahrwerksgeometrie können daher unentdeckt bleiben, obwohl sie nach Kapitel 2.4 sicherheitsrelevant sein können.

3 Versuchskonzept und Methodik

3.1 Zieldefinition und Versuchsplanung

3.1.1 Untersuchungsziele

Aus den im Stand der Technik dargestellten Forschungslücken ergeben sich drei konkrete Untersuchungsziele für die experimentelle Arbeit:

- Erstes Ziel ist die messtechnische Erfassung des Kraftverlaufs bei einem dynamischen Abschleppvorgang an einem Pkw. Untersucht werden sollen Höhe und zeitlicher Verlauf der Zugkraft beim impulsartigen Straffen eines Abschleppseils. Aus dem Vergleich mit dem in Abschnitt 3.4.1 dargestellten normativen Prüfwert lässt sich beurteilen, ob die normativ vorgesehene Auslegung den realen Belastungen entspricht.
- Zweites Ziel ist der direkte Vergleich zwischen Anhängerkupplung und Abschleppöse hinsichtlich Kraftverlauf und struktureller Auswirkungen. Damit lässt sich beurteilen, ob einer der beiden Krafteinleitungspunkte unter sonst gleichen Bedingungen zu messbar größeren strukturellen oder geometrischen Auswirkungen führt.
- Drittes Ziel ist die Erfassung möglicher geometrischer Veränderungen am Fahrzeug. Durch Karosserievermessung und Achsvermessung vor und nach jedem Versuch werden Abweichungen der Fahrwerksgeometrie und der Karosseriegeometrie quantifiziert. Damit lässt sich beurteilen, ob ein einzelner Abschleppvorgang messbare bleibende Veränderungen mit Auswirkung auf die in Abschnitt 2.4 beschriebene Verkehrssicherheit verursacht.

3.1.2 Auswahl der Versuchsfahrzeuge

Für die experimentelle Untersuchung werden zwei Personenkraftwagen des Typs Opel Corsa 1.0 12V Edition 100 aus dem Baujahr 1999 verwendet, siehe Abbildung 3.1. Die Auswahl erfolgt nach drei Kriterien:

- Erstens soll der Fahrzeugtyp dem Marktsegment entsprechen, in dem dynamische Abschleppvorgänge festgefahrener Fahrzeuge im Straßenverkehr vorkommen. Kleinwagen wie der Corsa stellen

einen verbreiteten Fahrzeugtyp dar und bieten einen guten Kompromiss zur bestehenden Marktverfügbarkeit und dem Budget der Arbeit.

- Zweitens sollen beide Versuchsfahrzeuge baugleich sein, um Unterschiede der Strukturreaktion auf den Krafteinleitungspunkt zurückführen zu können. Beide Fahrzeuge verfügen daher über identische Baujahre, Motorisierung und Ausstattungslinie abgesehen von der Anhängerkupplung.
- Drittens müssen sich die Fahrzeuge im Krafteinleitungspunkt unterscheiden. Ein Fahrzeug verfügt über eine werksseitig verbaute Anhängerkupplung (AHK) und wird im Versuch über diese gezogen. Das zweite Fahrzeug wird über die hintere Abschleppöse (AÖ) gezogen. Damit lassen sich beide in der Praxis verwendeten Krafteinleitungspunkte unmittelbar vergleichen.



Abbildung 3.1: Versuchsfahrzeuge, links mit AHK, rechts mit AÖ

3.1.3 Versuchsmatrix

Pro Versuchsfahrzeug werden Zugversuche mit unterschiedlicher Anzugsgeschwindigkeit durchgeführt. Tabelle 3.1 fasst die Versuchsmatrix zusammen:

Tabelle 3.1: Versuchsmatrix der experimentellen Untersuchung

Ver- such	Fahrzeug	Krafteinleitungspunkt	Anzugsgeschwindigkeit
V1.1	Fahrzeug A	Anhängerkupplung	5 km/h
V1.2	Fahrzeug A	Anhängerkupplung	15 km/h

V2.1	Fahrzeug B	Hintere Abschleppöse	5 km/h
V2.2	Fahrzeug B	Hintere Abschleppöse	15 km/h

Die Durchführung von zwei Zugvorgängen pro Versuchsfahrzeug mit ansteigender Geschwindigkeit bildet den realen Bergungsfall realistischer ab als ein einzelner Zug. In der Praxis wird ein festgefahrener Fahrzeug denkbar mehrfach mit steigendem Krafteinsatz belastet, bis es sich aus seiner Lage löst.

Die Wahl der beiden Geschwindigkeiten von 5 km/h und 15 km/h ergibt sich aus dem Reproduzierbarkeitskriterium des Versuchsaufbaus. Die Detailbegründung der Geschwindigkeitsstufen erfolgt in Abschnitt 3.2.4.

Zwischen den Zugvorgängen wird eine Vermessung von Karosserie und Fahrwerk durchgeführt. Damit lässt sich nachvollziehen, welche Strukturveränderungen bereits nach der ersten Belastungsstufe auftreten und welche erst durch die zweite Stufe hinzukommen. Eine alleinige Vorher-Nachher-Messung über beide Zugvorgänge hinweg würde nur die Summe beider Belastungseffekte erfassen, ohne dass diese den einzelnen Geschwindigkeitsstufen zugeordnet werden könnten.

Die Vermessung zwischen den Zugvorgängen erfolgt nach dem in den Abschnitten 3.3.4 und 3.3.5 beschriebenen Ablauf. Die dokumentierten Randbedingungen wie Reifenluftdruck, Umgebungsbedingungen und Fahrzeugausrichtung werden vor jedem Zugvorgang erneut geprüft.

Sollte während eines Zugvorgangs eines der in Abschnitt 3.2.8 definierten Abbruchkriterien erfüllt sein, wird der Versuch an diesem Fahrzeug beendet. Die bis zu diesem Zeitpunkt erfassten Daten gehen in die Auswertung ein.

3.2 Versuchsaufbau

In den folgenden Unterabschnitten werden die jeweils infrage kommenden Varianten zunächst beschrieben und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile gegenübergestellt. Auf dieser Grundlage folgt für jede Auswahl eine zusammenfassende Bewertung in Form einer Nutzwertanalyse. Dabei werden die maßgeblichen Kriterien nach ihrer Bedeutung für die Zielstellung des Versuchs gewichtet und jede Variante in jedem Kriterium mit einer Punktzahl bewertet. Aus dem Produkt von Bewertung und Gewichtung ergibt sich je Variante eine gewichtete Punktzahl, deren Summe die

Entscheidung begründet. Gewählt wird die Variante mit der höchsten Gesamtpunktzahl. Gewichtung und Bewertung erfolgen auf einer Skala von eins bis fünf, wobei fünf jeweils den höchsten Wert darstellt. Am Ende des Kapitels fasst eine Gesamtübersicht die Ergebnisse aller Einzelentscheidungen zusammen.

3.2.1 Anforderungen an den Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau muss vier Anforderungen erfüllen:

1. Den realen Lastfall eines festgefahrenen Pkw bestmöglich nachstellen, der über ein Seil aus dem Stand herausgezogen wird.
2. Die Krafteinleitung in das Versuchsfahrzeug auf den definierten Anbindungspunkt beschränken, damit die Messergebnisse eindeutig der Abschleppöse oder Anhängerkupplung zugeordnet werden können.
3. Reproduzierbare Eingangsbedingungen für beide Versuche schaffen, damit der Vergleich zwischen den Krafteinleitungspunkten methodisch belastbar ist.
4. Allen sicherheitsrelevanten Anforderungen genügen, die sich aus der Höhe der zu erwartenden Kräfte und der dynamischen Charakteristik des Vorgangs ergeben.

Als Zugfahrzeug dient ein Lkw, dessen Anfahrmanöver die geforderten Geschwindigkeitsstufen reproduzierbar bereitstellt.

3.2.2 Fixierung der Versuchsfahrzeuge

Im realen Bergungsfall ist das festgefahrte Fahrzeug durch äußere Umstände wie Schlamm, Schnee oder unebenes Geländeprofil unbeweglich. Die Gegenkraft zur Zugkraft des Abschleppfahrzeugs wird über die aufliegenden Fahrzeugteile in den Untergrund eingeleitet, wobei das Fahrzeug in der Regel keinen Gang eingelegt hat und die Handbremse gelöst ist. Für die experimentelle Nachbildung dieser Situation kommen mehrere Varianten in Betracht.

Variante A – Fixierung über blockierte Bremse, ohne eingelegten Gang

Bei Variante A wird das Versuchsfahrzeug ausschließlich über eine mechanische Blockierung des Bremspedals gegen Wegrollen gesichert. Das Bremspedal wird mit einer Vorrichtung (Bremsspanner) in gedrückter Position gehalten, sodass alle vier

Räder durch das hydraulische Bremssystem gebremst werden. Das Getriebe bleibt in Neutral und die Handbremse wird gelöst, siehe Abbildung 3.2.

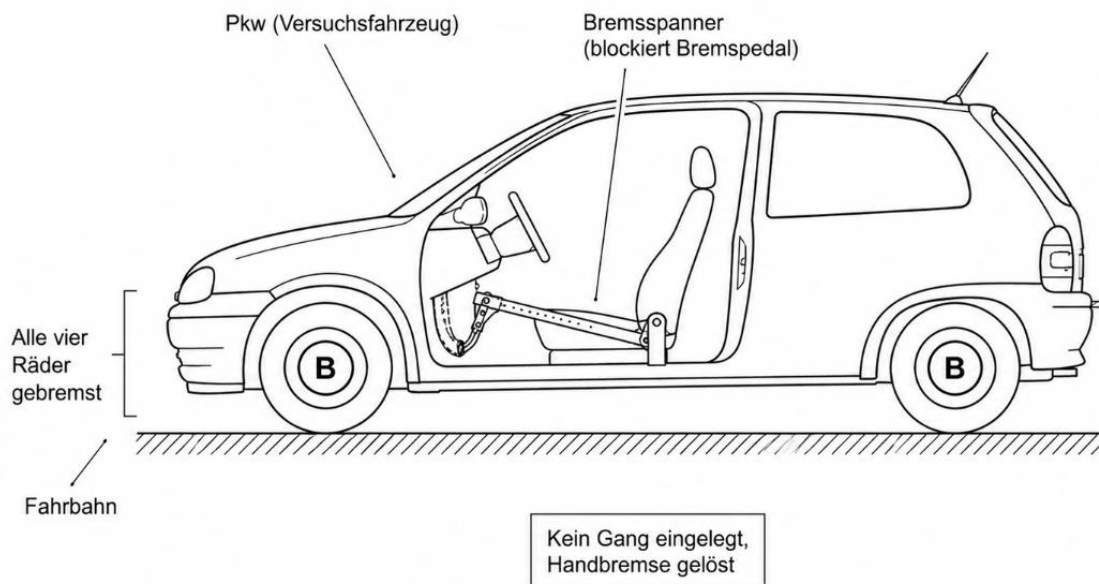


Abbildung 3.2: Fixierung Variante A, schematische Darstellung der Fixierung über Bremsspanner

Vorteilhaft ist die hohe Realitätsnähe, weil ein festgefahrenes Fahrzeug im realen Bergungsfall typischerweise ebenfalls keinen Gang eingelegt hat. Die Bremse erzeugt dabei den Widerstand. Zudem entfällt der Einfluss zusätzlicher Lastpfade in die Karosseriestruktur, weil keine externe Verankerung Kräfte in das Fahrzeug einleitet. Die praktische Umsetzbarkeit ist hoch, weil weder Bodenanker noch zusätzliche Fahrzeuge erforderlich sind.

Die theoretische Grenze dieser Variante liegt in der endlichen Reibungskraft zwischen Reifen und Asphalt, die für die Versuchsfahrzeuge rund 7,5 kN beträgt. Die Herleitung erfolgt genauer in Abschnitt 3.2.6. Übersteigt die eingeleitete Zugkraft diesen Wert, beginnt das Fahrzeug in Zugrichtung zu rutschen. Dies entspricht dem realen Bergungsfall, in dem sich das festgefahrne Fahrzeug bei ausreichender Zugkraft ebenfalls ruckartig aus seiner Ausgangslage bewegt.

Variante B – Fixierung der Vorderräder an Bodenankerpunkten

Bei dieser Variante werden beide Vorderräder über Ketten oder Spanngurte an im Boden verankerten Punkten festgesetzt, siehe Abbildung 3.3. Die Reaktionskraft fließt über die Räder in den Boden und über die Verankerung in den Ankerpunkt.

Nachteilig ist, dass die Reaktionskräfte konzentriert in zwei Punkte im Boden eingeleitet werden müssen, was geeignete Bodenanker voraussetzt, die auf dem Hochschulgelände nicht verfügbar sind.

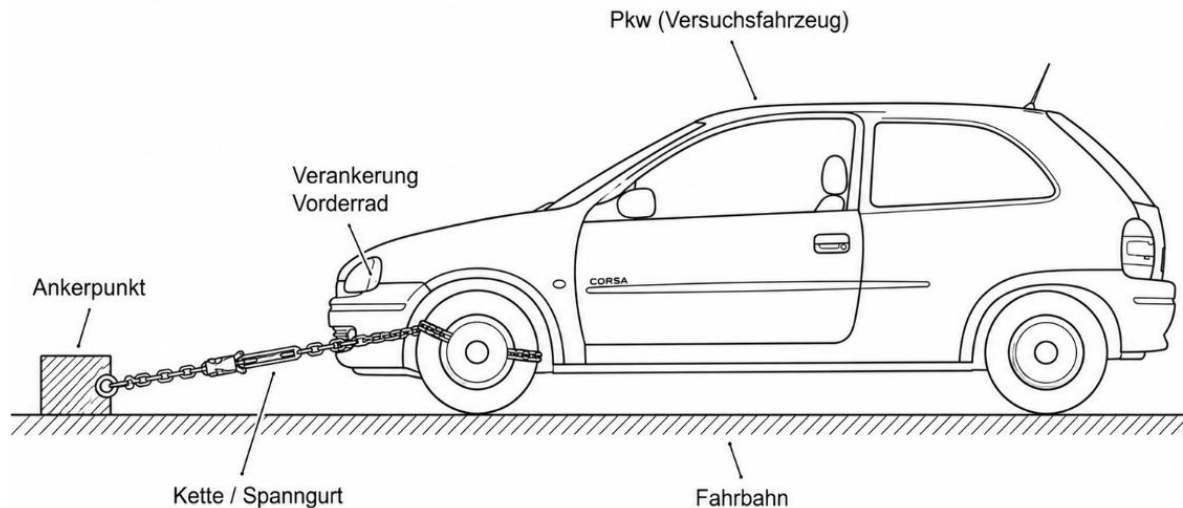


Abbildung 3.3: Fixierung Variante B, schematische Darstellung der Fixierung der Vorderräder an Bodenankerpunkten

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Verankerung an den Rädern die Reaktionskraft über die Radaufhängung übertragen müsste. Die Radaufhängung aber konstruktiv für vertikale Stützlasten und seitliche Querkräfte ausgelegt ist, nicht jedoch für hohe horizontale Längskräfte in den zu erwartenden Größenordnungen. Demnach würden die Komponenten der Radaufhängung wie Querlenker, Spurstangen und Lagerbuchsen früher versagen als die Karosseriestruktur selbst. Damit wäre die untersuchte Strukturreaktion am Heck nicht prüfbar, weil das Versagen vorne im Fahrwerk auftreten würde. Dies entspricht nicht dem Untersuchungsziel, das auf die Beanspruchung der Karosserie am Krafteinleitungspunkt fokussiert.

Variante C – Fixierung an allen vier Rädern an Bodenankerpunkten

Erweiterung von Variante B mit zusätzlicher Verankerung an den Hinterrädern. Vorteilhaft gegenüber Variante B ist die gleichmäßigere Verteilung der Reaktionskraft. Es bestehen jedoch die gleichen Nachteile bezüglich der Verfügbarkeit von Bodenankern und der ungeeigneten Auslegung der Radaufhängung für horizontale Längskräfte.

Variante D – Fixierung am vorderen Längsträger

Bei dieser Variante wird das Versuchsfahrzeug am vorderen Längsträger über Seile mit bspw. einem zweiten Fahrzeug als Gegenhalt verbunden, siehe Abbildung 3.4.

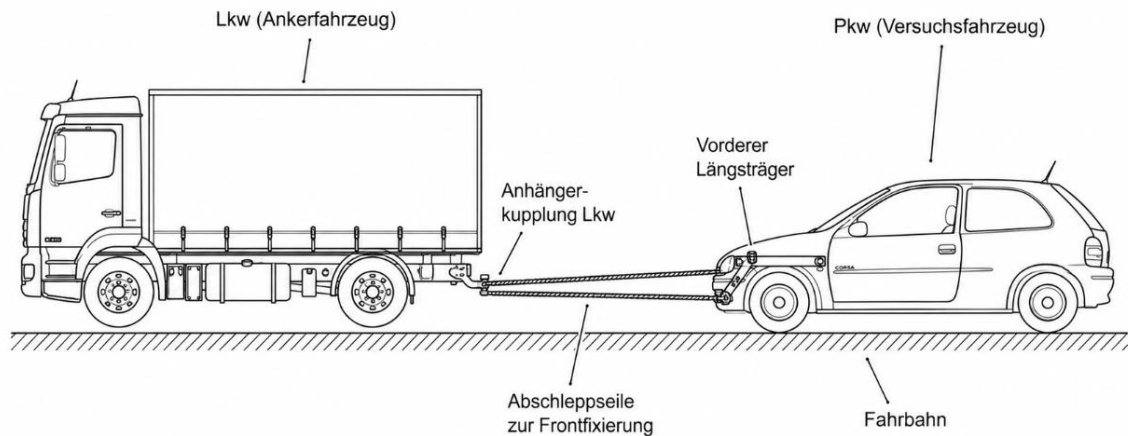


Abbildung 3.4: Fixierung Variante D, schematische Darstellung der Fixierung am vorderen Längsträger

Vorteilhaft ist, dass die Anbindungspunkte am vorderen Längsträger konstruktiv für hohe Zugkräfte ausgelegt sind. Nachteilig ist, dass die Reaktionskraft direkt in die Karosseriestruktur am Vorderwagen eingeleitet wird, was theoretisch eine Karosserieverformung am Vorderwagen verursachen und damit die Auswertung der Karosserievermessung verfälschen könnte. Zudem entfernt sich diese Variante von der Realitätsnähe des Bergungsfalls, weil im realen Fall keine externe Verankerung an der Fahrzeugkarosserie wirkt.

Variante E – Kein Festhalten, freier Impulsversuch

Bei diesem Konzept wird das Fahrzeug nicht fixiert und alle Bremsen bleiben gelöst, wie es bei einem realen Bergungsfall auch der Fall wäre. Das Fahrzeug würde jedoch in Zugrichtung beschleunigt, ohne dass eine ausreichende Reaktionskraft entsteht, da kein hinreichender Widerstand vorliegt. Die Variante scheidet aus, weil die charakteristische Kraftspitze nicht auftritt, sondern die eingeleitete Kraft sich in Beschleunigungsarbeit umsetzt. Die Versuchsfrage wäre nicht beantwortet.

Bewertung und Auswahl

Für den vorliegenden Versuch wird **Variante A Bremsblockierung über Bremsspanner, ohne eingelegten Gang** gewählt. Diese Variante bildet den realen Bergungsfall am besten nach, in dem das festgefahrene Fahrzeug ebenfalls keinen Gang eingelegt hat und durch die Bremse der nötige Gegenwiderstand zur Zugkraft

entsteht. Die theoretische Reibungsgrenze von etwa 7,5 kN, siehe Abschnitt 3.2.6, führt bei Überschreitung zu einem Rutschen des Fahrzeugs in Zugrichtung, was der Realsituation entspricht und die Auswertbarkeit des impulsartigen Kraftverlaufs nicht beeinträchtigt. Zusätzliche Krafteinleitungspfade in die Karosseriestruktur durch externe Verankerungen entfallen, sodass die Karosserievermessung eindeutig die Strukturreaktion am Heck des Fahrzeugs erfasst.

Tabelle 3.2 stellt die fünf Fixierungsvarianten anhand der maßgeblichen Kriterien gegenüber und bestätigt die Auswahl von Variante A.

Tabelle 3.2: Bewertung der Fixierungsvarianten (Nutzwertanalyse)

Kriterium	Gew.	A Brems- spanner	B Vorderrä- der ver- ankert	C alle Räder ver- ankert	D vorderer Längsträger	E kein Festhalten
Realitäts- nähe	4	3 (12)	3 (12)	3 (12)	2 (8)	2 (8)
Eindeu- tige Zu- ordnung Struktur- reaktion zum Kraftein- leitungs- punkt	5	4 (20)	1 (5)	2 (10)	2 (10)	4 (20)
Erzeu- gung der charakte- ristischen impulsar- tigen Be- lastung	5	4 (20)	3 (15)	4 (20)	4 (20)	1 (5)
Prakti- sche	3	4 (12)	1 (3)	1 (3)	3 (9)	5 (15)

Umsetz- barkeit						
Summe		64	35	45	47	48

3.2.3 Zugrichtung

Die Zugrichtung beeinflusst sowohl den Lastpfad in der Karosserie als auch die Reproduzierbarkeit des Versuchs.

Variante A – Parallelzug entlang der Fahrzeuglängsachse

Das Zugseil verläuft parallel zur Längsachse des Versuchsfahrzeugs und zur Fahrtrichtung des Zugfahrzeugs, siehe Abbildung 3.5. Vorteilhaft sind die hohe Reproduzierbarkeit und die symmetrische Lastverteilung. Nachteilig ist der eingeschränkte Realitätsbezug, weil das Zugfahrzeug im realen Bergungsfall nur selten exakt hinter dem festgefahrenen Fahrzeug steht.

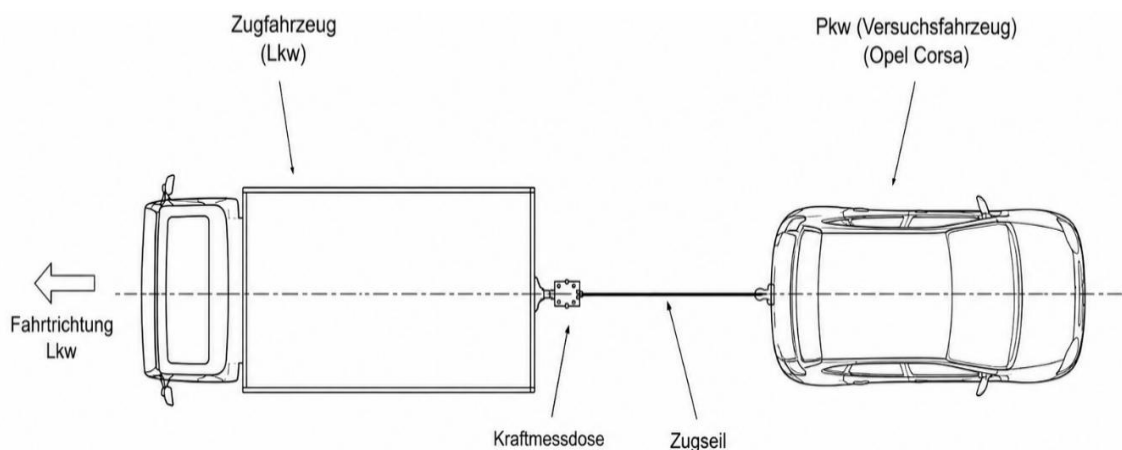


Abbildung 3.5: Zugrichtung Variante A, schematische Darstellung Parallelzug

Variante B – Schrägzug mit 30° zur Fahrzeuglängsachse

Das Zugseil verläuft in einem Winkel von 30° zur Längsachse, siehe Abbildung 3.6. Der Schrägzug stellt einen kritischeren Lastfall dar und kommt der realen Bergungssituation deutlich näher, in der das Zugfahrzeug aufgrund von Gelände oder Hindernissen seitlich versetzt steht.

Wang identifizierte den Schrägzug unter etwa 30° als kritischen Lastfall für die Anbindung der Abschleppöse. [2] Bei diesem Winkel treten lokal die höchsten Spannungen auf, weil die Last in einer ungünstigen Mischbeanspruchung wirkt und weder rein axial in den Längsträger noch rein transversal in die Karosserie übertragen

wird. Nachteilig ist die höhere Komplexität des Aufbaus, da der Winkel reproduzierbar eingehalten werden muss.

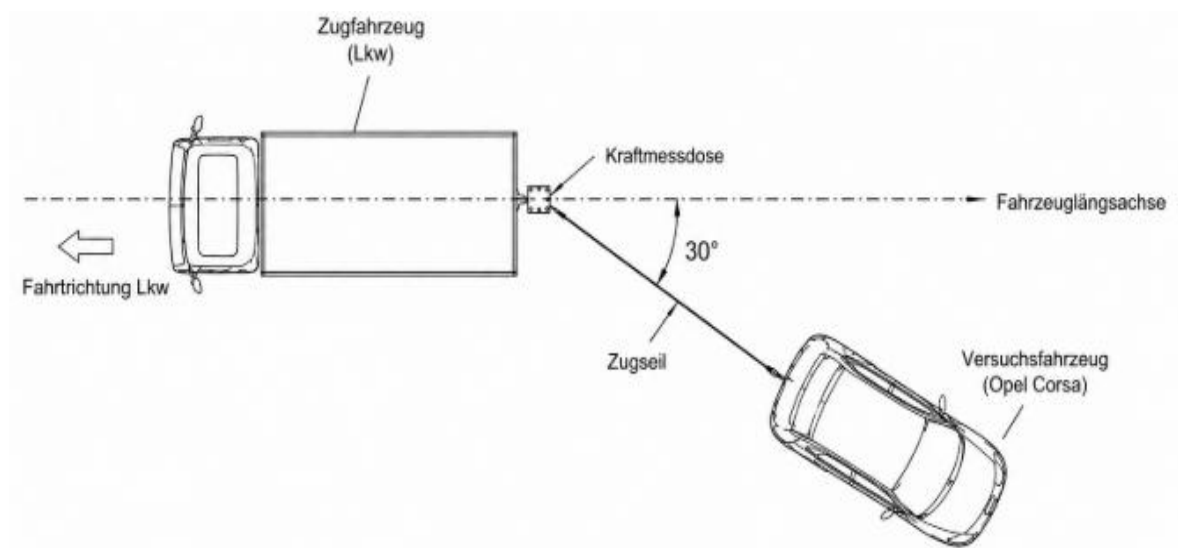


Abbildung 3.6: Zugrichtung Variante B, schematische Darstellung 30° zur Fahrzeuglängsachse

Variante C – Schrägzug mit größerem Winkel (45° oder mehr)

Bei dieser Variante würden Schrägzugwinkel über 30° hinaus geprüft. Die Variante scheidet aus, weil der als kritisch identifizierte Lastfall nach Wang bereits bei 30° abgedeckt ist und größere Winkel im realen Bergungseinsatz denkbar selten vorkommen. Zudem würde bei stark schrägem Zug die Lastsituation am Versuchsfahrzeug weiter vom untersuchten Realfall abweichen.

Bewertung und Auswahl

Variante A erfüllt das Kriterium der Realitätsnähe nicht ausreichend. Variante C deckt einen Lastfall ab, der über den als kritisch identifizierten Bereich hinausgeht und in der Praxis kaum relevant ist.

Für den vorliegenden Versuch wird **Variante B Schrägzug mit 30° zur Fahrzeuglängsachse** gewählt. Dieser Winkel spiegelt eine typische Konstellation des realen Bergungseinsatzes wider und gilt nach Wang als kritisch identifizierter Lastfall.

Die folgende Tabelle 3.3 stellt die drei Zugrichtungsvarianten anhand der maßgeblichen Kriterien gegenüber und bestätigt die Auswahl von Variante B.

Tabelle 3.3: Bewertung der Zugrichtungsvarianten (Nutzwertanalyse)

Kriterium	Gew.	A Parallelzug	B Schrägzug 30°	C Schrägzug 45° o. mehr
Kritikalität des Lastfalls	5	2 (10)	5 (25)	4 (20)
Realitätsnähe	4	3 (12)	5 (20)	3 (12)
Reproduzierbarkeit	3	5 (15)	3 (9)	3 (9)
Praktische Umsetzbarkeit	2	5 (10)	3 (6)	3 (6)
Summe		47	60	47

3.2.4 Anzugsgeschwindigkeit

Die Anzugsgeschwindigkeit beeinflusst die Höhe der Spitzenkraft und die Charakteristik des Kraftverlaufs. Ihre Wahl unterliegt zugleich einem Reproduzierbarkeitskriterium, da die tatsächlich erreichte Geschwindigkeit beim Straffen des Seils bei beiden Versuchsfahrzeugen identisch sein muss.

Variante A – Eine feste Anzugsgeschwindigkeit pro Fahrzeug

Jedes Fahrzeug wird mit einer einzigen Geschwindigkeit gezogen. Vorteilhaft sind die geringe Versuchsdauer und der reduzierte Aufwand. Nachteilig ist, dass keine Aussage zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Strukturreaktion möglich ist. Diese Variante scheidet aus, weil sich ohne eine zweite Geschwindigkeitsstufe nicht beurteilen lässt, wie stark die Strukturreaktion von der Anzugsgeschwindigkeit abhängt.

Variante B – Drei Geschwindigkeiten pro Fahrzeug (5, 10 und 15 km/h)

Drei aufsteigende Anzugsgeschwindigkeiten erlauben eine feinere Auflösung der Geschwindigkeitsabhängigkeit. Diese Variante scheidet jedoch aus Reproduzierbarkeitsgründen aus. Der Fahrer des Lkw kann eine Geschwindigkeit von 10 km/h nur über gezielte Gaspedal- und Kupplungsbetätigung erreichen, was zu einer erheblichen Streuung zwischen den einzelnen Anfahrten führt. Damit wäre nicht sichergestellt, dass beide Versuchsfahrzeuge unter identischen Eingangsbedingungen belastet werden.

Variante C – Zwei Geschwindigkeiten pro Fahrzeug (5 und 15 km/h)

Variante C bildet einen Kompromiss aus Variante A und B. Beide Geschwindigkeiten ergeben sich aus definierten Fahrmanövern des Lkw und sind dadurch reproduzierbar. Die untere Stufe von 5 km/h entspricht der Rollgeschwindigkeit im ersten Gang nach schleifender Kupplung ohne Gaspedalbetätigung, bestimmt durch Leerlaufdrehzahl und Getriebeübersetzung. Die obere Stufe von 15 km/h entspricht der Endgeschwindigkeit bei Vollgas im ersten Gang innerhalb der Beschleunigungsstrecke von 10 m, bestimmt durch Getriebeauslegung und Motorleistung.

Variante D – Höhere Geschwindigkeiten über 15 km/h

Zusätzliche Stufen oberhalb von 15 km/h entfallen, da solche Geschwindigkeiten im realen Bergungseinsatz auf den üblichen kurzen Seillängen nicht erreichbar sind. Zudem entstehen beim Ziehen mit einem Lkw aufgrund der deutlich größeren Zugmasse bereits bei niedrigen Geschwindigkeiten hohe Kräfte, sodass das Risiko eines Seil- oder Bauteilversagens sicherheitstechnisch nicht mehr vertretbar wäre.

Bewertung und Auswahl

Für den vorliegenden Versuch wird **Variante C mit Zwei Geschwindigkeiten pro Fahrzeug (5 und 15 km/h) gewählt**. Die Wahl der beiden Geschwindigkeiten bildet zusätzlich das reale Bergungsszenario ab, in dem die Zugkraft schrittweise gesteigert wird. Der Bergende versucht dabei zunächst mit moderater Kraft das Fahrzeug zu lösen und die Geschwindigkeit wird weiter erhöht, wenn der erste Versuch erfolglos bleibt. Die schrittweise Steigerung schont zudem das Versuchsfahrzeug, weil ein eventuelles Versagen bei einer Geschwindigkeit den weiteren Versuch beendet.

Tabelle 3.4 stellt die vier Geschwindigkeitsvarianten anhand der maßgeblichen Kriterien gegenüber und bestätigt die Auswahl von Variante C.

Tabelle 3.4: Bewertung der Anzugsgeschwindigkeit (Nutzwertanalyse)

Kriterium	Gew.	A eine Geschwindigkeit	B drei (5/10/15) km/h	C zwei (5/15) km/h	D über 15 km/h
Erfassung der	5	1 (5)	5 (25)	4 (20)	5 (25)

Geschwindigkeitsabhängigkeit					
Reproduzierbarkeit der Geschwindigkeit	5	5 (25)	2 (10)	4 (20)	2 (10)
Realitätsnähe und Praxisbezug	4	3 (12)	4 (16)	4 (16)	2 (8)
Sicherheit	3	5 (15)	3 (9)	4 (12)	1 (3)
Summe		57	60	68	46

3.2.5 Verbindungsmittel

Das Verbindungsmittel zwischen Zugfahrzeug und Versuchsfahrzeug beeinflusst den Kraftverlauf erheblich. Die mechanischen Eigenschaften des Verbindungsmittels bestimmen die Höhe der Spitzenkraft, die Anstiegszeit und das Rückschlagverhalten bei einem Versagen.

Variante A – Textiles Abschleppseil

Bei dieser Variante wird ein handelsübliches textiles Abschleppseil verwendet. Vorteilhaft ist die einfache Verfügbarkeit und die Praxisnähe, weil im realen Bergungsfall häufig Seile dieser Art zum Einsatz kommen. Nachteilig ist die hohe Dehnung textiler Seile, die einen Teil der eingeleiteten Energie elastisch speichert und die Spitzenkraft reduziert. Da gerade die Spitzenkraft Gegenstand der Untersuchung ist, würde dies das Messsignal verfälschen und die Vergleichbarkeit mit den in Kapitel 2 dargestellten normativen Prüfwerten erschweren.

Variante B – Stahlseil

Bei dieser Variante wird ein niedrigdehnendes Stahlseil mit dokumentierter Bruchlast verwendet. Vorteilhaft ist die geringe Dehnung, sodass der impulsartige Krafteintrag möglichst unverfälscht erhalten bleibt. Damit ist die gemessene Spitzenkraft eine konservative Obergrenze für den realen Bergungsfall mit dehnbaren Seilen. Nachteilig ist das erhöhte Rückschlagrisiko bei einem eventuellen Bauteilversagen.

Variante C – Starre Abschleppstange

Eine Abschleppstange überträgt sowohl Zug- als auch Schubkräfte und erzeugt einen kontinuierlichen Kraftverlauf ohne impulsartige Spitze. Die Variante scheidet aus, weil der charakteristische Lastfall des dynamischen Abschleppvorgangs gerade die impulsartige Krafteinleitung darstellt und nicht das Ziehen des Fahrzeugs.

Variante D – Kette

Eine Stahlkette bietet gegenüber dem Stahlseil ein reduziertes Rückschlagrisiko, da eine gerissene Kette aufgrund ihrer Gliederstruktur überwiegend zu Boden fällt. Nachteilig ist die Verfälschung des Kraftsignals. Die Kettenglieder beschleunigen beim Straffwerden nacheinander statt synchron, was zusätzliche Schwingungen erzeugt. Ein Teil der Kraft wird zudem in die Beschleunigung der vergleichsweise hohen Kettenmasse umgesetzt.

Variante E – Kette mit definierten Sollbruchgliedern

Über Glieder unterschiedlicher Bruchlast ließen sich Rückschlüsse auf die wirkende Kraft ziehen, siehe Abbildung 3.7.

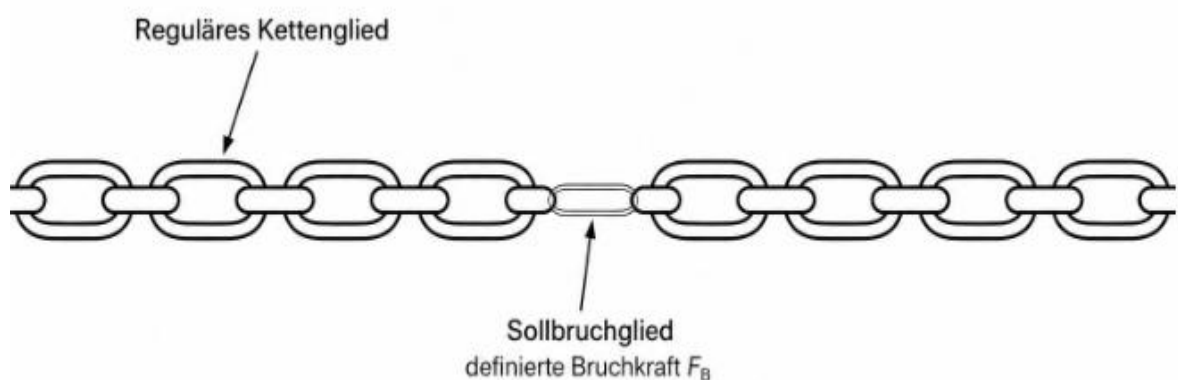


Abbildung 3.7: Verbindungsmittel Variante E, Kette mit Sollbruchglied

Die Variante scheidet aus drei Gründen aus. Eine Sollbruchstelle würde den Krafteinleitungspunkt schützen und damit das Untersuchungsziel unterlaufen. Die Fertigungstoleranzen der Kettenglieder lassen keine kalibrierte Bruchkraftmessung zu. Das Ergebnis wäre nur eine grobe Abschätzung statt der erforderlichen kontinuierlichen Erfassung des Kraftverlaufs.

Bewertung und Auswahl

Für den vorliegenden Versuch wird **Variante B Stahlseil** gewählt. Konkret kommt ein Litzenseil der Seilklasse 6 x 36, mit einem Nenndurchmesser von 26 mm, der Seilsteifigkeitsklasse von 1960 und einer Länge von 6 m zum Einsatz. Die Länge von 6 m bietet dabei ausreichend Sicherheit bei einem Bauteilversagen, sodass dieses nicht bis in die Fahrgastzelle reicht und dennoch genug Anlaufweg für die Zugversuche bietet. Die Mindestbruchkraft dieser Ausführung beträgt 472 kN. [26, Tab. 9] Diese übersteigt deutlich die zu erwartende Zugkraft, wodurch die Dehnung des Seils gering bleibt und die Spitzenkraft unverfälscht erfasst werden kann. Das erhöhte Rückschlagrisiko wird durch die Beschränkung der Seillänge auf 6 m sowie durch das Sicherheitskonzept aus Abschnitt 3.2.8 kompensiert. Die geringere Praxisnähe wird berücksichtigt, indem darauf hingewiesen wird, dass die im Versuch gemessene Spitzenkraft die Obergrenze des im realen Bergungsfall zu erwartenden Wertes darstellt.

Tabelle 3.5 stellt die fünf Verbindungsmittelvarianten anhand der maßgeblichen Kriterien gegenüber und bestätigt die Auswahl von Variante B.

Tabelle 3.5: Bewertung der Verbindungsmittel (Nutzwertanalyse)

Kriterium	Gew.	A texti- les Seil	B Stahl- seil	C Abschlepp- stange	D Kette	E Kette mit Sollbruch- glied
Unverfälschter impulsartiger Kraftverlauf	5	2 (10)	5 (25)	1 (5)	2 (10)	1 (5)

Erreichen der maßgeblichen Belastung am Krafteinleitungspunkt	5	4 (20)	5 (25)	5 (25)	5 (25)	1 (5)
Sicherheit, geringes Rückschlagrisiko	3	3 (9)	2 (6)	5 (15)	4 (12)	4 (12)
Praxisnähe und Verfügbarkeit	2	5 (10)	4 (8)	2 (4)	3 (6)	2 (4)
Summe		49	64	49	53	26

3.2.6 Vorabschätzung der zu erwartenden Belastungen

Vor der Versuchsdurchführung muss abgeschätzt werden, in welcher Größenordnung die eingeleiteten Kräfte zu erwarten sind und ob alle Elemente der Zugkette diese Kräfte sicher übertragen können. Diese Vorabschätzung erfüllt zwei Zwecke.

- Die Auslegung der Kraftmessdose auf einen geeigneten Messbereich
- Die sicherheitstechnische Bewertung der Verbindungselemente

Theoretische Obergrenze aus dem Impulssatz

Als theoretische Obergrenze der beim Straffwerden übertragenen Kraft dient der Fall eines vollständig starr fixierten Versuchsfahrzeugs. In diesem Grenzfall würde der gesamte Impuls des Zugfahrzeugs innerhalb der Anstiegszeit des Seils an das Versuchsfahrzeug übertragen. Der Impuls des Zugfahrzeugs berechnet sich nach:

$$p_{Lkw} = m_{Lkw} \cdot v \quad (3.1)$$

Dabei bezeichnet p_{Lkw} den Impuls des Zugfahrzeugs in $\text{kg} \cdot \text{m/s}$, m_{Lkw} die Masse des Zugfahrzeugs in kg und v die Geschwindigkeit im Moment des Straffwerdens in m/s .

Mit einer Lkw-Masse von $m_{Lkw} = 5.500 \text{ kg}$ und einer Zielgeschwindigkeit von $v = 15 \text{ km/h} = 4,17 \text{ m/s}$ ergibt sich ein geschätzter Impuls von $p_{Lkw} \approx 23.000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. Die mittlere Kraft während der Anstiegszeit berechnet sich aus dem Impulssatz nach:

$$F = \frac{p_{Lkw}}{\Delta t} \quad (3.2)$$

Hierbei bezeichnet F die mittlere Kraft in Newton und Δt die Anstiegszeit des Kraftaufbaus in Sekunden. Mit einer für impulsartige Krafteintragungen angenommenen Anstiegszeit von etwa $\Delta t \approx 100 \text{ ms}$ ergibt sich eine theoretische mittlere Kraft von $F \approx 230 \text{ kN}$.

Diese theoretische Obergrenze wird im vorliegenden Versuch nicht erreicht werden, da das Versuchsfahrzeug nach Abschnitt 3.2.2 nicht starr eingespannt, sondern nur über die Bremse gehalten wird. Überschreitet die Seilkraft die Haftreibungsgrenze, rutscht das Fahrzeug in Zugrichtung und die übertragbare Kraft ist auf die Gleitreibung begrenzt. Der Lkw wird dabei nicht abrupt abgebremst, sondern fährt gemeinsam mit dem Versuchsfahrzeug weiter.

Analytische Abschätzung der Spitzenkraft

Die maximal in das Fahrzeug übertragbare Kraft wird durch die Haftreibung zwischen Reifen und Fahrbahn begrenzt. Solange die Zugkraft diese Grenze nicht überschreitet, bleibt das Fahrzeug in seiner Position. Bei Überschreitung beginnt das Fahrzeug in Zugrichtung zu rutschen und die weitere Krafteinleitung wird durch die Gleitreibung bestimmt.

Die maximale Haftreibungskraft berechnet sich nach:

$$F_{H,max} = \mu_H \cdot m_F \cdot g \quad (3.3)$$

Dabei bezeichnet $F_{H,max}$ die maximale Haftreibungskraft in Newton, μ_H den Haftreibungskoeffizienten zwischen Reifen und Fahrbahn, m_F die Fahrzeugmasse des Versuchsfahrzeugs in Kilogramm und g die Erdbeschleunigung mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Mit einer Fahrzeugmasse von $m_F = 960 \text{ kg}$ als Planungsgröße und einem für Gummi auf trockenem Asphalt angenommenen Haftreibungskoeffizient von $\mu_H = 0,8$ ergibt sich eine maximale Haftreibungskraft von etwa $F_{H,max} \approx 7,53 \text{ kN}$.

Konservativer Ansatz für die Spitzenkraft

Im impulsartigen Belastungsfall wird die statische Haftreibungsgrenze kurzzeitig überschritten. Während der kurzen Anstiegszeit wirkt der Krafteinleitung neben der Reibung auch die Trägheit der Fahrzeugmasse entgegen. Zusätzlich führt die Elastizität des Systems aus Stahlseil, Reifen und Fahrwerksaufhängung zu einem Kraftüberschwinger. Da für diesen Lastfall keine belastbare Kennzahl vorliegt, wird die Haftreibungsgrenze mit einem angenommenen Faktor zwischen 2 und 4 beaufschlagt. Damit ergibt sich eine erwartete Spitzenkraft von etwa 15 bis 30 kN. Als konservative Auslegungsgröße für die Belastbarkeitsbewertung der Zugkette wird der obere Wert von $F_{max} \approx 30$ kN angesetzt.

Bewertung der Belastbarkeit der Zugkette

Die im Versuch eingesetzten Verbindungselemente müssen sicherheitstechnisch so ausgelegt sein, dass die zu erwartenden Kräfte mit ausreichender Reserve betrachtet werden. Tabelle 3.6 fasst die relevanten Belastbarkeitswerte der eingesetzten Bauteile zusammen und stellt sie der abgeschätzten Spitzenkraft gegenüber.

Tabelle 3.6: Belastbarkeit der Zugkettenelemente gegenüber abgeschätzter Kraft

Bauteil	Art des Kennwerts	Belastbarkeit	Faktor gegenüber Spitzenkraft
Anhängerkupplung Lkw (D-Wert)	Ermüdungsvergleichswert	27,1 kN	$\approx 0,9$
Schäkel WLL 9,5 t nach DIN EN 13889	Mindestbruchkraft	466 kN	$\approx 15,5$
Kraftmessdose AEP T20	Nennmessbereich	100 kN	$\approx 3,3$
Stahlseil 26 mm, Seilklasse 6 x 36 mit Stahleinlage nach DIN EN 12385-4	Mindestbruchkraft	472 kN	$\approx 15,7$

Die Anhängerkupplung des Lkw stellt mit einem D-Wert von **27,1 kN** das schwächste Glied der Zugkette dar. [Anhang C.1] Er wird über eine Dauerschwingprüfung mit zwei Millionen Lastspielen abgesichert und ist damit ein Kennwert für die Ermüdungsfestigkeit. [6, Anh. 6 Abs. 1.3, 2.2] Ein Festigkeitsnachweis gegen Gewaltbruch erfolgt dagegen für statische Beanspruchungen. [28, S. 245] Eine

einmalige Belastung in Höhe des D-Werts ist deshalb nicht mit dem Erreichen der statischen Versagenslast gleichzusetzen, sondern führt zu einer erhöhten Ermüdungsbeanspruchung. Diese ist im vorliegenden Versuch mit maximal zwei Zugvorgängen pro Fahrzeug vernachlässigbar.

Die Schäkel mit einer Tragfähigkeit von 9,5 t bieten nach **DIN EN 13889** eine Mindestbruchkraft von **466 kN**. [27, Tab. 4] Damit liegt eine Sicherheitsreserve von mehr als dem Fünfeinfachen gegenüber der abgeschätzten Spitzenkraft vor. Die Kraftmessdose mit einem Nennmessbereich von **100 kN** deckt die zu erwartende Spitzenkraft im Bereich von etwa 30 Prozent des Nennmessbereichs ab und bietet damit eine ausreichende Messreserve gegen unerwartet hohe Lastspitzen ohne Verluste der Messauflösung im relevanten Bereich. Das Stahlseil der Seilklasse 6 x 36 mit Stahleinlage und einem Nenndurchmesser von 26 mm weist eine Mindestbruchkraft von **472 kN** auf. [26, Tab. 9] Es stellt damit gemeinsam mit den Schäkeln das belastungsstärkste Element der Zugkette dar.

Schwächstes Glied und Konsequenzen für die Versuchsdurchführung

Aus der Bewertung folgt, dass die Anhängerkupplung des Lkw das schwächste Element der Zugkette darstellt. Da die abgeschätzte Spitzenkraft in der Größenordnung ihres D-Werts liegt, muss die Anhängerkupplung nach jedem Zugvorgang einer Sichtprüfung unterzogen werden. Sichtbare Verformungen oder Rissbildungen führen zum sofortigen Abbruch des Versuchs an diesem Fahrzeug. Alle übrigen Zugkettenelemente weisen ausreichende Sicherheitsreserven auf, sodass ein Versagen dieser Bauteile bei den im Versuch zu erwartenden Kräften als unwahrscheinlich gewertet wird.

Die Vorabschätzung bestätigt zusätzlich die Wahl der Kraftmessdose mit einem Nennmessbereich von 100 kN. Ein kleinerer Messbereich würde bei einer eventuellen Überschreitung der abgeschätzten Spitzenkraft zu einer Überlastung der Kraftmessdose führen. Ein größerer Messbereich würde die Messauflösung im relevanten Bereich unnötig reduzieren.

3.2.7 Synthese zum Versuchsaufbau

Aus den in den Abschnitten 3.2.2 bis 3.2.5 begründeten Einzelvarianten ergibt sich der endgültige Versuchsaufbau, der in Abbildung 3.8 dargestellt ist und in Kapitel 4 als tatsächlich umgesetzter Aufbau dokumentiert wird.

Tabelle 3.7 fasst die Ergebnisse der vier Auswahlentscheidungen und die jeweils gewählte Variante aus der Nutzwertanalyse zusammen.

Tabelle 3.7: Gesamtübersicht der Variantenentscheidung

Auswahlentscheidung	Gewählte Variante	Gewichtete Punktzahl
Fahrzeugfixierung	Blockierte Bremse über Bremsspanner, ohne Gang	64
Zugrichtung	Schrägzug 30° zur Fahrzeuglängsachse	60
Anzugsgeschwindigkeit	Zwei Geschwindigkeiten, 5 und 15 km/h	68
Verbindungsmittel	Stahlseil, 26 mm, 6 m	64

Die folgende Abbildung 3.8 stellt den entsprechenden Gesamtaufbau des Versuchs dar.

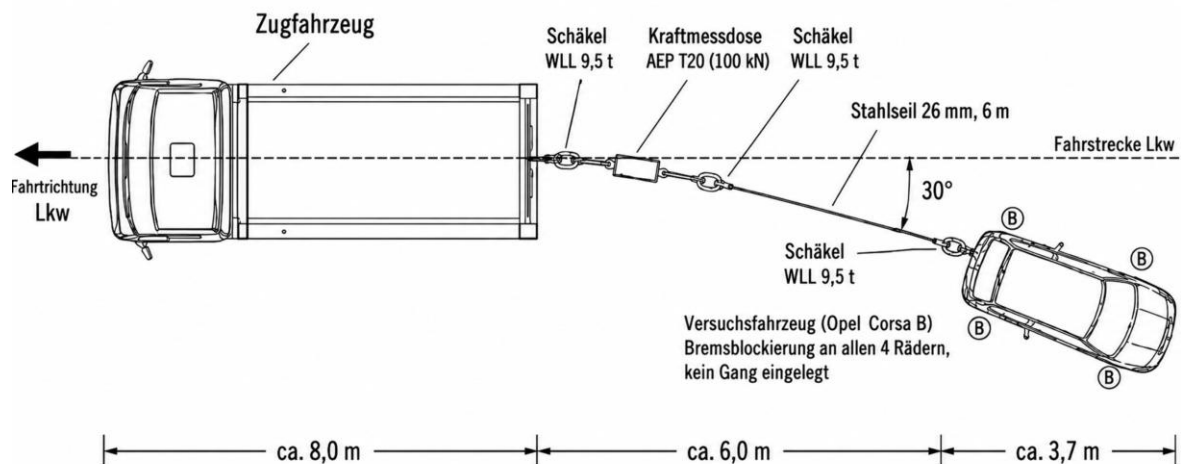


Abbildung 3.8: Schematischer Gesamtaufbau des Versuchs, Zugfahrzeug, Zugkette mit Kraftmessdose und Stahlseil im Schrägzug von 30°

Zusammenfassung der gewählten Varianten

1. Das Versuchsfahrzeug wird ausschließlich über einen Bremsspanner am Bremspedal gegen Wegrollen gesichert. Es bleibt kein Gang eingelegt und die Handbremse ist gelöst. Diese Konfiguration bildet den realen Bergungsfall unmittelbar nach.

2. Das Zugfahrzeug wird schräg zum Versuchsfahrzeug positioniert. Das Zugseil verläuft unter einem Winkel von **30° zur Fahrzeuglängsachse des Versuchsfahrzeugs**. Dieser Winkel wurde als kritischer Lastfall identifiziert und entspricht einer realen Bergungssituation.
3. Pro Versuchsfahrzeug werden zwei Zugversuche mit ansteigender Geschwindigkeit durchgeführt. Die Geschwindigkeiten von **5 km/h** und **15 km/h** ergeben sich aus reproduzierbaren Fahrmanövern des Lkw. Der Lkw beschleunigt aus dem Stand über eine Beschleunigungsstrecke von etwa 10 m, indem dieser rückwärts neben das Versuchsfahrzeug fährt. Das Seil wird erst nach Erreichen der Zielgeschwindigkeit straff.
4. Als Verbindungsmittel zwischen Zugfahrzeug und Versuchsfahrzeug wird ein **Stahlseil** mit einem Durchmesser von 26 mm und einer Länge von 6 m verwendet. Die geringe Dehnung erlaubt die unverfälschte Erfassung der Spitzenkraft im Kraftsignal.
5. Die Kraftmessdose wird unmittelbar an der Anhängerkupplung des Zugfahrzeugs eingebunden. Damit ist sie vor Beschädigung durch das Aufliegen auf dem Boden oder durch zurückschnellende Bauteile geschützt.

Realitätsnähe der Belastungssituation

Als Zugfahrzeug dient ein Lkw, der die in der Praxis vorkommenden schweren Bergungsfahrzeuge abbildet. Da die Versuchsfahrzeuge nur über die Bremse gehalten werden, entsteht die maßgebliche Belastung durch Masse und Antriebsleistung des Lkw, der das Fahrzeug über die Haftreibungsgrenze hinaus beschleunigt. Wie hoch die Zugkraft im realen Bergungsfall ausfällt, hängt vom Widerstand des festsitzenden Fahrzeugs ab und lässt sich nicht allgemein beziffern. Der Versuch stellt daher keine bestimmte reale Zugkraft nach, sondern erzeugt zwei definierte Belastungsstufen und ordnet sie gegen den normativen Prüfwert ein. Die untere Stufe von 5 km/h soll eine Belastung in der Größenordnung der Haftreibungsgrenze von rund 7,53 kN nach Abschnitt 3.2.6 erzeugen und damit in der Größenordnung des normativen Prüfwerts liegen. Sie prüft mithilfe der Messungen, ob das Fahrzeug eine Belastung in Höhe seiner Auslegungsgrenze schadlos übersteht. Die obere Stufe von 15 km/h bildet den Fall einer deutlichen Überschreitung ab.

Die Wahl der Bremsblockierung verdient dabei eine gesonderte Betrachtung. Eine starre Fixierung an den Längsträgern hätte zwar eine vergleichbare Reaktionskraft

für beide Fahrzeuge garantiert, würde die kinetische Energie des Zugfahrzeugs jedoch nahezu vollständig als Kraftspitze in die Struktur einleiten. Nach der Vorabschätzung in Abschnitt 3.2.6 wären theoretisch bis zu 230 kN zu erwarten, ein Vielfaches des realen Belastungsniveaus. Die Bremsblockierung erlaubt bei Überschreitung der Reibungsgrenze ein leichtes Rutschen und damit einen kinetischen Energieabbau. Damit bildet der Versuch die realen Belastungen in einem definierten, nachvollziehbaren Bereich nach.

Aufbau der Zugkette

Die Zugkette wird in folgender Reihenfolge aufgebaut. An der Anhängerkupplung des Lkw wird ein Schäkel befestigt, der gleichzeitig in die Kraftmessdose greift. An der gegenüberliegenden Seite der Kraftmessdose greift ein zweiter Schäkel, der wiederum das Stahlseil aufnimmt. Am anderen Ende des Stahlseils wird ein dritter Schäkel eingesetzt, der an der Anhängerkupplung beziehungsweise Abschleppöse des Versuchsfahrzeugs befestigt wird.

Markierung des Zugwinkels

Für die reproduzierbare Einhaltung des Zugwinkels wird die Ausrichtung vor Versuchsbeginn mit Sprühkreide auf der Asphaltfläche markiert. Ausgehend von der Position der Lkw-Anhängerkupplung wird eine Gerade in Fahrtrichtung des Lkw aufgezeichnet. Über eine trigonometrische Konstruktion mit dem Tangens des Winkels von 30° wird die Ausrichtungslinie des Versuchsfahrzeugs festgelegt.

Ablaufübersicht pro Versuchsfahrzeug

Der Ablauf pro Fahrzeug gliedert sich in die folgenden Schritte:

1. Vorvermessung von Karosserie und Fahrwerk
2. Dokumentation von Reifenluftdruck, Umgebungsbedingungen und Fahrzeuggewicht
3. Sichtprüfung der Anbindungspunkte am Versuchsfahrzeug
4. Positionierung des Versuchsfahrzeugs auf der markierten 30° -Linie
5. Setzen des Bremsspanners bei herausgenommenem Gang
6. Aufbau der Zugkette und Vorspannen des Seils
7. Aufbau der Videodokumentation
8. Räumung des Sicherheitsbereichs
9. Erster Zugversuch mit 5 km/h

10. Sichtkontrolle und Zwischenvermessung von Karosserie und Fahrwerk
11. Zweiter Zugversuch mit 15 km/h
12. Sichtkontrolle und Nachvermessung von Karosserie und Fahrwerk

3.2.8 Sicherheitskonzept

Aufgrund der zu erwartenden Kräfte und der dynamischen Charakteristik des Vorgangs besteht eine erhebliche Gefährdung durch ein potenzielles Versagen eines Bauteils, besonders durch die Anbindungspunkte an den Versuchsfahrzeugen. Im Versagensfall können Bauteile zurückgeschleudert werden und schwere Verletzungen verursachen. Das Sicherheitskonzept umfasst daher mehrere aufeinander abgestimmte Maßnahmen.

Sicherheitsbereich und Personenposition

Im Umkreis des Versuchsaufbaus wird ein Sicherheitsbereich definiert, der von keiner Person betreten wird, sobald das Zugfahrzeug anfährt. Der Bereich erstreckt sich entlang der Zugachse sowie seitlich davon, um den möglichen Rückschlag des Seils im Bruchfall abzudecken. Als Faustregel wird das Doppelte der Seillänge als seitlicher Sicherheitsabstand bestimmt.

Für die Versuchsdurchführung stehen drei Personen zur Verfügung.

Person A fährt das Zugfahrzeug und aktiviert die Datenerfassung der Kraftmessdose vor Versuchsbeginn.

Person B übernimmt die Organisation, weist den Fahrer bis kurz vor dem Zugvorgang ein und leistet Hilfestellung beim Aufbau.

Person C ist für die Videoaufnahme zuständig und aktiviert die Kamera unmittelbar vor Versuchsbeginn.

Nach Abschluss der Vorbereitung ziehen sich die Personen B und C hinter eine massive Betonmauer außerhalb des Sicherheitsbereichs zurück. Person A verbleibt in der Fahrerkabine des Zugfahrzeugs, die zusätzlich Schutz gegen zurückgeschleuderte Bauteile bietet.

Abbruchkriterien

Ein Versuch wird abgebrochen, sobald eines der folgenden Kriterien erfüllt ist:

- Sichtbare Verformung oder Rissbildung an der Anhängerkupplung des Zugfahrzeugs
- Bruch oder sichtbare Verformung eines Schäkels
- Litzenbruch oder sichtbare Schäden am Stahlseil
- Vollständiges Versagen eines der Krafteinleitungspunkte am Versuchsfahrzeug
- Ein Wetterumschwung, insbesondere einsetzender Regen, der die Reibungskoeffizienten zwischen Reifen und Fahrbahn unvorhersehbar verändert

Die Bewertung erfolgt durch eine Sichtprüfung nach jedem Zugversuch. Alle sicherheitsrelevanten Bauteile werden dabei auf offensichtliche Schäden geprüft und die Befunde fotografisch dokumentiert.

3.3 Messtechnisches Konzept

3.3.1 Anforderungen an die Messtechnik

Aus der Charakteristik des in Abschnitt 3.2 beschriebenen Versuchs ergeben sich vier Hauptanforderungen an die Messtechnik. Diese betreffen die zeitliche Auflösung des Kraftsignals, den Messbereich der Kraftmessdose, die räumliche Auflösung der Karosserie- und Achsvermessung sowie die Messgenauigkeit.

Der impulsartige Krafteintrag beim Straffen eines Abschleppseils erzeugt einen Kraftverlauf mit kurzer Anstiegszeit. Vergleichbare Untersuchungen bieten dafür nur begrenzte Orientierung. Petracconi erfassten Lastsignale einer Abschleppöse mit 150 Hz. [4, S. 457] Die „Test Operations Procedure TOP 02-2-618“ fordert unter anderem 100 Hz. [5, S. 33] Beide Werte beziehen sich jedoch auf zyklisch reproduzierbare oder langsam veränderliche Lastfälle, während der untersuchte Impulsfall mit der in 3.2.6 angesetzten Anstiegszeit eine höhere Abtastrate fordert.

Die untere Grenze der Abtastrate ergibt sich aus dem Abtasttheorem nach Shannon. Ein zeitkontinuierliches Signal lässt sich nur dann verlustfrei aus den Abtastwerten rekonstruieren, wenn die Abtastfrequenz mindestens das Doppelte der höchsten im Signal enthaltenen Frequenzkomponenten beträgt. [29, S. 345] Es gilt:

$$f_a > 2 \cdot f_{s,max} \quad (3.4)$$

Dabei bezeichnet f_a die Abtastfrequenz in Hertz und $f_{s,max}$ die höchste im Signal enthaltene Frequenzkomponente in Hertz. Bei Verletzung des Theorems überlappen sich das Basisspektrum und das an der Spektrallinie f_a gespiegelte Spektrum, sodass das Originalspektrum nicht mehr zurückgewonnen werden kann. Der Aliasing-Effekt wird vermieden, indem dem Abtasthalteglied ein Tiefpass als Anti-Aliasing-Filter vorgeschaltet wird. (vgl. [29, S. 345]) Die höchste im Kraftsignal auftretende Frequenzkomponente ist vorab nicht bekannt. Die Abtastrate wird daher auf mindestens 1 kHz pro Kanal festgelegt, wodurch auch eine Anstiegszeit von 10 ms noch durch zehn Messwerte abgebildet werden kann.

Der **Messbereich der Kraftmessdose** ergibt sich aus der in Abschnitt 3.2.6 durchgeführten Vorabschätzung. Für die erwartete Spitzenkraft von etwa 30 kN wird ein Nennmessbereich gewählt, bei dem die erwartete Spitzenkraft etwa 30 % des Nennmessbereichs erreicht. Somit lässt sich eine ausreichende Reserve gegen unerwartet hohe Lastspitzen gewährleisten, ohne dass die Messauflösung im relevanten Bereich verloren geht.

Die **Karosserie- und Achsvermessung** muss Veränderungen im Millimeterbereich erfassen können, da bereits geringe Verschiebungen der Fahrwerksanlenkpunkte messbare Auswirkungen auf die Fahrwerksgeometrie haben. Die geforderte Genauigkeit der Karosserievermessung liegt bei 3 mm pro Bezugspunkt, die der Achsvermessung bei 6 Winkelminuten für die Spur- und Sturzwerte. Beide Anforderungen werden durch die in den Abschnitten 3.3.3 und 3.3.4 beschriebenen Messsysteme erfüllt.

Die **Messgenauigkeit aller Messketten** muss ausreichend hoch sein, um auch kleine Veränderungen zwischen Vor- und Nachzustand zuverlässig zu erfassen. Für die Kraftmessung wird eine Gesamtgenauigkeit von besser als ein Prozent des Endwerts angestrebt. Die TOP 02-2-618 fordert für vergleichbare Anwendungen eine Messunsicherheit von $\pm 0,5$ % des Vollausschlags. [5, S. 8] Dieser Wert wird als Richtwert übernommen. Für die Karosserie- und Achsvermessung gelten die Genauigkeitsanforderungen der jeweils verwendeten Messsysteme. Diese werden in den Abschnitten 3.3.4 und 3.3.5 spezifiziert.

3.3.2 Kraftmesskette

Die Erfassung der Zugkraft erfolgt über eine Kraftmessdose, die in den Lastpfad zwischen Zugfahrzeug und Krafteinleitungspunkt am Versuchsfahrzeug eingebunden wird, vgl. Abbildung 3.8 (Kapitel 3.2.7). Damit wird die in das Zugseil eingeleitete Kraft erfasst. Dämpfungs- und Reibungsverluste im Seil zwischen Messstelle und Versuchsfahrzeug werden als vernachlässigbar angenommen.

Messprinzip

Das Messprinzip beruht auf der elastischen Verformung eines Federkörpers, dessen Dehnung von applizierten Dehnungsmessstreifen in einer Wheatstone-Vollbrücke erfasst wird. Aus der Speisespannung und den vier Brückenwiderständen ergibt sich dabei die Diagonalspannung als Messgröße. [29, S. 252 f.] Die Brückenausgangsspannung einer Vollbrücke ist proportional zur einwirkenden Kraft und wird durch einen Messverstärker in ein normiertes Ausgangssignal umgewandelt.

Verwendete Kraftmessdose

Für den vorliegenden Versuch wird eine Kraftmessdose des Herstellers AEP transducers vom Typ 20 mit mobiler Anzeige AE 703 eingesetzt, siehe Abbildung 3.9. Der Nennmessbereich der Kraftmessdose beträgt 100 kN, die Genauigkeitsklasse C2 nach OIML R60. Das nominelle Ausgangssignal liegt bei 2 mV/V bei Nennlast. Für die mobile Anzeige AE 703 gilt eine Genauigkeit von 0,01 % laut Aufdruck.

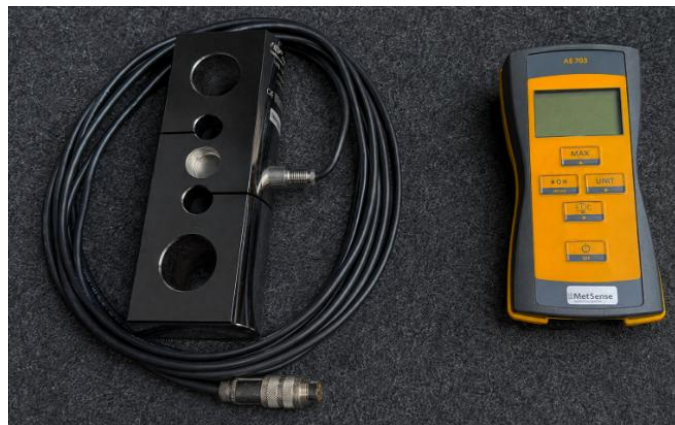


Abbildung 3.9: Kraftmessdose AEP transducers Typ 20, Mobile Anzeige AE 703

Der Nennmessbereich von 100 kN wurde nach der Vorabschätzung in Abschnitt 3.2.6 gewählt. Bei einer erwarteten Spitzenkraft von etwa 30 kN wird der Messbereich zu etwa 30 Prozent ausgeschöpft. Damit besteht eine ausreichende Reserve.

Datenerfassung

Die Kraftmessdose wird über die mobile Anzeige AE 703 betrieben, die die Speisenspannung der Wheatstone-Brücke bereitstellt und das Ausgangssignal aufbereitet. Die Digitalisierung und Aufzeichnung erfolgt über die daran angeschlossene computerbasierte Datenerfassungssoftware ASTAS. Die Abtastrate ist auf den in Abschnitt 3.3.1 festgelegten Mindestwert von 1 kHz konfiguriert.

Mechanische Einbindung

Die Kraftmessdose wird über zwei Schäkel in den Lastpfad eingebunden. Ein Schäkel greift in die Anhängerkupplung des Zugfahrzeugs und gleichzeitig in eine Seite der Kraftmessdose. Der zweite Schäkel greift in die gegenüberliegende Seite der Kraftmessdose und in das Stahlseil, siehe Abbildung 3.10. Die Verbindungselemente weisen die in Abschnitt 3.2.6 nachgewiesenen Belastbarkeitsreserven auf.



Abbildung 3.10: Einbindung der Kraftmessdose in die Zugkette

Die Positionierung der Kraftmessdose unmittelbar an der Anhängerkupplung des Zugfahrzeugs schützt sie vor Beschädigung durch das Aufliegen auf dem Boden oder durch zurückschnellende Bauteile am Versuchsfahrzeug. Die mechanische Einbindung ist so ausgeführt, dass die Kraftmessdose ausschließlich auf Zug belastet wird. Biege- und Querkraftanteile sind konstruktiv vernachlässigbar.

3.3.3 Karosserievermessung

Die Karosserievermessung dient der Erfassung möglicher geometrischer Veränderungen der tragenden Karosseriestruktur infolge des Zugvorgangs. Aus dem Vergleich zwischen Vor- und Nachvermessung lassen sich bleibende Verformungen quantifizieren, die durch eine reine Sichtprüfung nicht erkennbar wären.

Moderne Karosseriestrukturen besitzen nach der Software vom Hersteller definierte Bezugspunkte, deren räumliche Lage in den Karosseriedaten des jeweiligen Fahrzeugtyps dokumentiert ist. Diese Bezugspunkte liegen an konstruktiv eindeutig identifizierbaren Stellen wie Bohrungen, Stehbolzen oder Strukturkanten an Längsträgern, Querträgern und Bodengruppe. Die Lage der Bezugspunkte sollte über die Fahrzeuglebensdauer hinweg unveränderlich sein, solange die zugehörige Struktur nicht plastisch verformt wird. Eine messbare Verschiebung eines Bezugspunkts gegenüber dem Sollwert weist daher unmittelbar auf eine Strukturveränderung hin. Für die Versuchsdurchführung wird ein elektronisches Karosserievermessungssystem des Herstellers Car-O-Liner eingesetzt, siehe Abbildung 3.11.



Abbildung 3.11: Car-O-Tronic, System zur Vermessung der Karosseriegeometrie

Das System erfasst die räumliche Lage der Bezugspunkte über einen Messarm mit elektronisch ausgelesenen Messtastern sowie auswechselbaren Adaptern, die nacheinander an die einzelnen Messpunkte angesetzt werden. Die Messwerte werden mit den im System hinterlegten Herstellerdaten des Fahrzeugtyps verglichen. Abweichungen werden in den drei Raumrichtungen mit zugehöriger Soll-Toleranz ausgegeben.

Das verwendete **Car-O-Tronic**-System weist nach Herstellerangabe eine Anzeigegenauigkeit von $\pm 0,5 \text{ mm}$ auf. [Anhang B] Dieser Wert beschreibt die Genauigkeit einer einzelnen Messung unter idealen Bedingungen bei ortsfestem Aufbau. Das Messsystem muss zwischen den einzelnen Belastungsstufen vollständig abgebaut und erneut aufgebaut werden. Da das Fahrzeug dabei jeweils neu im Messsystem aufgenommen wird, ist die tatsächlich erreichbare Wiederholstreuung größer als die

reine Anzeigegenauigkeit. Aus diesem Grund wird die für die Auswertung maßgebliche Signifikanzschwelle nicht allein aus der Herstellerangabe übernommen, sondern zusätzlich aus den im Versuch gewonnenen Messdaten abgeschätzt. Das Vorgehen hierzu ist in Abschnitt 3.4.2 beschrieben.

Selbstdefiniertes Messkonzept über Empty Data Sheet

Für den Opel Corsa in der Konfiguration mit Anhängerkupplung liegen im Car-O-Tronic-System keine spezifischen Herstellerdaten vor. Aufgrund dessen wird für beide Fahrzeuge ein selbstdefiniertes Messkonzept auf Basis eines leeren Datensatzes (**Empty Data Sheet**) angewendet. Über vier Referenzpunkte am Fahrzeug wird die räumliche Lage des Fahrzeugs im Messsystem ausgerichtet. Anschließend werden zehn für den Versuch relevante Messpunkte pro Fahrzeugseite festgelegt und über eine Streckenmessung erfasst. Diese umfassen die karosserie-seitigen Anbindungspunkte von Vorder- und Hinterachse, Punkte im Verlauf der Karosseriestruktur und unmittelbare Aufnahmepunkte von Anhängerkupplung und Abschleppöse. Abbildung 3.12 stellt diese mit den verwendeten Messaufsätzen dar.

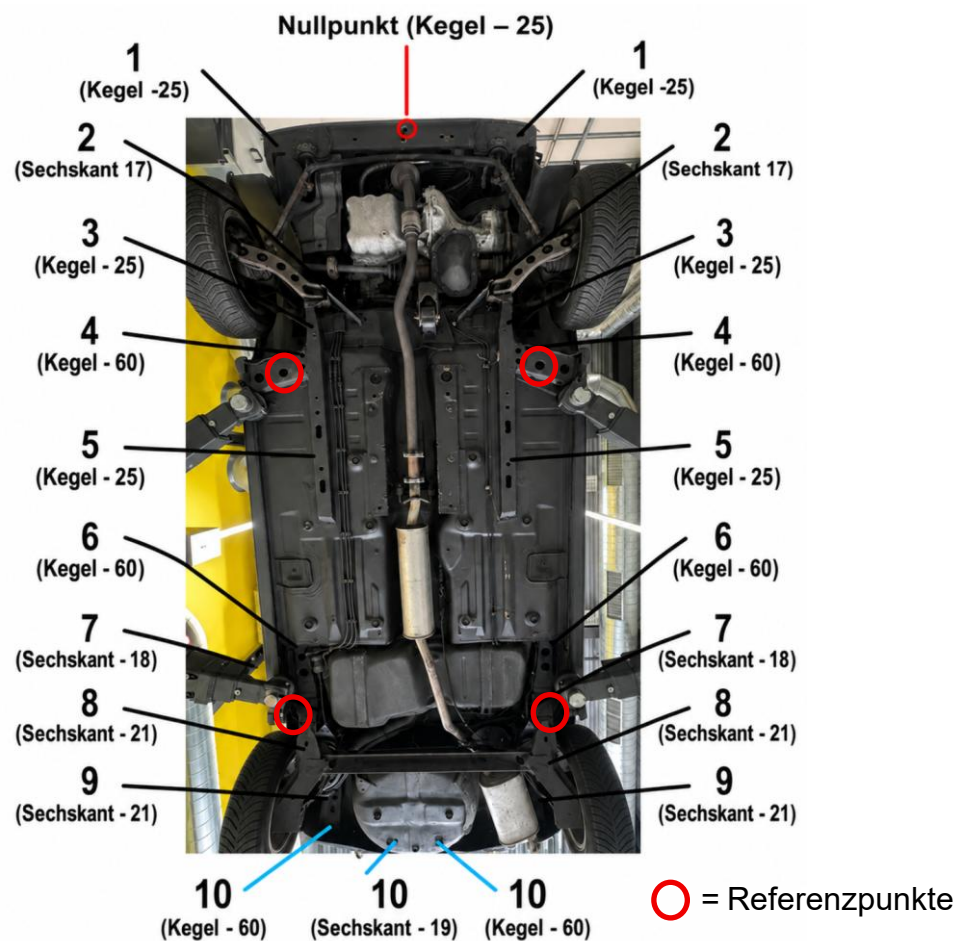


Abbildung 3.12: Lage der Messpunkte für die Karosserievermessung

Als **Nullpunkt** für die Streckenmessung dient ein Bezugspunkt am vorderen Längsträger. Diese Position wird gewählt, weil sie außerhalb des unmittelbaren Lastpfads der Zugkraft liegt und daher mit hoher Wahrscheinlichkeit auch bei einer strukturellen Beanspruchung im Heckbereich unverformt bleibt. Alle zehn Messpunkte werden relativ zu diesem Nullpunkt vermessen. Die Bezugspunkte werden so verteilt, dass sie den unmittelbaren Lastpfad (Anhängerkupplung, hintere Längsträger, Bodengruppe) sowie umliegende Referenzbereiche abdecken.

Die Vermessung erfolgt nach einem standardisierten Ablauf. Das Fahrzeug wird an der Bühne des Vermessungssystems aufgenommen und über die vier Referenzpunkte ausgerichtet. Anschließend werden die zehn Bezugspunkte einzeln vermessen und die Istwerte relativ zum Nullpunkt am vorderen Längsträger gespeichert.

Die Vor- und Nachvermessungen werden unter identischen Randbedingungen durchgeführt. Beide Messungen erfolgen idealerweise am selben Tag, mit demselben Messsystem und ohne Demontage von Anbauteilen zwischen den Messungen. Damit sind systematische Abweichungen zwischen Vor- und Nachmessung minimiert. Eine zwischen den Messungen festgestellte Abweichung im Bereich der Struktur kann unter diesen Randbedingungen anschließend deutlich dem Zugvorgang zugeordnet werden.

Für die Auswertung sind insbesondere Bezugspunkte im Bereich der hinteren Längsträger, der hinteren Bodengruppe und der Anbindung der Anhängerkupplung bzw. Abschleppöse relevant. Diese Bereiche liegen im unmittelbaren Lastpfad der eingeleiteten Zugkraft und sind nach den in Abschnitt 2.3 dargestellten Strukturzusammenhängen am ehesten von einer plastischen Verformung betroffen.

3.3.4 Achsvermessung

Die Achsvermessung dient der Erfassung möglicher Veränderungen der Fahrwerksgeometrie infolge des Zugvorgangs. Aus dem Vergleich zwischen Vor-, Zwischen- und Nachvermessung lassen sich Abweichungen der relevanten Achseinstellwerte gegenüber den Herstellervorgaben quantifizieren.

Die zentralen Kenngrößen der Fahrwerksgeometrie wurden in Abschnitt 2.4.1 eingeführt. Für die Untersuchung ist entscheidend, dass Verschiebungen der Fahrwerksanlenkpunkte im Millimeterbereich zu messbaren Veränderungen dieser

Winkel führen können. Erfasst werden für beide Achsen die Spurwerte und die Sturzwinkel sowie für die Vorderachse zusätzlich der Nachlauf.

Verwendetes Messsystem

Für die Versuchsdurchführung wird die Achsvermessungsanlage **Bosch FWA 4630**, mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1^\circ$ laut Aufdruck, eingesetzt. In Abbildung 3.13 ist das System im aufgebauten Zustand zu sehen. Das System arbeitet auf Basis optischer Messköpfe, die an allen vier Rädern befestigt werden und die räumliche Lage der Räder gegenüber einer Referenz erfassen. Die ermittelten Achseinstellwerte werden mit den im System hinterlegten Herstellertoleranzen des Fahrzeugtyps abgeglichen.



Abbildung 3.13: Bosch FWA 4630 zur Vermessung der Achsgeometrie

Erfasst werden für jede der beiden Achsen die Spurwerte, die Sturzwinkel und der Nachlauf. Die Ausgabe erfolgt als tabellarisches Protokoll mit Abweichung zum Sollwert und gemessenem Istwert je Rad. Abweichungen außerhalb der Toleranz werden im Protokoll gekennzeichnet.

Ablauf der Vermessung

Die Vermessung erfolgt unter standardisierten Randbedingungen. Das Fahrzeug wird auf der Vermessungsbühne positioniert und über die Radaufnahme ausgerichtet. Die Messköpfe werden an den vier Rädern befestigt und in eine definierte Ausgangslage gebracht. Anschließend werden die Achseinstellwerte einzeln erfasst und mit den Sollwerten verglichen.

Voraussetzung für eine eindeutige Zuordnung der Abweichungen zum Versuchsergebnis ist die Einhaltung identischer Randbedingungen bei allen Messungen. Reifenluftdruck, Beladungszustand und Federungszustand werden vor jeder Messung kontrolliert und auf denselben Stand gebracht. Damit ist sichergestellt, dass gemessene Veränderungen nicht auf abweichende Messbedingungen, sondern auf eine tatsächliche Strukturveränderung zurückzuführen sind.

Die Achsvermessung wird vor dem ersten Zugversuch, nach dem ersten und nach dem zweiten Zugversuch durchgeführt. Damit lässt sich die geometrische Reaktion des Fahrwerks für jede Belastungsstufe separat erfassen.

3.3.5 Videodokumentation

Die Videodokumentation ergänzt die messtechnische Erfassung um eine visuelle Dokumentation des Versuchsablaufs. Sie erlaubt die nachträgliche Beobachtung des Bewegungsverhaltens von Zugfahrzeug, Versuchsfahrzeug und Zugkette sowie die Verifikation der geometrischen Randbedingungen wie Winkelstellung und Positionierung.

Zweck der Videoaufnahme

Der Zweck der Videoaufnahme ist dreifach.

1. Dokumentiert die Einhaltung der geplanten Randbedingungen wie Fahrzeugposition, Winkelstellung und Ablauf der Anzugsprozedur
2. Erlaubt die visuelle Kontrolle des Fahrzeugverhaltens während und nach dem Zugvorgang, insbesondere ein eventuelles Rutschen oder Verkanten des Versuchsfahrzeugs
3. Dient als Sicherheitsdokumentation für den Fall eines Bauteilversagens im Zugstrang

Verwendetes Kamerasystem

Für die Versuchsdurchführung wird die Kamera eines iPhone 15 Pro mit einer Auflösung von 4K und einer Bildrate von 60 fps eingesetzt. Die Kamera wird auf einem Stativ in ausreichendem Sicherheitsabstand zum Versuchsaufbau positioniert. Der Blickwinkel wird so gewählt, dass sowohl das Zugfahrzeug als auch das Versuchsfahrzeug samt Zugkette während des Versuchsablaufs vollständig im Bild erfasst werden.

Die Aufnahme wird vor Versuchsbeginn gestartet und läuft während des gesamten Zugvorgangs kontinuierlich. Nach Abschluss des Zugvorgangs wird die Aufnahme fortgesetzt, bis das Fahrzeug seine endgültige Position eingenommen hat und die Sichtkontrolle abgeschlossen ist. Damit sind sowohl der Ausgangszustand, der Versuchsablauf als auch der Endzustand in einer durchgehenden Aufzeichnung dokumentiert.

3.3.6 Erfassung der Fahrbahntemperatur

Die Oberflächentemperatur der Fahrbahn wird vor jedem Zugversuch an allen vier Radaufstandsflächen des Versuchsfahrzeugs erfasst. Grundlage dieser Messung ist der in Abschnitt 3.2.2 dargestellte Zusammenhang, nach dem die Haftreibung zwischen Reifen und Fahrbahn die maximal in das Fahrzeug übertragbare Zugkraft begrenzt. Die Temperaturerfassung dient der Dokumentation vergleichbarer Reibungsbedingungen zwischen den einzelnen Versuchen und als Vorbehalt für die Auswertung zur Deutung eventueller Einflüsse auf die Versuche.

Die Messung an jeder einzelnen Radaufstandsfläche ermöglicht zudem den Nachweis, dass an allen vier Rädern vergleichbare Bedingungen vorliegen und keine einseitige Abweichung des Reibungsverhaltens besteht. Die Erfassung erfolgt berührungslos mit einem Infrarot-Thermometer vom Typ Fluke 62 Max+. Das Gerät ermöglicht die Messung der Oberflächentemperatur mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$, bzw. $\pm 1\text{ °C}$ des Messwerts.

3.4 Auswertungsmethodik

3.4.1 Auswertung der Kraft-Zeit-Verläufe

Die Auswertung der mit der Kraftmessdose erfassten Signale erfolgt in zwei grundlegenden Schritten. Zunächst wird der Kraft-Zeit-Verlauf grafisch dargestellt und auf Auffälligkeiten geprüft. Anschließend werden die für die Hypothesenprüfung relevanten Kennwerte betrachtet und mit den normativen Referenzwerten verglichen.

Als maßgeblicher Kennwert dient die Spitzenkraft F_{max} , also der höchste Momentanwert der Zugkraft. Sie ist entscheidend, weil die strukturelle Schädigung vom Überschreiten der Streckgrenze abhängt und diese durch die momentane Spannungsspitze bestimmt wird. Der zeitlich integrierte Kraftverlauf bildet dagegen den übertragenen Impuls ab und nicht die maximale Beanspruchung. Da sämtliche

Hypothesen dieser Arbeit auf der maximalen Beanspruchung und der daraus resultierenden Verformung beruhen, wird die Auswertung auf die Spitzenkraft als Bewertungsgröße beschränkt.

Der normative Referenzwert ergibt sich aus der Anforderung, dass eine Abschlepp-einrichtung einer statischen Zug- und Druckkraft standhalten muss, die der Schwerkraft der mindestens halben technisch zulässigen Gesamtmasse entspricht. [8, Anh. VII, Abs. 1.2.1] Diese Prüfkraft wird ausschließlich horizontal in Fahrzeuglängsrichtung aufgebracht. [8, Anh. VII, Abs. 2.2] Der im Versuch gemessenen Spitzenkraft liegt hingegen ein Schrägzug von 30° zugrunde, sodass der Vergleich beider Werte nicht unter gleichen Randbedingungen erfolgt. Genau diese Abweichung ist Gegenstand der Untersuchung. Es gilt:

$$F_{ref} = 0,5 \cdot m_{zul} \cdot g \quad (3.5)$$

Dabei bezeichnet F_{ref} den Referenzwert der Kraft, m_{zul} die technisch zulässige Gesamtmasse des Versuchsfahrzeugs und g die Erdbeschleunigung mit 9,81 m/s². Für die zulässige Gesamtmasse von 1.390 kg [Anhang A.1] ergibt sich ein Referenzwert von 6,82 kN. Eine Verbindungseinrichtung nach UN-R55 darf als hintere Abschlepp-einrichtung dienen. [8, Anh. VII, Abs. 1.1.3]

Die Anhängerkupplung des Versuchsfahrzeugs A ist nach Typenschild für einen D-Wert von 5,9 kN ausgelegt [Anhang C.2]. Dieser dient als bauteilbezogener Vergleichsmaßstab neben dem normativen Prüfwert, siehe Abschnitt 2.2.

Die Vergleichbarkeit der beiden Versuche untereinander wird durch den Vergleich der Spitzenkräfte von V1.1 bis V2.2 hergestellt. Daraus lässt sich beurteilen, ob die unterschiedlichen Krafteinleitungspunkte zu deutlich unterschiedlichen Belastungen der nachgelagerten Strukturbereiche führen.

3.4.2 Auswertung der Geometrieabweichungen

Die Auswertung der Geometrieabweichungen erfolgt getrennt für die Karosserie- und die Achsvermessung. In beiden Fällen werden die nach dem Versuch gemessenen Istwerte mit den vor dem Versuch gemessenen Istwerten verglichen.

Auswertung der Karosserievermessung

Für die Karosserievermessung wird für jeden relevanten Bezugspunkt die Veränderung der Direktlänge zwischen der Vor- und Nachmessung ermittelt. Die Direktlänge

beschreibt den räumlichen Abstand des jeweiligen Bezugspunkts vom definierten Nullpunkt am vorderen Längsträger. Die Abweichung eines Bezugspunktes i berechnet sich nach:

$$\Delta S_i = S_{i,nach} - S_{i,vor} \quad (3.6)$$

Dabei bezeichnet ΔS_i die Veränderung der Direktlänge des Bezugspunkts i in Millimetern. Die Werte $S_{i,vor}$ und $S_{i,nach}$ stehen für die Direktlänge des Bezugspunkts vor und nach dem Versuch.

Hierzu wird die Messung ohne zwischenzeitliche Belastung wiederholt, wobei das Fahrzeug jeweils neu auf der Bühne aufgenommen wird. Aus der Standardabweichung dieser Wiederholmessung wird die Signifikanzschwelle als deren Zweifaches festgelegt. Eine gemessene Änderung wird nur dann als versuchsbedingt gewertet, wenn sie diese Schwelle übersteigt. Der in Abschnitt 3.3.3 definierte Nullpunkt am vorderen Längsträger dient dabei als Referenz für alle Streckenmessungen.

Auswertung der Achsvermessung

Für die Achsvermessung werden die Achseinstellwerte Spur, Sturz und Nachlauf für jedes Rad verglichen. Die Abweichung einer Einstellgröße α berechnet sich nach:

$$\Delta \alpha = \alpha_{nach} - \alpha_{vor} \quad (3.7)$$

Dabei bezeichnet $\Delta \alpha$ die Veränderung der Achseinstellgröße zwischen Vor- und Nachvermessung in Grad oder Winkelminuten. Die Werte α_{vor} und α_{nach} stehen für die Achseinstellwerte vor und nach dem Versuch.

Die Signifikanzschwelle wird primär aus der Anzeigegenauigkeit des Messsystems abgeleitet, unter Vorbehalt von auftretenden Auffälligkeiten ggfs. aber auch mit der im Versuch erreichten Wiederholstreuung abgeglichen. Herangezogen werden die Lageänderungen der Bezugspunkte außerhalb des Lastpfads, die keine last-induzierte Verformung aufweisen sollten und deren Abweichungen daher die reine Mess- und Aufbaustreuung abbilden. Aus deren Standardabweichung wird die Signifikanzschwelle als Zweifaches festgelegt. Eine gemessene Lageänderung wird nur dann als bleibende Verformung gewertet, wenn sie diese Schwelle übersteigt.

3.4.3 Bewertungskriterien zur Hypothesenprüfung

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Auswertungsmethoden werden in diesem Abschnitt zu einem Gesamtschema für die Hypothesenprüfung zusammengeführt. Jede der drei Hypothesen wird einem definierten Bewertungskriterium zugeordnet, das aus den Messdaten eindeutig prüfbar ist.

Hypothese H1 – Kraftspitzen überschreiten normativen Prüfwert

Die erste Hypothese postuliert, dass die beim dynamischen Abschleppvorgang auftretenden Kraftspitzen den normativen Prüfwert nach der Durchführungsverordnung (EU) 2021/535 signifikant überschreiten. [8, Anh. VII, Abs. 1.2.1] Die Bewertung erfolgt durch Vergleich der gemessenen Spitzenkraft F_{max} aus Abschnitt 3.4.1 mit dem Referenzwert F_{ref} in Höhe der Hälfte der zulässigen Gesamtmasse des Versuchsfahrzeugs. Hypothese H1 gilt als bestätigt, wenn:

$$F_{max} > F_{ref} \quad (3.8)$$

Bei Mehrfachüberschreitung wird der Faktor F_{max}/F_{ref} angegeben, um den Grad der Überschreitung quantitativ zu kennzeichnen. Zu berücksichtigen ist die unterschiedliche Wirkrichtung von Prüfkraft und Versuchslast.

Hypothese H2 – Bleibende Verformungen der Karosseriestruktur

Hypothese H2 nimmt an, dass die in das Fahrzeug eingeleiteten Kräfte messbare bleibende Verformungen der tragenden Karosseriestruktur verursachen. Die Bewertung erfolgt anhand der Karosserievermessung aus Abschnitt 3.4.2. Diese gilt als bestätigt, wenn im Bereich des Krafteinleitungspunkts die Veränderung der Direktlänge eines Bezugspunkts die dort festgelegte Signifikanzschwelle übersteigt:

$$\Delta S_i > \Delta_{ref} \quad (3.9)$$

Dabei bezeichnet Δ_{ref} die nach Abschnitt 3.4.2 aus der Wiederholstreuung abgeleitete Signifikanzschwelle in Millimetern.

Hypothese H3 – Abweichungen der Fahrwerksgeometrie

Die dritte Hypothese postuliert, dass die durch den Zugvorgang verursachten Strukturveränderungen zu messbaren Abweichungen der Fahrwerksgeometrie von den Herstellertoleranzen führen. Die Bewertung erfolgt anhand der Achsvermessung aus Abschnitt 3.4.2. Die Hypothese H3 gilt als bestätigt, wenn mindestens einer der

Achseinstellwerte vor dem Versuch innerhalb der Toleranzen lag, sich um mehr als die Signifikanzschwelle verändert und nach dem Versuch außerhalb der Toleranz liegt.

Zusammenhang zwischen den Hypothesen

Die drei Hypothesen sind kausal verknüpft. H1 beschreibt die Ursache, H2 und H3 beschreiben die strukturellen und geometrischen Folgen. Die kombinierte Auswertung erlaubt es, einen Zusammenhang zwischen der eingeleiteten Spitzenkraft, der Karosserieverformung und den resultierenden Geometrieänderungen nahezulegen.

Folgende Tabelle 3.8 fasst die Bewertungskriterien für die drei Hypothesen zusammen:

Tabelle 3.8: Bewertungskriterien zur Prüfung der Hypothesen

Hypothese	Bewertungsgröße	Kriterium
H1	Spitzenkraft F_{max}	$F_{max} > F_{ref}$ nach Gl. (3.8)
H2	Veränderung der Direktlänge ΔS_i	$\Delta S_i > \Delta_{ref}$ nach Gl. (3.9)
H3	Achseinstellwerte	Toleranzüberschreitung bei signifikanter Änderung

Über die Hypothesenprüfung hinaus erlaubt das Versuchsdesign einen direkten Vergleich zwischen den Krafteinleitungspunkten sowie Geschwindigkeitsstufen. Für jede Bewertungsgröße wird das Ergebnis der Versuche der Anhängerkupplung mit denen der Abschleppöse verglichen. Aus dem Vergleich lässt sich beurteilen, ob einer der beiden Krafteinleitungspunkte unter sonst gleichen Bedingungen zu deutlich größeren strukturellen oder geometrischen Auswirkungen führt.

4 Versuchsdurchführung und Ergebnisdarstellung

Das vorliegende Kapitel dokumentiert die praktische Umsetzung des in Kapitel 3 entwickelten Versuchskonzepts. Die Darstellung folgt dem tatsächlichen zeitlichen Ablauf. Beginnend mit den Rahmenbedingungen des Versuchstags, gefolgt von der Fahrzeugpräparation, dem Aufbau des Versuchsstands, der Durchführung der Zugversuche sowie den erfassten Messergebnissen. Die Interpretation der Ergebnisse und deren Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext erfolgt in Kapitel 5.

4.1 Rahmenbedingungen der Versuchsdurchführung

Die Zugversuche wurden für den Corsa mit Anhängerkupplung am 6. Juli 2026 und für den Corsa mit Abschleppöse am 13. Juli 2026 auf dem Gelände der Westsächsischen Hochschule Zwickau durchgeführt. Als Versuchsfläche diente eine ebene Asphaltfläche mit ausreichender Länge für die vorgesehene Beschleunigungsstrecke von 10 m sowie hinreichender seitlicher Freifläche für den Sicherheitsbereich.

Die Witterungsbedingungen waren während der gesamten Versuchsdurchführung trocken. Die Lufttemperatur betrug 20 bis 25 °C. Der Zustand der Fahrbahnoberfläche wurde als trocken und frei von Verunreinigungen dokumentiert.

Vor Versuchsbeginn wurde die Temperatur der Fahrbahnoberfläche an allen vier Radaufstandsflächen der beiden Versuchsfahrzeuge gemessen. Die Erfassung erfolgte mit einem Infrarot Thermometer vom Typ Fluke 62 Max+, mit einer Genauigkeitsangabe von ± 1 %, bzw. ± 1 °C. Grundlage und Zweck dieser Messung sind in Abschnitt 3.3.6 dargelegt. Die Messwerte sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Temperaturen an allen vier Rädern beider Versuchsfahrzeuge vor jedem Versuch in °C

Radposition	AHK 5 km/h	AHK 15 km/h	AÖ 5 km/h	AÖ 15 km/h
Vorne links	25,0 °C	27,3 °C	28,7 °C	30,0 °C
Vorne rechts	24,2 °C	27,0 °C	28,5 °C	30,2 °C
Hinten links	24,8 °C	27,4 °C	27,6 °C	29,5 °C
Hinten rechts	24,2 °C	27,1 °C	27,5 °C	29,9 °C

Die Temperaturen liegen bei sämtlichen Messungen zwischen 24,2 °C und 30,2 °C. Die Werte des Fahrzeugs mit Abschleppöse liegen durchgehend geringfügig über denen des Fahrzeugs mit Anhängerkupplung, was auf den späteren und sonnigeren Versuchszeitpunkt zurückzuführen ist.

4.2 Vorbereitung der Versuchsfahrzeuge

Fahrzeugauswahl und Konfiguration

Als Versuchsfahrzeuge kamen zwei Opel Corsa 1.0 12V Edition 100 aus dem Baujahr 1999 zum Einsatz. Fahrzeug A war werksseitig mit einer Anhängerkupplung ausgestattet, Fahrzeug B verfügte über die serienmäßige hintere Abschleppöse. In der folgenden Abbildung 4.1 sind die beiden Zugpunkte zu sehen.

Abschleppöse



Anhängerkupplung



Abbildung 4.1: Heckansicht der beiden Versuchsfahrzeuge mit den unterschiedlichen Krafteinleitungspunkten

Massenausgleich

Zur Sicherstellung der in Abschnitt 3.1.2 begründeten Massegleichheit wurden beide Fahrzeuge vor Versuchsbeginn gewogen. Das Wiegen erfolgte mit einer Radlastwaage vom Typ IFX-20-LCD-F, mit einer Genauigkeit von **< 0,5 %** vom Endwert laut Aufdruck. Für Fahrzeug A ergab sich eine Gesamtmasse von 960 kg. Fahrzeug B wies eine Masse von 946 kg auf und wurde durch ein Ausgleichsgewicht von 14 kg auf eine identische Gesamtmasse gebracht. Das Ausgleichsgewicht wurde im Kofferraum platziert, um das vermutlich fehlende Gewicht durch die AHK auszugleichen.

Reifenluftdruck und Ausgangszustand

Der Reifenluftdruck wurde an beiden Fahrzeugen auf einen Wert von **2 bar** an allen vier Rädern eingestellt. Die Fahrzeuge wurden ohne weitere Beladung und Insassen betrieben. Der Kraftstofftank wurde bei beiden Fahrzeugen mit rund 5 bis 10 Litern vor der Gewichtsmessung gefüllt, um vergleichbare Ausgangsbedingungen zu gewährleisten.

Sichtprüfung der Anbindungspunkte

An beiden Fahrzeugen wurde vor Versuchsbeginn eine Sichtprüfung des jeweiligen Krafteinleitungspunkts durchgeführt. Bei Fahrzeug A wurde die Anhängerkupplung auf Rissbildung, Korrosion und Verformung untersucht. Bei Fahrzeug B wurde die Abschleppöse auf festen Sitz sowie äußere Unversehrtheit geprüft. Bei beiden Fahrzeugen wurden keine sicherheitsrelevanten Auffälligkeiten festgestellt.

Einsetzen des Bremsspanners

Für die Fixierung des Versuchsfahrzeugs gegen Wegrollen und als gegenhaltende Kraft wurde ein Bremsspanner verwendet, der das Bremspedal in gedrückter Position hält. Der Bremsspanner wurde vor jedem Zugversuch neu gesetzt und auf festen Sitz geprüft. Das Getriebe blieb während der gesamten Zugversuche in Neutralstellung, die Handbremse wurde gelöst. Damit sind alle vier Räder ausschließlich über die hydraulische Betriebsbremse blockiert.

4.3 Vorversuche zur Reproduzierbarkeit der Anzugsgeschwindigkeit

Zur Sicherstellung der in Abschnitt 3.2.4 begründeten Anzugsgeschwindigkeiten von 5 km/h und 15 km/h wurden vor Beginn der Zugversuche mehrere Vorversuche mit dem Zugfahrzeug durchgeführt. Ziel war der Nachweis, dass beide Zielgeschwindigkeiten durch definierte Fahrmanöver des Fahrers reproduzierbar erreicht werden können und die erforderliche Beschleunigungsstrecke innerhalb der verfügbaren Anfahrlänge von 10 m liegt.

Verwendetes Zugfahrzeug

Als Zugfahrzeug diente ein Doppelkabinen-Lkw des Typs **MAN TGL 8.180**, mit einer Ladefläche von etwa 5 m Länge und einer Leermasse von **5,5 t**, siehe Abbildung

4.2. Die werksseitige Anhängerkupplung ist mit den Kennzeichnungen A50-X, D 140, dem ECE-Prüfzeichen e1 00-1512, einem **D-Wert** von **27,1 kN** und einer Stützlast S von 150 kg gekennzeichnet [Anhang C.1].



Abbildung 4.2: Darstellung des verwendeten Zugfahrzeugs

Messmethode

Die Geschwindigkeitsmessung erfolgte über einen dual-frequenzfähigen GNSS-Empfänger eines iPhone 15 Pro, der die Position vor allem über die Satellitensysteme GPS, GLONASS und Galileo ermittelt. Der Empfänger wurde während der Vorvermessung in der Fahrerkabine des Zugfahrzeugs mitgeführt und zeichnete die aktuelle Geschwindigkeit kontinuierlich auf.

Fahrmanöver für 5 km/h

Die untere Geschwindigkeitsstufe von 5 km/h wurde durch folgendes Fahrmanöver reproduziert. Der Fahrer schaltete den ersten Gang ein, ließ die Kupplung vollständig kommen und brachte den Lkw auf Rollgeschwindigkeit ohne Gaspedalbetätigung. Die durch die Leerlaufdrehzahl und die Getriebeübersetzung bestimmte Rollgeschwindigkeit stellte sich nach kurzer Beschleunigungsstrecke ein.

In drei aufeinanderfolgenden Messungen ergab sich reproduzierbar eine Endgeschwindigkeit von 5 km/h. Die zurückgelegten Beschleunigungswege betrugen **3,18 m**, **3,28 m** und **3,33 m**. Die maximale Abweichung zwischen den drei Messungen beträgt 0,15 m und liegt damit innerhalb einer akzeptablen Streuung für ein manuell durchgeführtes Fahrmanöver.

Fahrmanöver für 15 km/h

Die obere Geschwindigkeitsstufe von 15 km/h wurde durch folgendes Fahrmanöver reproduziert. Der Fahrer schaltete den ersten Gang ein und beschleunigte mit Vollgas. Die dabei erreichte Endgeschwindigkeit im ersten Gang wurde ebenfalls in drei aufeinanderfolgenden Messungen erfasst.

In allen drei Messungen ergab sich reproduzierbar eine Endgeschwindigkeit von 15 km/h. Die zurückgelegten Beschleunigungswege bei den anschließenden Vorversuchen betrugen **6,65 m**, **5,24 m** und **5,53 m**. Der Wert der ersten Messung stellt einen deutlich längeren Weg dar, der auf eine ungeübte Fahrsituation beim ersten Anfahren zurückzuführen ist. Die beiden nachfolgenden Messungen mit 5,24 m und 5,53 m weichen um lediglich 0,29 m voneinander ab und dokumentieren die Reproduzierbarkeit der Vollgasbeschleunigung nach kurzer Eingewöhnung.

In der folgenden Abbildung 4.3 sind die praktisch ermittelten Werte aus dem Vorversuch dargestellt.



Abbildung 4.3: Ergebnisse des Vorversuchs zur Ermittlung der Wegstrecken für 5 km/h und 15 km/h

Bewertung der Reproduzierbarkeit

Aus den Vorvermessungen ergibt sich, dass beide Zielgeschwindigkeiten durch die definierten Fahrmanöver reproduzierbar erreichbar sind. Die dabei erforderlichen Beschleunigungswege liegen bei etwa 3 m für 5 km/h und bei etwa 5 bis 7 m für 15 km/h. Beide Werte liegen innerhalb der verfügbaren Anfahrlänge von 10 m, sodass

die Zielgeschwindigkeit vor dem Straffwerden des 6 m langen Stahlseils stabil erreicht wird.

Damit ist die methodische Voraussetzung für die vergleichende Auswertung der Zugversuche zwischen beiden Versuchsfahrzeugen geschaffen, weil die Eingangsbedingungen im Moment des Straffwerdens für alle Versuche identisch sind.

4.4 Aufbau des Versuchsstands

Der Aufbau des Versuchsstands folgte dem in Abschnitt 3.2.7 begründeten endgültigen Versuchsaufbau. Die Umsetzung erfolgte in drei Arbeitsschritten:

1. Markierung der Ausrichtungslinien mit Sprühkreide
2. Positionierung des Versuchsfahrzeugs
3. Aufbau der Zugkette

Markierung der Ausrichtungslinien

Zur reproduzierbaren Einhaltung des Schrägzugs von 30° wurde die Ausrichtung vor Versuchsbeginn mit Sprühkreide auf der Asphaltfläche des Hochschulgeländes markiert. Die Konstruktion des Winkels erfolgte über eine trigonometrische Ableitung aus dem Tangens.

Ausgehend von der geplanten Ausgangsposition der Lkw-Anhängerkupplung wurde eine gerade Linie in Fahrtrichtung des Lkw über eine Länge von 6 m markiert, die der Länge des Seils entspricht. Vom Endpunkt dieser Linie wurde im rechten Winkel eine zweite Linie mit einer Länge nach der Beziehung $l = 6 \text{ m} \cdot \tan(30^\circ) \approx 3,46 \text{ m}$ markiert, siehe Abbildung 4.4.

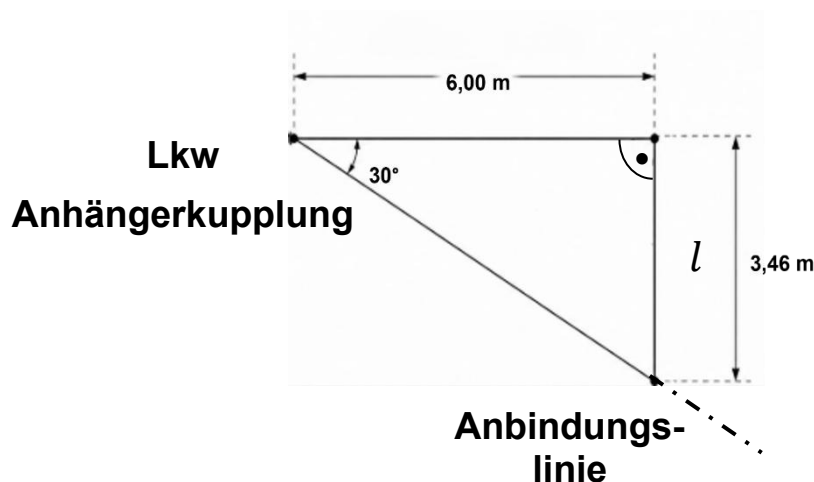


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung zur realen Ermittlung des 30° Winkels

Die Verbindungslinie zwischen dem Endpunkt der zweiten Linie und dem Ausgangspunkt der Lkw-Anhängerkupplung entspricht der 30° Zuglinie.

Positionierung des Versuchsfahrzeugs

Das Versuchsfahrzeug wurde mit seiner Längsachse exakt auf der markierten Ausrichtungslinie positioniert. Beim Fahrzeug mit Anhängerkupplung lag der Kugelmittelpunkt der Anhängerkupplung auf der Ausrichtungslinie. Beim Fahrzeug mit Abschleppöse wurde diese selbst auf der Ausrichtungslinie positioniert.

Aufbau der Zugkette

Die Zugkette wurde in der in Abschnitt 3.2.7 beschriebenen Reihenfolge aufgebaut. An der Anhängerkupplung des Lkw wurde ein Schäkel befestigt, der gleichzeitig in eine Seite der Kraftmessdose griff. An der gegenüberliegenden Seite der Kraftmessdose wurde ein zweiter Schäkel eingesetzt, der wiederum das Stahlseil aufnahm. Am gegenüberliegenden Ende des Stahlseils wurde ein dritter Schäkel eingesetzt, der an der Anhängerkupplung beziehungsweise Abschleppöse des Versuchsfahrzeugs befestigt wurde.

Nach dem Aufbau wurde das Versuchsfahrzeug bei gelöstem Bremsspanner leicht vorgerollt, um das Seil zu straffen und die Ausrichtung auf der 30° Linie zu kontrollieren. Anschließend wurde der Bremsspanner erneut eingesetzt und das Zugfahrzeug auf den Anfahrweg zurückgesetzt.

Aufstellung des Zugfahrzeugs

Der Lkw wurde seitlich versetzt aufgestellt, sodass ausgehend von der 30° Ausrichtung ein Anfahrsweg von etwa 10 m entlang der Fahrtrichtung des Lkw zur Verfügung stand. Damit war sichergestellt, dass die Zielgeschwindigkeit gemäß den Vorversuchen aus Abschnitt 4.3 vor dem Straffwerden des Seils stabil erreicht werden konnte.

4.5 Durchführung der Zugversuche

Die Durchführung der Zugversuche erfolgte im Anschluss an die Vorbereitung der Versuchsfahrzeuge nach Abschnitt 4.2, die Vorversuche zur Geschwindigkeit nach Abschnitt 4.3 und den Aufbau des Versuchsstands nach Abschnitt 4.4. Der Ablauf entsprach der in Abschnitt 3.2.7 beschriebenen Ablaufübersicht, in Abbildung 4.5 ist der reale Grundaufbau mit dem Versuchsfahrzeug der Abschleppöse abgebildet.



Abbildung 4.5: Grundaufbau des realen Zugversuchs, am Beispiel des Opel Corsa mit Abschleppöse

Reihenfolge der Versuche

Die Versuche wurden in der folgenden Reihenfolge durchgeführt:

1. Fahrzeug A mit Anhängerkupplung, Anzugsgeschwindigkeit 5 km/h
2. Fahrzeug A mit Anhängerkupplung, Anzugsgeschwindigkeit 15 km/h
3. Fahrzeug B mit Abschleppöse, Anzugsgeschwindigkeit 5 km/h
4. Fahrzeug B mit Abschleppöse, Anzugsgeschwindigkeit 15 km/h

Vor jedem Zugversuch wurden die Anbindungspunkte am Versuchsfahrzeug sowie die Verbindungselemente der Zugkette einer Sichtprüfung unterzogen. Vor und nach jedem Zugversuch wurden die Karosserie- und anschließend Achsvermessung nach Abschnitt 3.3.3 und 3.3.4 durchgeführt.

Ablauf eines einzelnen Zugversuchs

Für jeden Zugversuch erfolgte die Durchführung nach dem folgenden standardisierten Ablauf. Zunächst wurde die Zugkette vollständig aufgebaut und das Versuchsfahrzeug in Position gebracht. Der Bremsspanner wurde eingesetzt und das Getriebe in Neutralstellung gebracht sowie die Handbremse gelöst. Anschließend wurde das Zugfahrzeug durch den Fahrer mit entsprechender Einweisung von Person B zurückversetzt, um die erforderlichen 10 m Anfahrtsweg zu erhalten.

Folgend wurde die Software ASTAS auf dem Messrechner gestartet und die Aufzeichnung der Kraftmessdose aktiviert. Die Videokamera wurde durch Person C gestartet. Nach Aktivierung der Messtechnik zogen sich Person B und Person C hinter eine Betonmauer außerhalb des Sicherheitsbereichs zurück.

Person A verblieb in der Fahrerkabine des Zugfahrzeugs. Der Versuchsbeginn wurde durch ein Hupsignal des Fahrers angekündigt, sodass alle Personen sicher positioniert waren. Anschließend führte der Fahrer das gemäß Abschnitt 4.3 definierte Fahrmanöver aus.

Für die Anzugsgeschwindigkeit von 5 km/h ließ der Fahrer die Kupplung im ersten Gang ohne Gaspedalbetätigung kommen. Für die Anzugsgeschwindigkeit von 15 km/h beschleunigte der Fahrer im ersten Gang mit Vollgas. In beiden Fällen wurde die Zielgeschwindigkeit planmäßig vor dem Straffwerden des Seils erreicht.

Nach dem Straffwerden des Seils und dem daraus resultierenden Impulseintrag in das Versuchsfahrzeug wurde das Zugfahrzeug ausrollen gelassen und anschließend sanft abgebremst.

Sichtkontrolle nach jedem Zugversuch

Nach jedem Zugversuch wurde eine visuelle Kontrolle des gesamten Versuchsaufbaus durchgeführt. Geprüft wurden speziell die Anbindungspunkte am Versuchsfahrzeug, die Kraftmessdose, die drei Schäkel, das Stahlseil sowie die Anhängerkupplung des Lkw. Die Befunde wurden fotografisch dokumentiert.

4.6 Ergebnisdarstellung

Im folgenden Kapitel liegt der Fokus auf der Darstellung der erfassten Ergebnisse der vier Zugversuche. Der Inhalt umfasst die Kraft-Zeit-Verläufe, die Ergebnisse der Karosserie- und Achsvermessung sowie die dokumentierten Bauteilschäden.

4.6.1 Zustand der Krafteinleitungspunkte

Der Zustand des jeweiligen Krafteinleitungspunkts wurde vor den Zugversuchen sowie nach jeder Belastungsstufe im Rahmen der Sichtkontrolle fotografisch festgehalten. Die folgende Dokumentation zeigt für beide Fahrzeuge die Entwicklung über die drei Zustände vor dem ersten Zugversuch, nach der Stufe mit 5 km/h und nach der Stufe mit 15 km/h.

Fahrzeug mit Anhängerkupplung

Abbildung 4.6 zeigt die Anhängerkupplung im Ausgangszustand. Kugel, Hals und Halterung weisen keine Auffälligkeiten auf:



Abbildung 4.6: Anhängerkupplung vor den Zugversuchen

Die folgende Abbildung 4.7 zeigt die Anhängerkupplung nach dem ersten Zugversuch mit 5 km/h. Auch nach dieser Belastungsstufe ist keine sichtbare Veränderung erkennbar. Die Halterung ist optisch unverformt.



Abbildung 4.7: Anhängerkupplung nach dem 5 km/h Zugversuch

Die folgende Abbildung 4.8 zeigt die Anhängerkupplung nach dem zweiten Zugversuch mit 15 km/h. Die Halterung ist deutlich verzogen und weist eine sichtbare Krümmung auf. Ein Anriss oder Bruch liegt nicht vor, die Verformung ist plastisch.



Abbildung 4.8: Anhängerkupplung nach dem 15 km/h Zugversuch

Fahrzeug mit Abschleppöse

Abbildung 4.9 zeigt die Abschleppöse im Ausgangszustand ohne erkennbare Auffälligkeiten.



Abbildung 4.9: Abschleppöse vor den Zugversuchen

In Abbildung 4.10 ist die Abschleppöse nach dem ersten Zugversuch zu sehen. Die Öse ist bereits leicht in Zugrichtung gelängt, jedoch noch vollständig mit der Karosserie verbunden.



Abbildung 4.10: Abschleppöse nach dem 5 km/h Zugversuch

In der folgenden Abbildung 4.11 ist der Zustand nach dem zweiten Zugversuch zu sehen. Die Abschleppöse ist an den Schweißstellen vollständig aus der Karosserie gerissen. Da sich das Bauteil vor dem Versagen bereits sichtbar plastisch verformt hatte, wirkt der Schaden wie ein Gewaltbruch mit vorangegangener plastischer Verformung. Das abgerissene Bauteil ist auf der linken Seite sowie die zugehörige Ausrissstelle rechts in der Abbildung zu sehen.



Abbildung 4.11: Abgerissene Abschleppöse & Stelle an der Karosserie

Die Bilddokumentation zeigt bei beiden Fahrzeugen einen mit der Belastungsstufe fortschreitenden Zustand des Krafteinleitungspunkts. Am Fahrzeug mit Anhängerkupplung bleibt das Bauteil nach der Stufe mit 5 km/h unverändert und weist erst nach der Stufe mit 15 km/h eine bleibende Verformung auf. Am Fahrzeug mit Abschleppöse ist bereits nach der 5 km/h Stufe eine Längung erkennbar, die sich nach der Stufe mit 15 km/h zum vollständigen Ausriss entwickelt.

4.6.2 Ergebnisse der Kraftmessung

Die mit der Kraftmessdose erfassten Kraft-Zeit-Verläufe der Zugversuche sind in den Abbildungen 4.12 bis 4.15 dargestellt. Tabelle 4.2 fasst die Spitzenkräfte zusammen.

Tabelle 4.2: Spitzenkräfte der durchgeführten Zugversuche

Versuch	Fahrzeug	Krafteinleitungspunkt	Geschwindigkeit	$F_{\max}$
V1.1	Fahrzeug A	Anhängerkupplung	5 km/h	8,2 kN
V1.2	Fahrzeug A	Anhängerkupplung	15 km/h	18,5 kN

V2.1	Corsa B	Abschleppöse	5 km/h	6,7 kN
V2.2	Corsa B	Abschleppöse	15 km/h	5,6 kN

Alle Kraftverläufe wurden mit der nach OIML R60 in Genauigkeitsklasse C2 kalibrierten Kraftmessdose AEP T20 erfasst. Die zugehörige Fehlergrenze liegt deutlich unterhalb der Kraftschwankungen durch das mitgezogene Fahrzeug. Auf eine gesonderte Darstellung von Toleranzlinien in den Diagrammen wird daher verzichtet.

Der gemessene Kraft-Zeit-Verlauf gibt die Gesamtkraft im Lastpfad wieder. Er lässt sich nicht eindeutig in die Anteile aus Seildehnung, Verformung des Anbindungsbauteils und Beanspruchung der Karosserie zerlegen, da diese hintereinander im selben Kraftfluss liegen. Die folgende Zuordnung von Kurvenabschnitten ist als plausible Deutung zu werten, nicht als unmittelbare Messung.

Kraft-Zeit-Verlauf, Corsa A (AHK), 5 km/h

Das Diagramm des Kraft-Zeit-Verlaufs des ersten Zugversuchs mit 5 km/h an der Anhängerkupplung wird durch Abbildung 4.12 dargestellt.

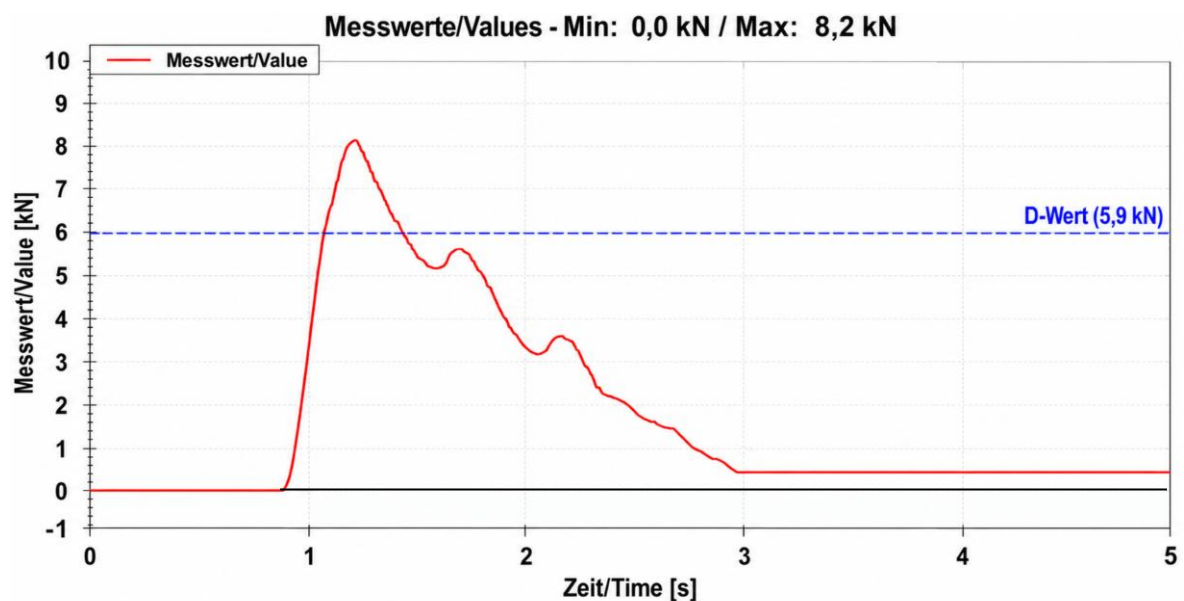


Abbildung 4.12: Kraft-Zeit-Verlauf, Zugversuch 5 km/h an der Anhängerkupplung

Die Kraft steigt beim Straffwerden des Seils sprunghaft auf 8,2 kN an und klingt, über mehrere kleinere Ausschläge, von etwa 5,5 kN und nochmals 3,5 kN ab. Diese abnehmenden Ausschläge entstehen dadurch, dass das Versuchsfahrzeug nach Überschreiten der Haftreibung in Zugrichtung mitgezogen wurde und die dabei entstehenden Schwankungen der Fahrzeugbewegung sich auf die Seilkraft

übertragen. Der Graph fällt danach nicht vollständig auf 0 kN zurück, sondern verbleibt auf einem Restwert von rund 0,5 kN, da das Seil durch das weiterfahrende Zugfahrzeug leicht gespannt blieb. Der vergleichsweise allmähliche Kraftanstieg deutet auf eine überwiegend elastische Beanspruchung des Systems aus Seil und Struktur hin. Eine bleibende Verformung ist bei diesem Zugversuch nicht anzunehmen.

Kraft-Zeit-Verlauf, Corsa A (AHK), 15 km/h

In Abbildung 4.13 für den Zugversuch bei 15 km/h an der Anhängerkupplung ist der entsprechende Kraft-Zeit-Verlauf deutlich stärker ausgeprägt.

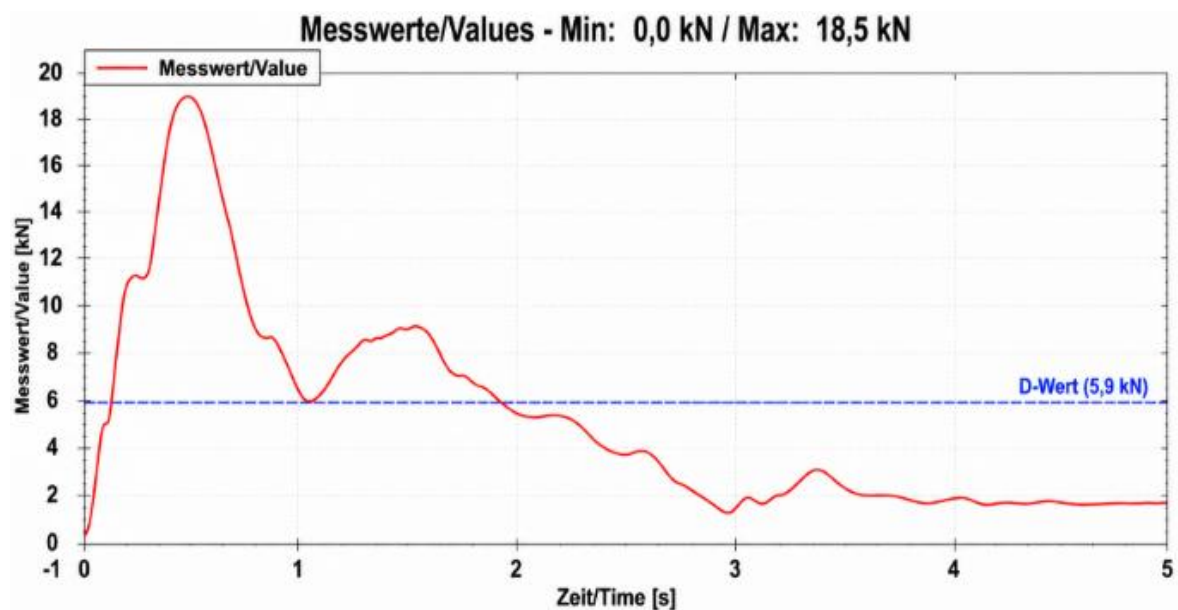


Abbildung 4.13: Kraft-Zeit-Verlauf, Zugversuch 15 km/h an der Anhängerkupplung

Die Kraft steigt auf 18,5 kN an und fällt über einen zweiten, deutlich ausgeprägten Ausschlag von etwa 9 kN auf einen Restwert von etwa 2 kN ab, anders als beim ersten Zugversuch mit 5 km/h. Der Verlauf weist nach der ersten Kraftspitze einen gleichmäßigeren, weniger schwankenden Abfall auf als bei dem Zugversuch mit 5 km/h.

Denkbar ist, dass die Schulter im Kraftanstieg bei etwa 10 kN den Beginn der plastischen Verformung der Anhängerkupplung kennzeichnet, bevor die Kraft bis zur Spitze von 18,5 kN weiter anstieg. Die bleibende Verformung ist im Bereich der Kraftspitze zu erwarten, da dort die höchste Beanspruchung wirkte. Ob dabei zuerst die Anhängerkupplung nachgab oder die Anbindung an der Karosseriestruktur, lässt sich aus dem Kraftsignal allein nicht bestimmen, da beide im selben Lastpfad liegen.

Kraft-Zeit-Verlauf, Corsa B (AÖ), 5 km/h

Der Kraft-Zeit-Verlauf des ersten Zugversuchs mit 5 km/h an der Abschleppöse ist in Abbildung 4.14 dargestellt.

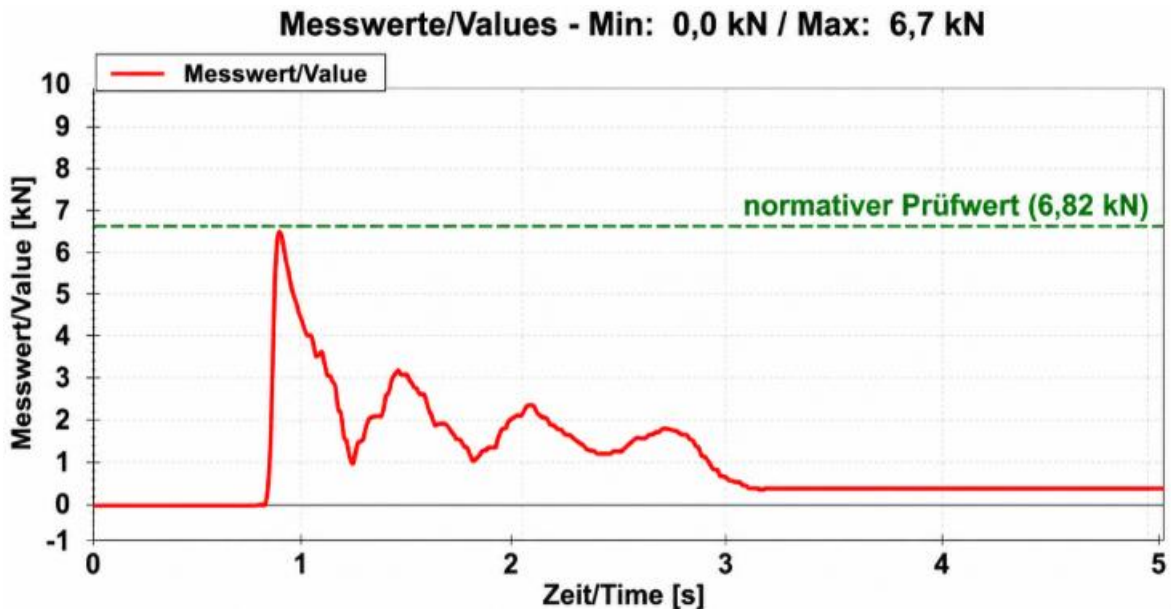


Abbildung 4.14: Kraft-Zeit-Verlauf, Zugversuch 5 km/h an der Abschleppöse

Die Kraft steigt beim Straffwerden des Seils auf 6,7 kN an und fällt zunächst auf 1 kN ab. Danach pendelt der Graph mehrfach zwischen etwa 1 kN und abnehmenden Ausschlägen von 3 kN, 2,5 kN und 2 kN. Dieses Pendeln entsteht vermutlich wie bei dem Zugversuch an der Anhängerkupplung dadurch, dass das mitgezogene Versuchsfahrzeug Schwankungen in das Seil einträgt. Die Spitzenkraft liegt dabei unterhalb der in Abschnitt 3.2.6 abgeschätzten Haftreibungsgrenze. Der tatsächliche Haftreibungskoeffizient oder die Bremswirkung des Fahrzeugs ist damit offenbar niedriger als angenommen. Anschließend fällt er auf einen Endwert von rund 0,5 kN ab, da das Seil wie beim Zugversuch mit 5 km/h an der Anhängerkupplung gespannt blieb. Der deutlich steilere Kraftanstieg könnte auf einen weniger nachgiebigen Lastpfad an der Abschleppöse hindeuten, was einen schnelleren Kraftaufbau, jedoch keine höhere Belastbarkeit bedeutet.

Kraft-Zeit-Verlauf, Corsa B (AÖ), 15 km/h

Der Kraft-Zeit-Verlauf des zweiten Zugversuchs mit 15 km/h an der Abschleppöse ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Die Kraft steigt beim Straffwerden des Seils auf 5,6 kN an. Der maximale Ausschlag fällt dabei deutlich geringer aus als bei den übrigen drei Zugversuchen, da die Abschleppöse bei diesem Zugversuch aus der

Karosserie riss und die Krafteinleitung dadurch abrupt endete. Der Graph fällt danach kurzzeitig auf 0 kN ab und weist zwei weitere kleine Ausschläge auf, die durch das Zurückschnellen der gerissenen Öse in Richtung des Lkw entstanden, bevor er schlussendlich bei 0 kN endet. Ein bleibender Restwert tritt hier nicht auf, da nach dem Abriss keine Verbindung zwischen Versuchsfahrzeug und Zugfahrzeug mehr bestand, über die das Seil gespannt bleiben konnte.

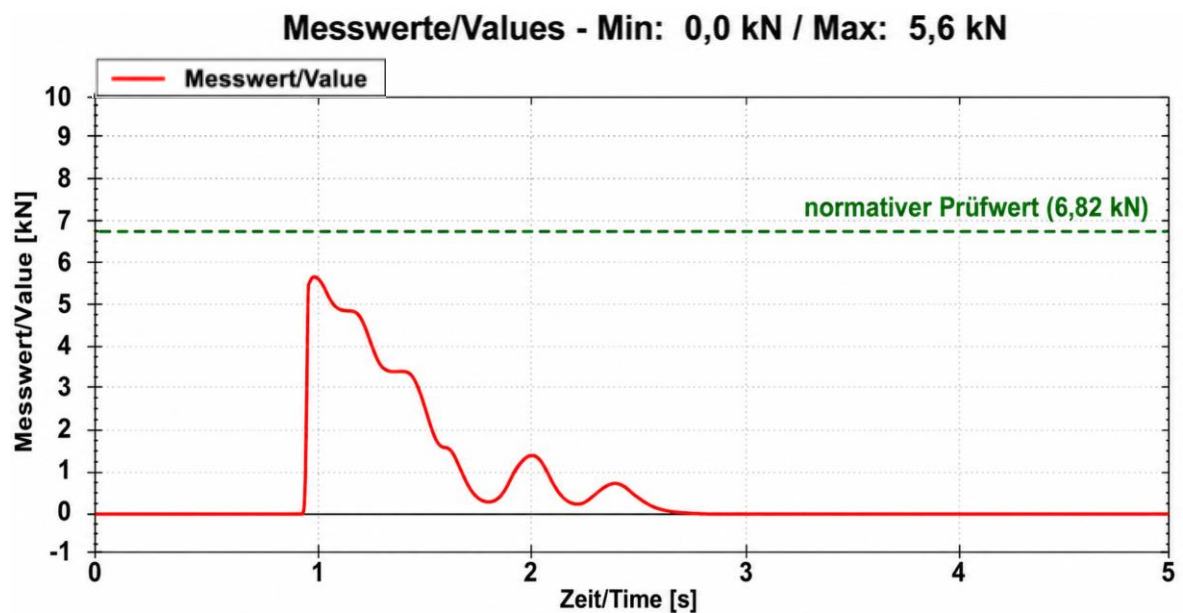


Abbildung 4.15: Kraft-Zeit-Verlauf, Zugversuch 15 km/h an der Abschleppöse

4.6.3 Ergebnisse der Karosserievermessung

Die vollständigen Messprotokolle der Karosserievermessung mit allen zehn Bezugspunkten je Fahrzeugseite sind in Anhang D enthalten. Im Folgenden wird für jeden Bezugspunkt, wie er in Kapitel 3.3.3 definiert wurde, die Veränderung zwischen der Vorvermessung und den beiden Belastungsstufen in mm dargestellt. Als Hauptmaß dient die Direktlänge vom Nullpunkt zum jeweiligen Bezugspunkt.

Tabelle 4.3 zeigt die Differenz der Direktlänge je Bezugspunkt für Fahrzeug A mit der Anhängerkupplung, getrennt nach Fahrer- und Beifahrerseite.

Tabelle 4.3: Karosserievermessung, Differenz der Direktlänge Nullpunkt zum jeweiligen Bezugspunkt für Fahrzeug A mit AHK in mm

Punkt	Fahrerseite Vor -> 5 km/h	Fahrerseite Vor -> 15 km/h	Beifahrer- seite Vor -> 5 km/h	Beifahrer- seite Vor -> 15 km/h
1 Stoßstangen- träger	+2	0	+2	+1

2 Achsaufnahme vorne	-3	+2	+2	+1
3 Karosseriestruktur vorn	-1	+2	+3	+1
4 Karosseriestruktur Richtung Schweller	0	+1	-2	0
5 Karosseriestruktur mittig	0	+1	+1	-1
6 Längsträger hinten	+1	+1	+3	+3
7 Achsaufnahme hinten	+2	+3	+1	+1
8 Aufnahmepunkt Anhängerkuppelung	+2	-1	-2	+1
9 Aufnahmepunkt Anhängerkuppelung	+1	0	+2	+3
10 Befestigung Anhängerkuppelung	+2	+12	+1	+9

Der überwiegende Teil der Bezugspunkte zeigt Veränderungen der Direktlänge von 0 bis 3 mm und liegt damit unterhalb der Signifikanzschwelle. An Punkt 10 tritt bei dem 15 km/h Test der größte Wert auf, mit +12 mm auf der Fahrerseite und +9 mm auf der Beifahrerseite. Nach dem 5 km/h Test liegt derselbe Punkt mit +2 mm und +1 mm im Bereich der übrigen Punkte und Toleranzen.

Tabelle 4.4 zeigt im direkten Vergleich die Veränderung der Direktlänge je Bezugspunkt zum Nullpunkt für Fahrzeug B mit der Abschleppöse.

Tabelle 4.4: Karosserievermessung, Differenz der Direktlänge Nullpunkt zum jeweiligen Bezugspunkt für Fahrzeug B mit AÖ in mm

Punkt	Fahrerseite Vor -> 5 km/h	Fahrerseite Vor -> 15 km/h	Beifahrer- seite Vor -> 5 km/h	Beifahrer- seite Vor -> 15 km/h
1 Stoßstangenträger	-1	-2	+1	+1

2 Achsaufnahme vorne	0	0	+1	+2
3 Karosseriestruktur vorn	+2	0	+1	+1
4 Karosseriestruktur Richtung Schweller	+2	+1	-1	0
5 Karosseriestruktur mittig	-2	-1	-2	-1
6 Längsträger hinten	+4	+4	0	+1
7 Achsaufnahme hinten	0	+1	-1	-1
8 Aufnahmepunkt Anhängerkupplung	+2	+5	+5	+4
9 Aufnahmepunkt Anhängerkupplung	+2	+2	+2	0
10 Abschleppöse	-	-	+10	-

Die Bezugspunkte 1 bis 9 zeigen Beträge bis 5 mm. Oberhalb der Signifikanzschwelle liegen die Längsträger hinten mit +4 mm sowie Punkt 8 mit +5 mm. **Punkt 10** ist der Messpunkt der Abschleppöse selbst, welche auf der Beifahrerseite sitzt. An jenem Punkt konnte eine Differenz zwischen Vorvermessung und 5 km/h von +10 mm erfasst werden. Nach der 15 km/h Stufe war der Punkt wegen dem Abriss der Abschleppöse nicht mehr messbar.

4.6.4 Ergebnisse der Achsvermessung

Die vollständigen Achsvermessungsprotokolle beider Fahrzeuge mit allen Istwerten und Toleranzbereichen sind in Anhang E enthalten. Im Folgenden wird für die relevanten Achseinstellwerte die Veränderung zwischen Vorvermessung und den beiden Belastungsstufen dargestellt. Der Schwerpunkt liegt auf der Hinterachse, da diese im Lastpfad des Zugvorgangs liegt. Auffällige Veränderungen an der Vorderachse werden ergänzend aufgeführt. Als Signifikanzschwelle dient die Anzeigegenauigkeit des Messsystems von $\pm 0,1^\circ$. Veränderungen darunter werden nicht als versuchsbedingt gewertet.

Tabelle 4.5 zeigt die Veränderung der Hinterachswerte beider Fahrzeuge gegenüber der jeweiligen Vorvermessung.

Tabelle 4.5: Achsvermessung, Veränderung der Hinterachswerte gegenüber Vorvermessungen in Winkelminuten

Hinterachse	AHK Vor -> 5 km/h	AHK Vor -> 15 km/h	AÖ Vor -> 5 km/h	AÖ Vor -> 15 km/h
Sturz links	0'	+2'	+2'	+1'
Sturz rechts	-3'	-6'	-3'	+1'
Einzelspur links	0'	+6'	0'	+4'
Einzelspur rechts	0'	-2'	-1'	-7'
Gesamtspur	+1'	+5'	-2'	-3'
Radversatz	0'	-1'	+2'	+3'

Bei dem Opel Corsa mit Anhängerkupplung nimmt der Sturz am rechten Hinterrad mit steigender Belastungsstufe zu, um -3' nach der 5 km/h Stufe und um -6' nach der 15 km/h Stufe. Der Sturz am linken Hinterrad bleibt mit maximal +2' nahezu unverändert. Die Gesamtspur der Hinterachse steigt von der Vorvermessung über die 5 km/h Belastung bis zur 15 km/h Belastung auf +5' an. Alle Werte verbleiben innerhalb der Herstellertoleranz.

Der Opel Corsa mit Abschleppöse zeigt geringere Veränderungen an der Hinterachse. Der Sturz schwankt auf beiden Seiten nur im Bereich von 1' bis 3' ohne durchgehende Richtung. Der größte Einzelwert tritt an der Einzelspur des rechten Hinterrads auf, die bis zur 15 km/h Stufe um -7' wandert und damit als einzige Hinterachsgröße sowohl die Signifikanzschwelle als auch die Toleranz überschreitet. Die Gesamtspur bleibt mit -3' innerhalb der Toleranz.

Tabelle 4.6 zeigt die Veränderung ausgewählter Vorderachswerte gegenüber der jeweiligen Vorvermessung.

Tabelle 4.6: Achsvermessung, Veränderung der Vorderachswerte gegenüber Vorvermessungen in Winkelminuten

Vorderachse	AHK Vor -> 5 km/h	AHK Vor -> 15 km/h	AÖ Vor -> 5 km/h	AÖ Vor -> 15 km/h
Sturz links	0'	+7'	-3'	+13'
Sturz rechts	-6'	-7'	-6'	-7'
Einzelspur links	+10'	+2'	-2'	+2'
Einzelspur rechts	-2'	-1'	+6'	+1'
Gesamtspur	+7'	+1'	+4'	+3'
Nachlauf links	-13'	+6'	-6'	-3'
Nachlauf rechts	-5'	+7'	-48'	-44'
Radversatz	-1'	0'	+1'	+9'

An der Vorderachse liegen Einzelspurwerte bei beiden Fahrzeugen bereits in der Vorvermessung außerhalb der Herstellertoleranz. Sie sind damit ein vorbestehender Zustand und keine Folge des Zugvorgangs. Der Nachlauf am linken Vorderrad zeigt beim Fahrzeug mit Anhängerkupplung einen Vorzeichenwechsel zwischen den Belastungsstufen, von -13' nach der 5 km/h Stufe zu +6' nach der 15 km/h Stufe. Am rechten Vorderrad des Fahrzeugs mit Abschleppöse treten mit -48' und -44' die größten Einzelwerte der gesamten Messreihe auf, die jedoch innerhalb der Herstellertoleranz bleiben. Der Sturz am rechten Vorderrad verändert sich bei beiden Fahrzeugen um -6' bis -7' gegenüber der Vorvermessung.

Nachlauf und Spreizung sind Kenngrößen der gelenkten Vorderachse und liegen außerhalb des Lastpfads des Zugvorgangs. Der Nachlauf wird ergänzend durch die größeren Differenzen zwischen Fahrzeug mit Anhängerkupplung und Abschleppöse in der Tabelle mit aufgeführt. Die Spreizung ist im Messprotokoll nachzulesen. [Anhang E]

5 Bewertung der Versuchsergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die in Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse genauer in den wissenschaftlichen Kontext eingeordnet. Zunächst werden die drei Hypothesen anhand der Messergebnisse geprüft. Anschließend werden die beiden Krafteinleitungspunkte verglichen und die Ergebnisse den Erkenntnissen aus dem Stand der Technik gegenübergestellt. Aus den Ergebnissen werden entsprechende Handlungsempfehlungen für die Prüf- und Begutachtungspraxis abgeleitet. Das Kapitel schließt mit einer kritischen Reflexion der Methodik und der Grenzen der Untersuchung ab.

5.1 Prüfung der Hypothesen

Die drei in Abschnitt 1.2 aufgestellten Hypothesen werden nachfolgend anhand der in Kapitel 4 dargestellten Messergebnisse geprüft. Für jede Hypothese wird das Bewertungskriterium nach Abschnitt 3.4.3 herangezogen, den Messergebnissen gegenübergestellt und das Ergebnis eingeordnet.

Hypothese 1

Hypothese 1 postuliert, dass beim dynamischen Abschleppen festgefahrener Fahrzeuge über die Abschleppöse oder die Anhängerkupplung impulsartige Zugkräfte auftreten, welche die normativ geprüften statischen Mindestlasten deutlich überschreiten. Das Bewertungskriterium gilt als erfüllt, wenn die gemessene Spitzenkraft den normativen Referenzwert von 6,82 kN übersteigt. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die normative Prüfkraft horizontal in Fahrzeuginnenrichtung aufgebracht wird, während der Versuch unter einem Schrägzug von 30° erfolgte. [8]

An der Anhängerkupplung wurde eine Spitzenkraft von 8,2 kN bei der Stufe mit 5 km/h und von 18,5 kN bei der Stufe mit 15 km/h gemessen. Beide Werte überschreiten den Referenzwert, bei 5 km/h um den Faktor 1,2 und bei 15 km/h um den Faktor 2,7. Der Anstieg der Spitzenkraft bei zunehmender Anzugsgeschwindigkeit bestätigt zugleich die angenommene Zunahme mit der Geschwindigkeit. Für die Anhängerkupplung ist H1 damit bestätigt. Die gemessenen Kräfte überschreiten somit auch den bauteilbezogenen D-Wert der Anhängerkupplung von 5,9 kN.

An der Abschleppöse liegen die gemessenen Spitzenkräfte mit 6,7 kN bei 5 km/h und 5,6 kN bei 15 km/h unterhalb des Referenzwerts, wobei der Wert bei 5 km/h mit

einem Faktor von 0,98 nur knapp darunter liegt. Nach dem reinen Zahlenkriterium wäre H1 an der Abschleppöse nicht bestätigt. Diese Bewertung greift jedoch zu kurz, da die Öse während der Stufe mit 15 km/h aus der Karosserie riss. Der gemessene Wert von 5,6 kN kennzeichnet nicht die maximal übertragbare Kraft, sondern das Kraftniveau zum Zeitpunkt des Bauteilversagens. Bemerkenswert ist, dass die Öse unterhalb der zuvor bereits ertragenen Spitzenkraft von 6,7 kN versagte. Ursache ist die in der ersten Belastungsstufe entstandene Vorschädigung, die sich sowohl in der sichtbaren Längung als auch im Messwert von 10 mm an Punkt 10 zeigt. Der zweite Zugvorgang traf damit ein bereits geschwächtes Bauteil. Abbildung 5.1 zeigt einen grafischen Vergleich der gemessenen Spitzenkräfte.

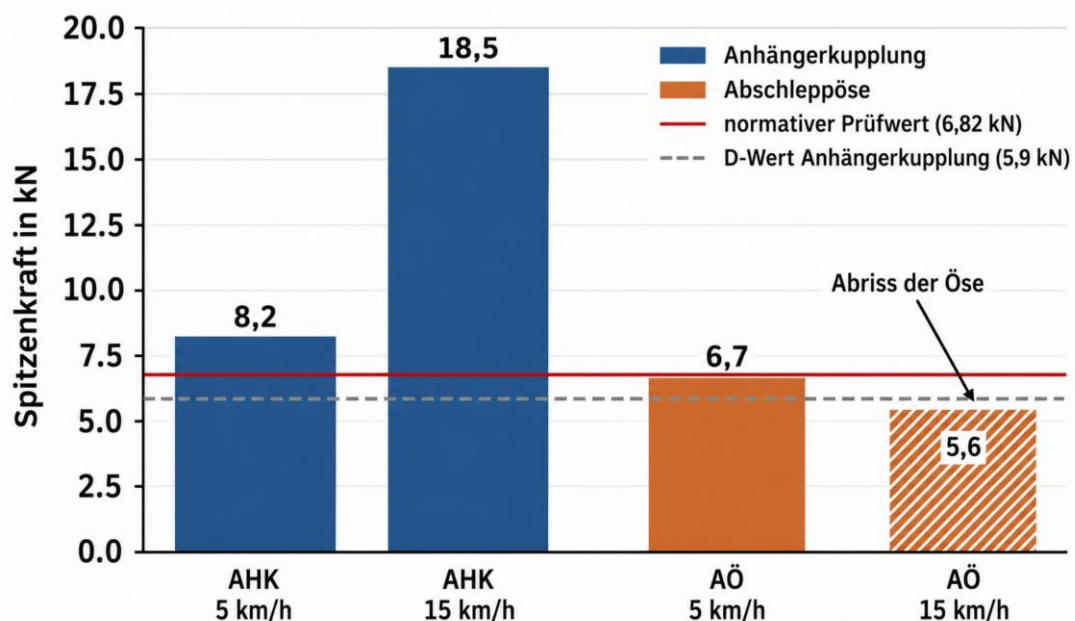


Abbildung 5.1: Grafische Darstellung der gemessenen Kräfte im Vergleich

Ein Anhaltspunkt für die zu erwartende Größenordnung ergibt sich aus dem Vergleich mit der Anhängerkupplung. Beide Versuchsfahrzeuge wurden auf identische Masse abgeglichen und unter gleichen Randbedingungen gezogen. Bei 5 km/h lag die Spitzenkraft der Öse bereits in derselben Größenordnung wie an der Anhängerkupplung, sodass bei intaktem Bauteil auch in der zweiten Stufe ein Vielfaches des Referenzwerts zu erwarten gewesen wäre. Für die Anhängerkupplung ist H1 eindeutig bestätigt. Für die Abschleppöse ist die überschreitende Kraft nicht direkt belegt, das Versagen unterhalb des Referenzwerts nach vorangegangener Schädigung stützt die Aussage von H1 jedoch zusätzlich. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit ließ sich an der Öse jedoch nicht prüfen, da das Bauteil in der zweiten Stufe versagte, bevor sich die zugehörige Spitzenkraft aufbauen konnte.

Hypothese H2

Die zweite Hypothese nimmt an, dass wiederholte Bergungsversuche zu messbaren, bleibenden Verformungen an der Karosseriestruktur, speziell im Bereich der Krafteinleitung führen. Das Kriterium gilt als erfüllt, wenn die Veränderung der Direktlänge eines Bezugspunkts im Lastpfad die Signifikanzschwelle übersteigt.

Zur Festlegung dieser Schwelle ist zwischen der Anzeigegenauigkeit und der tatsächlichen Wiederholstreuung zu unterscheiden. Das Car-O-Tronic System weist nach Herstellerangabe eine Anzeigegenauigkeit von $\pm 0,5$ mm auf. Dieser Wert gilt für eine einzelne Messung unter idealen Bedingungen. Das Messsystem wurde zwischen den Belastungsstufen jedoch vollständig abgebaut und erneut aufgebaut, wobei das Fahrzeug jeweils neu aufgenommen wurde. Dadurch ist die Streuung zwischen den Messungen größer als die reine Anzeigegenauigkeit. Sie wurde aus den Lageänderungen der Punkte außerhalb des Lastpfads abgeschätzt, die keine lastinduzierte Verformung aufweisen sollten. Über beide Fahrzeuge ergibt sich für sie eine grundlegende Standardabweichung von rund 1,6 mm. Als Signifikanzschwelle wird daraus das Zweifache und damit ein Wert von rund 3 mm abgeleitet.

Am Fahrzeug mit Anhängerkupplung überschreitet allein Punkt 10 die Signifikanzschwelle. Er zeigt nach der Stufe mit 15 km/h eine Zunahme der Direktlänge von 12 mm auf der Fahrerseite und 9 mm auf der Beifahrerseite. Nach der Stufe mit 5 km/h lag der Punkt mit 1 bis 2 mm noch im Streubereich. Punkt 10 liegt im unmittelbaren Lastpfad der Krafteinleitung. Alle übrigen Bezugspunkte dieses Fahrzeugs liegen im definierten Streubereich.

Für das Fahrzeug mit Anhängerkupplung ist H2 damit bestätigt. Im Lastpfad ist eine bleibende Verformung innerhalb der Karosserie nachweisbar, die durch die Sichtprüfung allein nicht erkennbar war. Am Fahrzeug mit Abschleppöse überschreiten Bezugspunkte im Lastpfad die Signifikanzschwelle, H2 ist somit auch für dieses bestätigt. Die Abschleppöse wirkte tendenziell als schwächstes Glied, verformte sich bei 5 km/h bereits stark und riss bei 15 km/h vollständig aus. Die umliegende Struktur blieb vergleichsweise unbelasteter. Statt einer so starken Verformung der Karosserie wie mit der Anhängerkupplung liegt eher ein vollständiges Versagen des Krafteinleitungspunkts vor.

Hypothese H3

Hypothese H3 besagt, dass die Strukturveränderungen zu messbaren Abweichungen der Fahrwerksparemeter führen. Betroffen sind insbesondere Spur und Sturz der Hinterachse. Das Kriterium gilt als erfüllt, wenn ein Achseinstellwert nach dem Versuch die Herstellertoleranz überschreitet.

An der Hinterachse bleiben am Fahrzeug mit Anhängerkupplung Sturz, Einzelspur und Gesamtspar im zulässigen Bereich. Am Fahrzeug mit Abschleppöse verlässt die Einzelspur hinten rechts nach der 15 km/h Stufe die Toleranz, nachdem sie in der Vorvermessung innerhalb lag und die Veränderung von -7' übersteigt die Signifikanzschwelle. H3 ist damit für das Fahrzeug mit Abschleppöse theoretisch bestätigt, jedoch nur unter Vorbehalt einer minimalen Überschreitung.

Die zweite Bewertungsstufe nach Abschnitt 3.4.2 bewertet die Veränderung gegenüber dem Vorzustand unabhängig von der Toleranzgrenze. Sie zeigt einen erkennbaren Unterschied zwischen den beiden Fahrzeugen, siehe Abbildung 5.2.

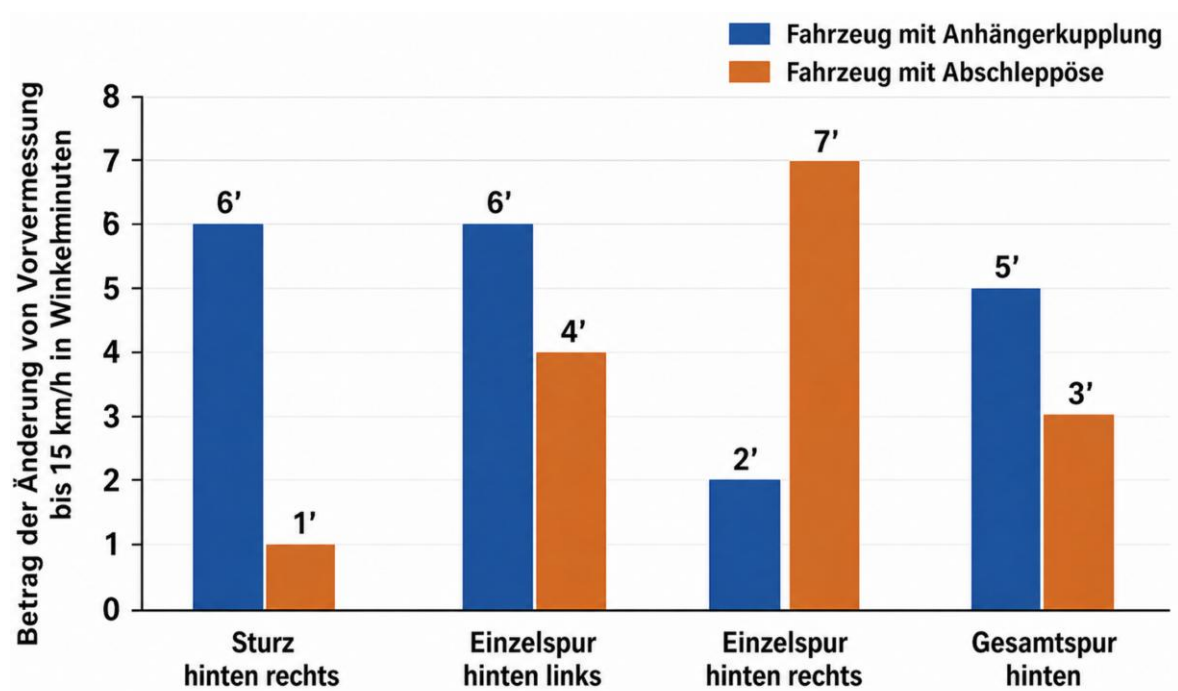


Abbildung 5.2: Gesonderte Betrachtung ausgewählter Kenngrößen nach Achsvermessung

Am Fahrzeug mit Anhängerkupplung veränderten sich mehrere Achsparameter gerichtet und in vergleichbarer Größenordnung. Der Sturz am rechten Hinterrad nahm über die Belastungsstufen kontinuierlich um sechs Winkelminuten zu, die Einzelspur am linken Hinterrad um sechs Winkelminuten und die Gesamtspar der

Hinterachse um fünf Winkelminuten. Am Fahrzeug mit Abschleppöse veränderte sich im Wesentlichen nur die Einzelspur am rechten Hinterrad, was auch die Seite der Abschleppöse ist. Diese Änderung fällt zeitlich mit dem Ausriss der Öse zusammen und ist die einzige Toleranzüberschreitung der gesamten Hinterachsmessung.

Am Fahrzeug mit Anhängerkupplung trat somit die breitere und systematischere Veränderung der Achsgeometrie auf. Dieser Befund deckt sich mit der in Abschnitt 5.2 dargestellten Wirkungsweise. Da die Anhängerkupplung der Belastung besser standhielt, wurde die Zugkraft stärker in die Fahrzeugstruktur eingeleitet und verteilte sich auf mehrere Anlenkpunkte der Hinterachse.

Für die Einordnung dieser Werte ist die Messunsicherheit der Achsvermessung entscheidend. Eine einmalige Abweichung könnte auf die Streuung der Messung zurückgehen. Die gleichgerichtete geringfügigere Veränderung mehrerer Parameter am Fahrzeug mit Anhängerkupplung ist dadurch jedoch nicht bestätigt, da eine reine Messungenauigkeit zufällig in beide Richtungen streuen würde.

Diese Veränderungen bleiben bei beiden Fahrzeugen nahe der Herstellertoleranzen und begründen für sich genommen keine verkehrssicherheitsrelevante Abweichung. Sie zeigen jedoch eine messbare geometrische Reaktion, die mit der Belastungsstufe zunahm. Besonders der ansteigende Sturz am rechten Hinterrad deutet auf eine beginnende Strukturveränderung an der hinteren Fahrwerksanbindung hin.

Zusammenfassend ist H3 streng genommen nur marginal bestätigt, da bei keinem Fahrzeug eine signifikante Überschreitung der Herstellertoleranzen nachweisbar ist. Die Auswertung zeigt jedoch eine mit der Belastungsstufe zunehmende geometrische Veränderung, besonders bei dem Fahrzeug mit Anhängerkupplung. Diese ist als beginnende sicherheitsrelevante Reaktion einzuordnen.

Zusammenhang zwischen Struktur- und Geometrieänderung

Ein Zusammenhang ergibt sich aus der gemeinsamen Betrachtung von Karosserie- und Achsvermessung. Die Anlenkpunkte der Hinterachse sind an der tragenden Karosseriestruktur befestigt. Eine bleibende Verformung dieser Struktur führt daher zu einer Lageänderung der Anlenkpunkte und damit zu einer veränderten Achsgeometrie. Beim Fahrzeug mit Anhängerkupplung trat beides gemeinsam auf, die bleibende Verformung im Lastpfad nach Abschnitt 5.1 und die gerichtete Änderung der Achswerte an der Hinterachse. Die Karosserievermessung bildet damit die Ursache

ab, die Achsvermessung die daraus folgende Auswirkung. Beide Befunde stützen sich gegenseitig und deuten auf eine gemeinsame Ursache in der bleibenden Strukturverformung hin. Eine exakte räumliche Zuordnung der einzelnen Messpunkte zu den Achswerten ist daraus jedoch nicht ableitbar.

5.2 Vergleich der Krafteinleitungspunkte

Die beiden untersuchten Krafteinleitungspunkte verhielten sich unter den Belastungen grundlegend verschieden. Der Vergleich erfolgt anhand des erreichten Kraftniveaus, der Versagensart und der Reaktion der dahinterliegenden Struktur, zusammenfassend durch Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1: Zusammenfassender Vergleich der Krafteinleitungspunkte

Merkmal	Anhängerkupplung	Abschleppöse
Auslegung	dauerhafter Anhängerbetrieb, D-Wert 5,9 kN	statischer Zug, halbe zulässige Gesamtmasse, ~6,82 kN
Kraftniveau bei 5 km/h	8,2 kN	6,7 kN
Kraftniveau bei 15 km/h	18,5 kN	5,6 kN (bei Abriss)
Versagensart	bleibende Verformung, kein Bruch	vollständiger Ausriss aus Karosserie
Strukturreaktion	Kraft geht stark in tragende Struktur über, Verformung an Befestigung der AHK	Bauteil versagt als schwächstes Glied, geringe Verformung der Struktur

Beim Kraftniveau zeigt sich der deutlichste Unterschied. Der niedrige Wert der Öse bei 15 km/h ergibt sich nicht aus einer geringeren Belastung, sondern aus ihrem Versagen vor Erreichen einer höheren Kraft. Die Anhängerkupplung hingegen nahm die steigende Belastung auf.

Auch die Versagensart unterscheidet sich klar. Die Anhängerkupplung verbog sich bei 15 km/h bleibend, blieb aber als plastisch verformte Verbindung ohne Bruch erhalten. Die Abschleppöse dagegen riss nach vorheriger plastischer Verformung aus der Karosserie heraus.

Aus diesen beiden Versagensarten folgt eine unterschiedliche Reaktion der dahinterliegenden Struktur. An der Anhängerkupplung ging die Kraft stärker in die Fahrzeugstruktur über und erzeugte dort die in Abschnitt 5.1 beschriebene deutliche Verformung an Punkt 10 im Lastpfad. An der Abschleppöse versagte das Bauteil selbst als schwächstes Glied, bevor die Kraft nennenswert in die Karosserie übergang, so dass die umliegende Struktur sich betragsmäßig geringer verformte, siehe Abbildung 5.3. Ein Indiz dafür liefert die Form des Kraftanstiegs, der an der Öse bei 5 km/h deutlich steiler verlief. Dies deutet auf einen steiferen, weniger nachgiebigen Lastpfad hin, bei dem das Bauteil früher seine Belastungsgrenze erreicht. Diese Deutung beruht jedoch auf einer einzelnen Messung und ist daher eher als mögliches Indiz zu verstehen.

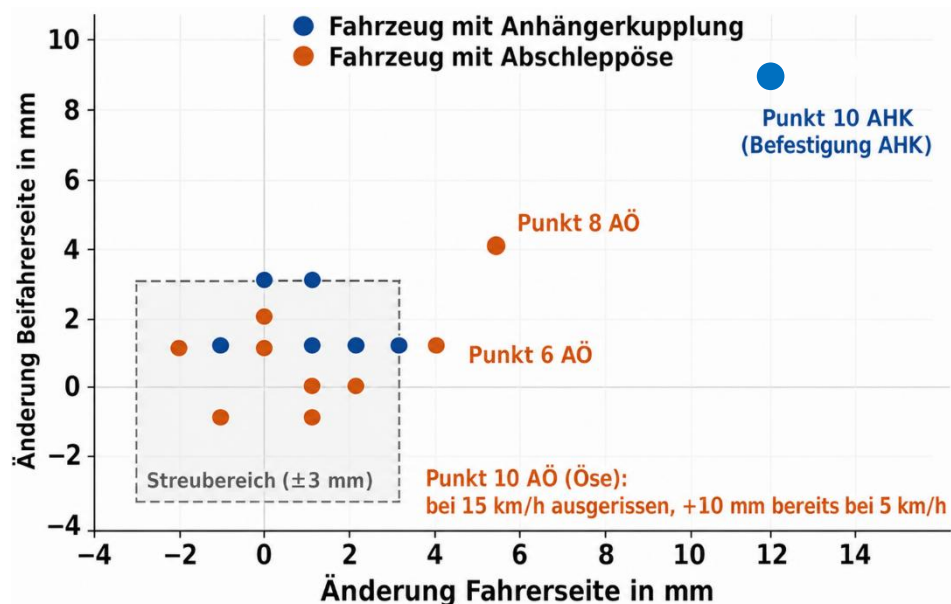


Abbildung 5.3: Änderung der Direktlänge je Messpunkt beider Fahrzeuge nach dem zweiten Versuch im Vergleich zum Streubereich von ± 3 mm

Der Vergleich zeigt, dass die Art des Krafteinleitungspunkts das Schadensbild maßgeblich bestimmt. An der Anhängerkupplung verlagert sich der Schaden in die Fahrzeugstruktur. An der Abschleppöse versagt der Krafteinleitungspunkt schneller, die umgebende Struktur verformt sich geringer als an der Anhängerkupplung. Beide Fälle führen somit zu einem sicherheitsrelevanten Schaden, jedoch an unterschiedlicher Stelle und mit unterschiedlicher Erkennbarkeit.

Diese Unterschiede lassen sich auf die verschiedenen Auslegungen zurückführen. Die Anhängerkupplung ist für den dauerhaften Anhängerbetrieb mit wiederkehrenden dynamischen Lasten ausgelegt und konstruktiv deutlich massiver, da ein

Versagen im laufenden Straßenverkehr schwerwiegende Folgen hätte. Die Abschleppöse ist hingegen nur für einen möglichst statischen Zug vorgesehen. Sie ist damit für eine deutlich geringere und nicht wiederkehrende Belastung konstruiert. Das erklärt, warum die Anhängerkupplung der dynamischen Belastung standhielt und lediglich verbog, während die Öse versagte.

5.3 Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext

Die dargestellten Ergebnisse werden nachfolgend in den in Kapitel 2 aufgearbeiteten Stand der Technik eingeordnet. Sie bestätigen mehrere bekannte Zusammenhänge und erweitern sie um den bislang nicht untersuchten Lastfall.

Der Versagensfall der Abschleppöse deckt sich mit den numerischen Ergebnissen von Wang. [2] Wang wies den Schrägzug unter 30° als kritischen Lastfall nach, bei dem die Spannung die Zugfestigkeit überschreitet. Der gewählte Zugwinkel findet darin seine Bestätigung, dass die Verformung an Punkt 10 erst durch die Karosserievermessung nachweisbar war. Darüber hinaus zeigt sich, dass eine solche Strukturveränderung ohne messtechnische Prüfung verborgen bleibt.

Die Simulationsergebnisse von Santos ordnen die eigenen Werte ein. Santos wies unter Zugbelastung eine bleibende Verformung der Grundplatte an einer Abschleppöse nach und bestätigt damit, dass Zugkräfte zu plastischen Verformungen führen. Die Untersuchung war jedoch quasistatisch und bezog sich auf einen Lkw. [3, S. 1, S. 11] Der impulsartige Krafteintrag und die Auswirkungen auf die umgebende Struktur, die hier für Pkw betrachtet werden, blieben dort offen.

Besondere Bedeutung besitzt die Untersuchung von Petracconi. Dort verursachte eine geringe Anzahl von Lastzyklen mit einer Spannungsschwingbreite oberhalb von 400 MPa den überwiegenden Anteil der Schädigung. [4, S. 462] Übertragen auf den Abschleppvorgang bedeutet dies, dass einzelne impulsartige Kraftspitzen strukturell wirksamer sind als viele kleine Lastzyklen. Der im Versuch bereits nach wenigen Zugvorgängen festgestellte Schaden fügt sich in diesen Zusammenhang ein. Das gilt besonders für die Abschleppöse, die sich bereits bei einer Kraft im Bereich des Prüfwerts verformte.

Für die Anhängerkupplung lieferte CARLOS TC den einzigen bekannten realen Lastbezug. [7] Das Verfahren erfasst die dynamischen Kräfte des Gespannbetriebs einschließlich der umgebenden Karosseriestruktur, bildet jedoch keinen

impulsartigen Einzellastfall am festgefahrenen Fahrzeug ab. Die Untersuchung der Arbeit schließt hier an, indem sie die Belastung an der Anhängerkupplung außerhalb des regulären Anhängebetriebs erfasst.

Die geometrischen Befunde ordnen sich in die Ergebnisse zur Fahrwerksgeometrie ein. Kim und Cho zeigten, dass lokal begrenzte Strukturveränderungen die Verschiebung von Lenksäule und A-Säule beeinflussen. [20, S. 272] Baráth wies experimentell nach, dass äußere Belastungen zu messbaren Veränderungen der Achseinstellwerte führen. [21, S. 32 f.] Die im Versuch beobachtete, mit der Belastungsstufe zunehmende Veränderung des Sturzes fügt sich in diesen Zusammenhang ein. Kowalski zeigte, dass Betriebsbedingungen die Zuverlässigkeit des Fahrwerks verkürzen und ein während der Fahrt eintretender Fahrwerksschaden zum Verlust der Fahrzeugkontrolle führen kann. [22, S. 15 ff.] Dies unterstreicht die Relevanz bereits geringer geometrischer Abweichungen für die Verkehrssicherheit, welche auch in dieser Arbeit hervorgingen.

Aus der Einordnung ergibt sich, dass die eigene Untersuchung die in Abschnitt 2.1.5 identifizierte Forschungslücke adressiert. Die bekannten Arbeiten beschränkten sich auf statische oder zyklisch reproduzierbare Laborlasten und betrachteten die Krafteinleitungspunkte isoliert. Die vorliegende Arbeit erfasst nach dem in Kapitel 2 aufgearbeiteten Kenntnisstand erstmals den impulsartigen Bergungsfall mit durchgängiger Messung von Zugkraft, Karosseriegeometrie und Achsgeometrie. Sie bestätigt damit experimentell, was die bisherigen Arbeiten nahelegten, und erweitert den Kenntnisstand um die Wirkung auf die umgebende Fahrzeugstruktur.

5.4 Handlungsempfehlungen

Aus den Ergebnissen lassen sich Empfehlungen für die Durchführung von Bergungsvorgängen und für die anschließende technische Prüfung ableiten.

Durchführung eines Bergungsvorgangs

Für den Bergungsvorgang selbst ist die Vermeidung der impulsartigen Belastung entscheidend. Basierend auf den Differenzen der Kraftspitzen zwischen 5 km/h und 15 km/h sollte ein festgefahrenes Fahrzeug mit langsamen und gleichmäßigen Zugversuchen gelöst werden, nicht durch einen Zug mit möglichst viel Anlauf, um entsprechend hohe Kraftspitzen zu vermeiden. Bleibt ein erster Versuch erfolglos, ist der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Steigerung durch größeren Anlaufweg und

höhere Geschwindigkeit zu widerstehen, da gerade dies die schädigenden Kraftspitzen erzeugt. Vorzuziehen ist eine kontrollierte Bergung mit Seilwinde oder Kran, bei der sich die Zugkraft begrenzen lässt.

Wahl des Krafteinleitungspunkts

Die Wahl des Krafteinleitungspunkts bestimmt maßgeblich, wo ein Schaden entsteht. Versagt der Anbindungspunkt selbst, wie die Abschleppöse im Versuch, wird die dahinterliegende Struktur geringer belastet. Hält der Anbindungspunkt hingegen, wie die Anhängerkupplung, wird die Kraft deutlich stärker in die tragende Struktur eingeleitet und verursacht eine bleibende Verformung nach Abschnitt 5.1. Ein Zug an der robusteren Anhängerkupplung führt somit zu einem größeren Schaden an der umgebenden Karosserie als ein Zug an der Abschleppöse.

Prüfbedarf und Begutachtung

Aus den Ergebnissen ergibt sich ein konkreter Prüfbedarf. Ein Bergungsvorgang hinterlässt entsprechend der durchgeführten Messungen Veränderungen, die durch eine Sichtprüfung nicht erkennbar sind. Da weder die Hauptuntersuchung noch eine anlassbezogene Begutachtung diesen Lastfall bisher erfassen (vgl. Abschnitt 2.5), wird empfohlen, ein Fahrzeug nach wiederholten erfolglosen Bergungsversuchen gezielt zu untersuchen. Diese Untersuchung sollte eine Achsvermessung und eine Karosserievermessung gegen die Herstellerdaten umfassen, entsprechend dem in dieser Arbeit angewendeten Vorgehen. Für das Sachverständigenwesen folgt daraus, dass ein dokumentierter Bergungsvorgang als prüfrelevantes Ereignis eingestuft werden sollte, ähnlich den in Abschnitt 2.5 betrachteten Schadensereignissen. Die Begründung liegt in der Relevanz verdeckter Geometrieabweichungen nach Abschnitt 2.4 für die Verkehrssicherheit, die das Fahrverhalten beeinträchtigen können, ohne äußerlich sichtbar zu sein.

Instandsetzung und Einfluss auf die Betriebserlaubnis

Nach einer solchen Belastung ist zunächst der Bereich der Krafteinleitung zu prüfen. Ein beschädigter oder ausgerissener Anbindungspunkt ist instand zu setzen, da § 43 Abs. 2 StVZO für Personenkraftwagen hinten eine Einrichtung zum Befestigen eines Abschleppmittels fordert, sofern die Betriebserlaubnis eine Anhängelast zulässt. [11, § 43 Abs. 2] Ob die Betriebserlaubnis darüber hinaus berührt ist, hängt vom Umfang der strukturellen Veränderung ab und lässt sich nicht allgemein

beantworten. Gerade diese Unsicherheit unterstreicht den Bedarf an einer definierten Prüfgrundlage.

5.5 Kritische Reflexion und Limitationen

Die Aussagekraft der Ergebnisse unterliegt mehreren Einschränkungen, die bei ihrer Einordnung zu berücksichtigen sind.

Stichprobe und Übertragbarkeit

Die Untersuchung stützt sich auf zwei baugleiche Fahrzeuge desselben Typs und Baujahrs. Die Ergebnisse gelten damit zunächst für diese Fahrzeugkonfiguration und lassen sich nicht ohne Weiteres auf andere Fahrzeugtypen mit abweichender Karosseriestruktur übertragen. Ebenso wurde nur ein Zugfahrzeugtyp eingesetzt, sodass die erzeugten Kraftniveaus an dessen Masse und Antriebsleistung gebunden sind. Je Krafteinleitungspunkt und Geschwindigkeitsstufe liegt zudem nur ein Versuch vor, weshalb die Einzelwerte nicht statistisch abgesichert sind.

Messunsicherheiten

Die vier Messketten weisen unterschiedliche Genauigkeiten auf. Tabelle 5.2 fasst diese zusammen. Für die Karosserievermessung wurde die reale Wiederholstreuung über die in Abschnitt 5.1 hergeleitete Signifikanzschwelle von rund 3 mm berücksichtigt. Für die Achsvermessung ist die Genauigkeit des verwendeten Messsystems zur Absicherung für die Bewertung der festgestellten Tendenz maßgeblich.

Tabelle 5.2: Darstellung der Gerätemessunsicherheiten

Messgröße	Messgerät	Angegebene Genauigkeit
Zugkraft	Kraftmessdose AEP T20	Genauigkeitsklasse C2 nach OIML R60
	Mobile Anzeige AE 703	0,01 %
Karosseriegeometrie	Car-O-Tronic	Anzeigegeometrie $\pm 0,5$ mm (abgeleitete Signifikanzschwelle 3 mm)
Achsgeometrie	Bosch FWA 4630	$\pm 0,1^\circ$
Temperatur	Fluke 62 Max+	± 1 %, (± 1 °C)

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Beantwortung der Forschungsfrage

Ziel der Arbeit war die Untersuchung dynamischer Abschleppvorgänge und deren Einfluss auf die Karosserie- und Fahrwerksstruktur in Bezug auf die Verkehrssicherheit. Dazu wurden an zwei baugleichen Fahrzeugen Zugversuche mit zwei Geschwindigkeitsstufen durchgeführt und die Kraft, Karosseriegeometrie und Achsgeometrie vor und nach den Belastungen erfasst. Die in Abschnitt 1.2 formulierte Forschungsfrage lässt sich anhand der Ergebnisse folgend beantworten.

Die auftretenden Zugkräfte überschreiten den normativen Prüfwert bei 15 km/h an der Anhängerkupplung deutlich. Die impulsartige Belastung des dynamischen Abschleppens lag weit über der statischen Last für die diese ausgelegt und geprüft ist.

Die erhöhte Belastung führte zu bleibenden Schäden an der Fahrzeugstruktur. An der Anhängerkupplung entstand eine dauerhafte Verformung im Lastpfad der Krafteinleitung, die durch eine Sichtprüfung nicht erkennbar war. Die Abschleppöse verformte sich bereits in der ersten Belastungsstufe plastisch und riss in der zweiten Stufe unterhalb des normativen Prüfwerts vollständig aus der Karosserie. Die Art des Krafteinleitungspunkts bestimmt dabei, wie stark der Schaden im Bauteil selbst oder in der tragenden Struktur dahinter entsteht.

Die Fahrwerksgeometrie reagierte an beiden Fahrzeugen unterschiedlich. Am Fahrzeug mit Anhängerkupplung veränderten sich mehrere Achswerte gerichtet mit der Belastungsstufe, blieben aber innerhalb der Herstellertoleranzen. Am Fahrzeug mit Abschleppöse verließ der Wert der Einzelspur des rechten Hinterrads nach der zweiten Belastungsstufe die Toleranz, nachdem sie zuvor noch eingehalten wurde.

Zusammenfassend beeinflusst der dynamische Abschleppvorgang die Fahrzeugstruktur messbar und kann die Achsgeometrie bis über die Herstellertoleranz hinaus verändern. Die Relevanz in Bezug auf die Verkehrssicherheit ergibt sich aus den ohne Vermessung unentdeckten Schäden und abweichender Achsgeometrie.

6.2 Fazit

Ein zentrales Ergebnis der Arbeit betrifft die Aussagekraft des normativen Prüfwerts. Die Abschleppöse versagte unterhalb dieses Werts, nachdem sie zuvor eine Kraft

in der Größenordnung des normativen Prüfwerts ertragen hatte. Bereits niedrige Geschwindigkeiten, deren Kraftniveau in der Größenordnung des Prüfwerts liegen, führten zu einer Vorschädigung, die das Bauteil im folgenden Zugvorgang bei geringerer Kraft versagen ließ.

Der Prüfwert sichert das Fahrzeug damit nur gegen eine statische Belastung ab, nicht gegen die impulsartige Belastung des dynamischen Abschleppens. Ein Fahrzeug kann einen Bergungsvorgang äußerlich unbeschädigt überstehen und dennoch eine verdeckte Schädigung der Krafteinleitung oder eine Abweichung der Achsgeometrie aufweisen.

Für die Praxis folgt daraus, dass ein dynamischer Abschleppvorgang als sicherheitsrelevantes Ereignis zu behandeln ist. Die Kombination aus Karosserie- und Achsvermessung bietet ein geeignetes Verfahren, um solche Schäden nachzuweisen.

6.3 Ausblick

Die Ergebnisse beruhen auf einer begrenzten Versuchsreihe und eröffnen mehrere Ansatzpunkte für weiterführende Untersuchungen.

Ein erster Bereich betrifft die Erweiterung der Versuchsparameter. Sinnvoll wären Zugversuche an weiteren Fahrzeugen unter anderen Zugwinkeln. Unter anderem zur Ermittlung des Unterschieds zwischen linker und rechter Seite für den Zug oder in geradliniger Richtung, was der normativen Prüfrichtung entspricht. Ebenso sollte die vordere Abschleppöse einbezogen werden, da die vorliegende Arbeit nur die hintere Krafteinleitung erfasst.

Ein zweiter Bereich umfasst die Übertragung auf modernere und noch realitätsnähere Bedingungen. Fahrzeuge mit Fahrerassistenzsystemen würden erlauben, die Auswirkung der Geometrieabweichungen auf die Funktion dieser Systeme zu prüfen, was an den Versuchsfahrzeugen dieser Arbeit nicht möglich war. Versuche unter realem Schneefall mit möglichst identischen Bedingungen würden die praktische Bergungssituation noch genauer abbilden.

Ein dritter Bereich betrifft die Erfassung realer Zugkräfte. Die Einbindung einer Kraftmessdose in einen tatsächlichen Bergungsvorgang mit verschiedenen Zugfahrzeugen würde die real auftretenden Kräfte liefern, die in der Literatur bislang fehlen.

Literaturverzeichnis

- [1] ADAC (Hrsg.): ADAC Pannenhilfebilanz 2025: Alle 9 Sekunden ein Einsatz, München, März 2026
[Online, letzter Zugriff: 18.05.2026]. Verfügbar unter:
<https://www.adac.de/der-adac/verein/corporate-news/pannenhilfebilanz-2025/>
- [2] Wang, Z.: Car Front Towing Hook Analysis and Structural Improvements Based on CAE, S. 1113 – 1116
Advances in Computer Science Research, Atlantis Press, Januar 2015
[Online, letzter Zugriff: 02.08.2026]. Verfügbar unter:
<https://www.atlantis-press.com/proceedings/iicec-15/17133>
- [3] Santos A.: Stress-strain analysis of the tow hook of a commercial truck by numerical simulations.
Acta Scientiarum Technology, Bd. 44, Juli 2022
[Online, letzter Zugriff: 02.08.2026]. Verfügbar unter:
<https://periodicos.uem.br//actascitechnol/index.php/ActaSciTechnol/article/view/69814/751375158935>
- [4] Petracconi, C. L.; Ferreira, S. E.; Palma, E. S.: Fatigue life simulation of a rear tow hook assembly of a passenger car, S. 455-463
Engineering Failure Analysis, Bd. 17, Nr. 2, März 2010
DOI: 10.1016/j.engfailanal.2009.09.002
- [5] U.S. Army Test and Evaluation Command: Test Operations Procedure 02-2-618 Towing and Recovery, Aberdeen Proving Ground, Oktober 2018
[Online, letzter Zugriff: 24.06.2026]. Verfügbar unter:
<https://apps.dtic.mil/sti/trecms/pdf/AD1063289.pdf>
- [6] ECE-Regelung Nr. 55:
Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung mechanischer Verbindungseinrichtungen von Fahrzeugkombinationen, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), März 2010

- [7] Weiland, S.: Testing of Trailer Coupling Devices Considering Multiaxial Trailer Loads
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit, Vortrag LMS, Conference, Darmstadt, April 2007
[Online, letzter Zugriff: 26.06.2026]. Verfügbar unter:
<https://de.scribd.com/document/195485376/Fraunhofer-Testing-of-Trailer-Coupling>
- [8] Durchführungsverordnung (EU) 2021/535
Einheitliche Verfahren und technische Spezifikationen für die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten, Europäische Kommission, März 2021
- [9] Pippit AI: Software zur Bildbearbeitung und Bilderstellung
[Online, letzter Zugriff: 10.08.2026]. Verfügbar unter:
<https://www.pippit.ai/home>
- [10] Verordnung (EU) 2019/2144
Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern im Hinblick auf ihre allgemeine Sicherheit, Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, November 2019
- [11] Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO), § 43 Einrichtungen zur Verbindung von Fahrzeugen, Bundesministerium für Justiz
- [12] Norm DIN 74 058
Kupplungskugel – Maße, Freiräume, Normenausschuss Kraftfahrzeuge (FAKRA), DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, September 1988
- [13] Norm DIN 74 054 Teil 1
Mechanische Verbindungen für Kraftfahrzeuge und Anhänger, Zugöse 40 mit Buchse, Normenausschuss Kraftfahrzeuge (FAKRA), DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Januar 1989
- [14] Norm DIN 74 054 Teil 2
Mechanische Verbindungen für Kraftfahrzeuge und Anhänger, Zugöse 40 ohne Buchse, Normenausschuss Kraftfahrzeuge (FAKRA), DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, August 1977

- [15] Norm DIN 74056
Abschleppkupplungen – Anschlußmaße, Vorsteckbolzen und Sicherung,
Fachnormenausschuss Kraftfahrzeuge (FAKRA), DIN Deutsches Institut für
Normung e.V., Berlin, Januar 1976
- [16] Braess, H.-H.; Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik,
7. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013
ISBN 978-3-658-01691-3
- [17] Lu G.; Yu T. (Hrsg.): Energy absorption of structures and materials
Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2003
ISBN 1 85573 688 8
- [18] Kuziak, R.; Kawalla, R.; Waengler, S.: Advanced high strength steels for au-
tomotive industry, S. 103-117
Archives of Civil and Mechanical Engineering, Bd. 8, Nr. 2, Dezember 2008
[Online, letzter Zugriff: 28.07.2026]. Verfügbar unter:
[https://www.researchgate.net/publication/257678399_Advan-
ced_high_strength_steels_for_automotive_industry_A_review](https://www.researchgate.net/publication/257678399_Advanced_high_strength_steels_for_automotive_industry_A_review)
- [19] Westsächsische Hochschule Zwickau: Gelbe Seiten – Arbeitsblätter
25. Ausgabe, Zwickau
- [20] Kim S.; Cho H.: A Study on the Stiffness Change of a Passenger Car's Front
Frame Body before and after a Collision Accident, S. 270-275
International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Bd.
10, Nr. 5, Mai 2021
[Online, letzter Zugriff: 05.08.2026]. Verfügbar unter:
<https://www.ijmerr.com/uploadfile/2021/0508/20210508023643949.pdf>
- [21] Baráth, B.: The Effect of Poor Road Surfaces on Vehicle Suspension Geom-
etry and the Misalignment of Setup Parameters, S. 28-34
International Journal of Automotive Science and Technology, Bd. 9, 2025
[Online, letzter Zugriff: 05.08.2026]. Verfügbar unter:
[https://www.researchgate.net/publica-
tion/398894775_The_Effect_of_Poor_Road_Surfaces_on_Vehicle_Suspension_Geometry_and_the_Misalignment_of_Setup_Parameters](https://www.researchgate.net/publication/398894775_The_Effect_of_Poor_Road_Surfaces_on_Vehicle_Suspension_Geometry_and_the_Misalignment_of_Setup_Parameters)

- [22] Kowalski, S.: Analysis of Automotive Suspension System Failures and Reliability Evaluation, A Study Based on V-SIM Simulation
Applied Sciences, Bd. 15, Nr. 2, Art. 805, Januar 2025
[Online, letzter Zugriff: 06.08.2026]. Verfügbar unter:
https://www.researchgate.net/publication/388060994_Analysis_of_Automotive_Suspension_System_Failures_and_Reliability_Evaluation_A_Study_Based_on_V-SIM_Simulation
- [23] Vähröder, D.: ADAS-Kalibrierung: Immer nach Vorgabe, S. 32-33
Asp AUTO SERVICE PRAXIS, August 2025
[Online, letzter Zugriff: 08.08.2026]. Verfügbar unter:
https://www.autoservicepraxis.de/download-file/3690977/90007_2025_29_07_M_032-033_n30_Kalibrierung_ADAS_Sensoren_120504_print.pdf
- [24] Burza, R.M.: Overview of Radar Alignment Methods and Analysis of Radar Misalignment's Impact on Active Safety and Autonomous Systems
Sensors, Bd. 24, Juli 2024
DOI: 10.3390/s24154913
- [25] Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO), § 29 Untersuchung der Kraftfahrzeuge und Anhänger in Verbindung mit Anlage VIII und VIIIa, Bundesministerium für Justiz
- [26] Norm DIN EN 12 385-4
Drahtseile aus Stahldraht – Sicherheit – Teil 4: Litzenseile für allgemeine Hebezwecke, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Juni 2008
- [27] Norm DIN EN 13 889
Geschmiedete Schäkel für allgemeine Hebezwecke – Gerade und geschweifte Schäkel – Güteklasse 6 – Sicherheit, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Februar 2009
- [28] Läßle, V.: Einführung in die Festigkeitslehre
4. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016
ISBN 978-3-658-10610-2

- [29] Lerch, R.: Elektrische Messtechnik
7. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016
ISBN 978-3-662-46940-8

Übersicht verwendeter Hilfsmittel

Pippit AI

- Zur Bildbearbeitung und Bilderstellung aus eigenen Skizzen
Prompts: „Erstelle aus den folgenden Skizzen jeweils eine Darstellung“
[Online, letzter Zugriff: 10.08.2026]. Verfügbar unter:
<https://www.pippit.ai/home>

ChatGPT

- Optimierung der Auflösung und Lesbarkeit der Bilder der Arbeit
Prompts: „Optimiere die Bildqualität und Lesbarkeit der folgenden Bilder“
[Online, letzter Zugriff: 14.08.2026]. Verfügbar unter:
<https://chatgpt.com/>

Claude AI

- Kontrolle von Grammatik, Rechtschreibung, Zitation der Arbeit, Vorschläge für andere Textfassungen
- Kontrolle der Arbeit nach Kriterien aus Diplomandenseminar
Prompts: „Erstelle aus den folgenden Dokumenten (beruhend auf Inhalten Handout Diplomandenseminar) ein kritisches Gutachten zur Kontrolle einer wissenschaftlichen Arbeit“, „Kontrolliere die folgende Arbeit nach den entsprechenden Prüfkriterien, erstelle ggfs. Verbesserungsvorschläge“
[Online, letzter Zugriff: 15.08.2026]. Verfügbar unter:
<https://claude.ai/>

Anhang

A. Zulassungsbescheinigungen Teil 1 der Versuchsfahrzeuge	1
A.1 Zulassungsbescheinigung Teil 1 – Corsa mit Anhängerkupplung	1
A.2 Zulassungsbescheinigung Teil 1 – Corsa mit Abschleppöse	1
B. Datenblatt Car-O-Tronic (Ausschnitt Betriebsanleitung, S. 230)	2
C. Typenschild Anhängerkupplung Zugfahrzeug & Versuchsfahrzeug	3
C.1 Zugfahrzeug:	3
C.2 Versuchsfahrzeug:	3
D. Protokolle Karosserievermessung	4
D.1 Karosserievermessung Fahrzeug mit AHK – Vorvermessung	5
D.2 Karosserievermessung Fahrzeug mit AHK – nach 5 km/h	9
D.3 Karosserievermessung Fahrzeug mit AHK – nach 15 km/h	13
D.4 Karosserievermessung Fahrzeug mit AÖ – Vorvermessung	17
D.5 Karosserievermessung Fahrzeug mit AÖ – nach 5 km/h	21
D.6 Karosserievermessung Fahrzeug mit AÖ – nach 15 km/h	25
E. Protokolle – Achsvermessung	29
E.1 Achsvermessung Fahrzeug mit AHK – Vorvermessung	29
E.2 Achsvermessung Fahrzeug mit AHK – nach 5 km/h	30
E.3 Achsvermessung Fahrzeug mit AHK – nach 15 km/h	31
E.4 Achsvermessung Fahrzeug mit AÖ – Vorvermessung	32
E.5 Achsvermessung Fahrzeug mit AÖ – nach 5 km/h	33
E.6 Achsvermessung Fahrzeug mit AÖ – nach 15 km/h	34

A. Zulassungsbescheinigungen Teil 1 der Versuchsfahrzeuge

A.1 Zulassungsbescheinigung Teil 1 – Corsa mit Anhängerkupplung

B	27.04.99	2.1	0039	2.2	167	0256	L	2	9	01	P.2	40	/5600	T	150
J	01	4	0200					18	3741					1608	
E	W0L0SBF08X4290916	3	9					20	1420					940	
D.1	-							12	-	13	-		Q	-	
	S93							V.7	142	F.1	1360		F.2	1360	
	-							7.1	710	7.2	700		7.3	-	
	-							8.1	710	8.2	700		8.3	-	
	-							11.1	78	11.2	-		11.3	73	
D.3	CORSA-B(ECO)							0.1	750	0.2	420	S.1	5	S.2	-
2	OPEL							15.1	145/80R13	75S					
5	PERSONENKRAFTWAGEN							15.2	145/80R13	75S					
	GESCHLOSSEN							15.3	-						
V.9	-							R	GRAU			11	7/-		
14	SCHADSTOFFARM D4							K	e1*98/14*0053*						
P.3	Benzin							6	-		17	K	16	GG371830	
10	0001	14.1	0432	15.1	973			21	-						
22	ZU F.1/F.2:1375 U.ZU 7.1-8.3:H.745 B.ANH-BETR.*ZU 0.1: 1000 BIS 10PROZ.STEIG.*WW.AHK LT.EGTG/ABE*														

A.2 Zulassungsbescheinigung Teil 1 – Corsa mit Abschleppöse

B	03.08.1999	2.1	0039	2.2	16701P 7	L	02	9	01	P.2 P.4	0040/05600	T	150
J	01	4	0200			18	03741	-	-	19	1608	-	-
E	W0L0SBF08X4140089	3	7			20	1420	-	-	6	00940	-	-
D.1	-					12	-	13	-	Q	-		
	S93					V.7	142	F.1	001390	F.2	001390		
	-					7.1	00760	7.2	00700	7.3	-		
	-					8.1	00760	8.2	00700	8.3	-		
	-					11.1	078	11.2	-	11.3	073		
D.3	CORSA-B(ECO)					0.1	00700	0.2	0420	S.1	005	S.2	-
2	OPEL					15.1	145/80R13	75S					
5	PERSONENKRAFTWAGEN					15.2	145/80R13	75S					
	GESCHLOSSEN					15.3	-						
V.9	-					R	BRAUN			11	8		
14	SCHADSTOFFARM D4					K	e1*96/27*0053*						
P.3	BENZIN					6	-		17	K	16	UW943029	
10	0001	14.1	0432	15.1	00973	21	-						
22	ZU F.1/F.2:1405 U.ZU 7.1-8.3:H.745 B.ANH-BETR.*ZU 0.1: 950 BIS 10PROZ.STEIG.*WW.AHK LT.EGTG/ABE*												

B. Datenblatt Car-O-Tronic (Ausschnitt Betriebsanleitung, S. 230)

19.4 Car-O-Tronic (und Car-O-Tronic Classic)

Versorgungsspannung	Eingang: AC 100 - 240 V, 800 mA, 50 - 60 Hz Ausgang: DC 15 V 2,2 mA
Anzeigegenauigkeit	±0,5 mm
Arbeitsbereich (oberbaufähig):	
Länge	5.720 / 6.720 mm
Breite	2.120 mm
Höhe	1.985 mm
Messarm-Stromversorgung	Aufladbare Akkus
Betriebsdauer	6 - 8 Stunden
Aufladen	2 - 3 Stunden (80 %) 6 Stunden (100 %)
Gewicht Messarm	18 kg
Kalibrierung	Individuelle Kalibrierung, voll rückverfolgbar, entspricht internationalen/nationalen Längennormen (Kalibrierungszertifikat beiliegend).
Datenaustausch zwischen Messarm und PC	Bluetooth, Klasse 1
Ausgangsleistung	Max. +6 dBm
Frequenzen für die Kommunikation zwischen Messarm und PC	2,4 GHz
Hardwarefunktionen	– Messung während eines Ziehvorgangs – Einfache Handhabung an anderen Bänken – Oberbaufähig – Messarm kann ohne erneute Kalibrierung zwischen Arbeitsstationen bewegt werden. – Smart LED
Qualitätszertifikat, Car-O-Liner AB	ISO9001, ISO14001

C. Typenschild Anhängerkupplung Zugfahrzeug & Versuchsfahrzeug

C.1 Zugfahrzeug:



C.2 Versuchsfahrzeug:



D. Protokolle Karosserievermessung

In der Arbeit erfolgt die Nummerierung der Karosserievermessungspunkte von Front nach Heck am Fahrzeug. In den Protokollen entspricht die Anordnung nicht diesem Schema, dadurch ergibt sich eine abweichende Anordnung zur original Vermessung, die Anpassung ist in der folgenden Tabelle D. 1 dargestellt:

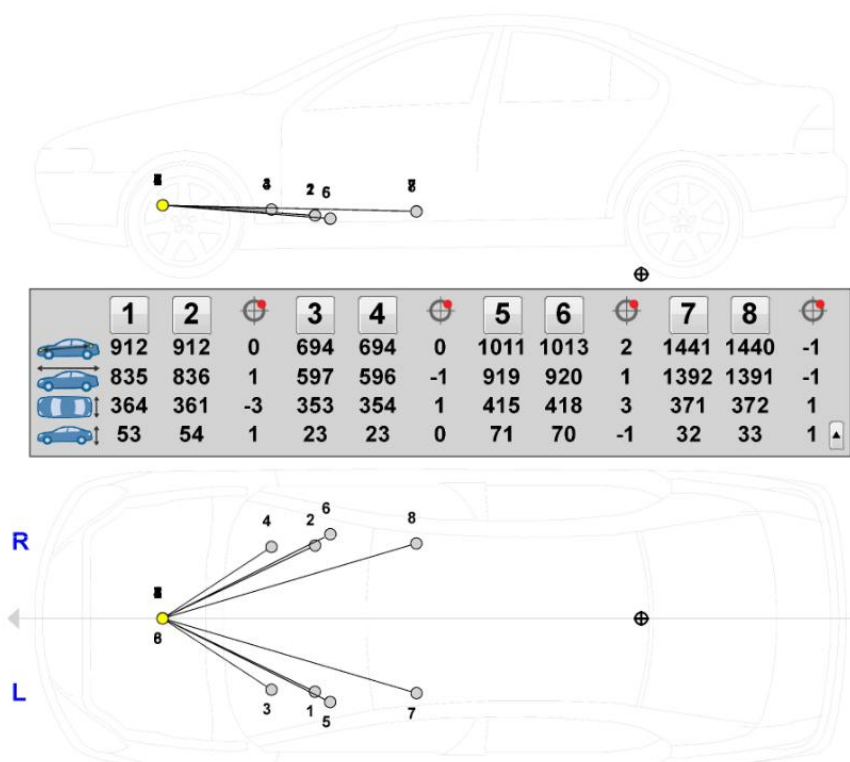
Tabelle D. 1: Änderung der Bezugspunktanordnung

Angepasster Bezugspunkt	Bezugspunkt in den Protokollen
1	8
2	2
3	1
4	3
5	4
6	5
7	6
8	7
9	9
10	10

Zudem sind pro Gesamtfahrzeugmessung jeweils 3 Protokolle für die 10 Bezugspunkte entstanden, zur Übersichtlichkeit befindet sich nach jeder Gesamtmessung nochmals eine Tabelle mit der angepassten Bezugspunktnummerierung dahinter.

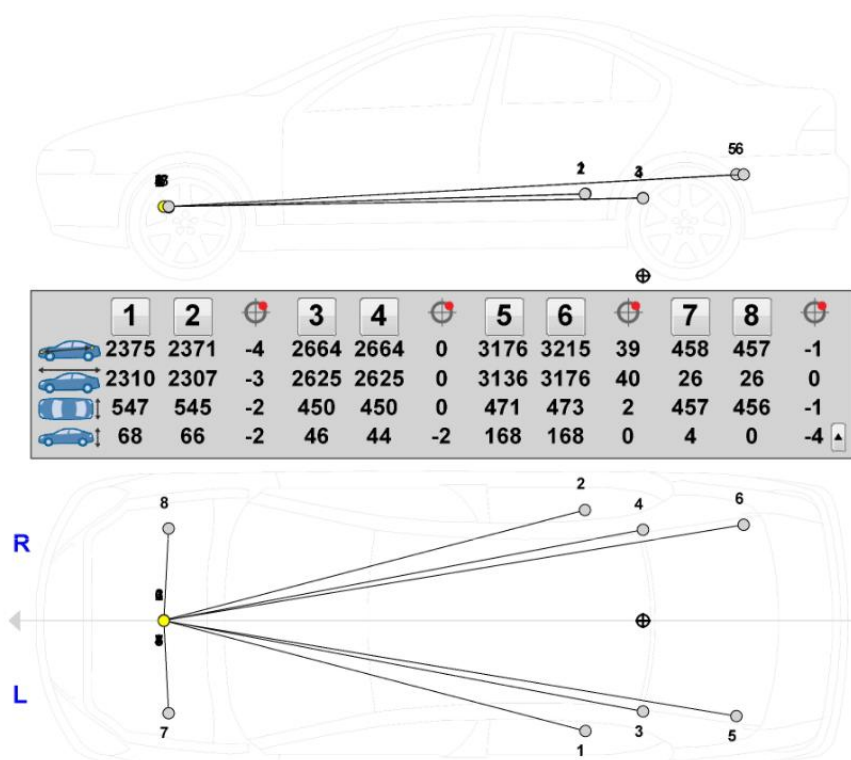
D.1 Karosserievermessung Fahrzeug mit AHK – Vorvermessung

Car-O-Liner Vision2 X2				2.12.0.124 2026-07-01
Streckenmessung Diagnose Bericht				
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER	Typ _	
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	VIN Opel_Corsa_AHK_Vorvermessung	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	Kilometer	
E-Mail		Kennzeichen		
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-01-1	Startdatum 2026-07-01	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-01	
E-Mail		Unterschrift _____		



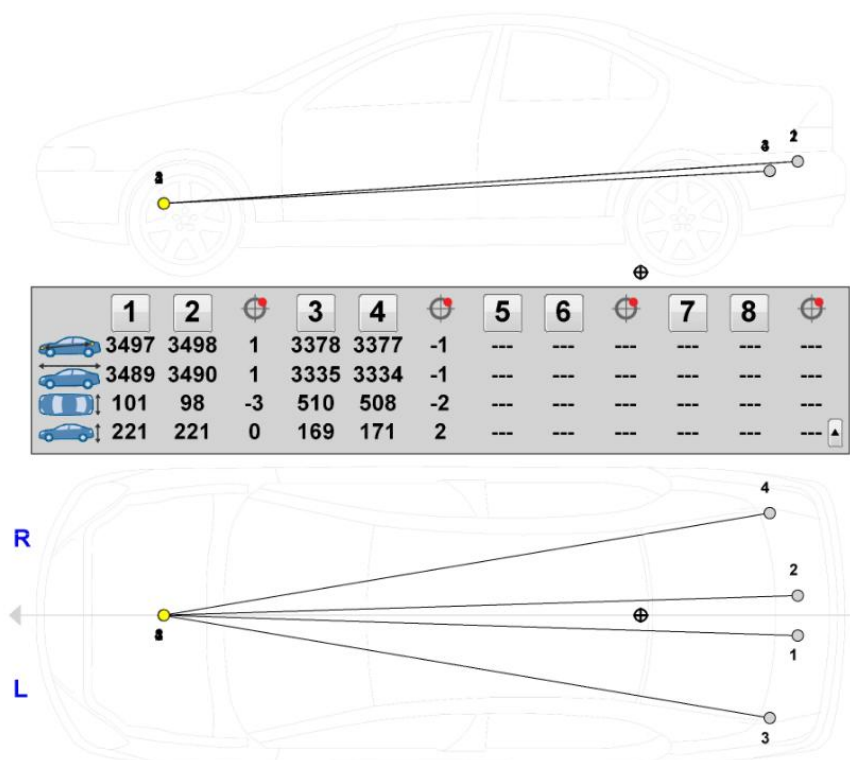
Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	Diplomprojekt - Tim Gajewski Opel Corsa Testobjekt 1 mit AHK

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-01
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER		
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	Typ _	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	VIN Opel_Corsa_AHK_Vorvermessung	
E-Mail		Kennzeichen	Kilometer	
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-01-1	Startdatum 2026-07-01	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-01	
E-Mail		Unterschrift _____		



Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	Diplomprojekt - Tim Gajewski Opel Corsa Testobjekt 1 mit AHK

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-01
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER	Typ _	
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	VIN Opel_Corsa_AHK_Vorvermessung	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	Kilometer	
E-Mail		Kennzeichen		
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-01-1	Startdatum 2026-07-01	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-01	
E-Mail		Unterschrift _____		



Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	Diplomprojekt - Tim Gajewski Opel Corsa Testobjekt 1 mit AHK

Zusammenfassung - Vorvermessung AHK:

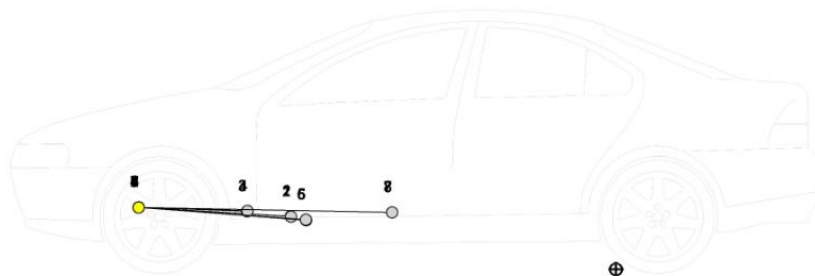
Die folgende Tabelle D. 2 fasst die Karosserievermessungskordinaten der Vorvermessung von dem Fahrzeug mit Anhängerkupplung zusammen:

Tabelle D. 2: Zusammenfassung Koordinaten Karosserievermessung, AHK, Vorvermessung

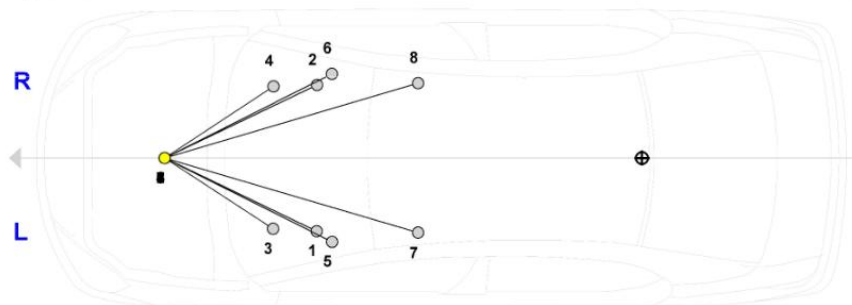
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fahrerseite										
Direktlänge	458	694	912	1011	1441	2375	2664	3176	3378	3497
x	26	597	835	919	1392	2310	2625	3136	3335	3489
y	457	353	364	415	371	547	450	471	510	101
z	4	23	53	71	32	68	46	168	169	221
Beifahrerseite										
Direktlänge	457	694	912	1013	1440	2371	2664	3215	3377	3498
x	26	596	836	920	1391	2307	2625	3176	3334	3490
y	456	354	361	418	372	545	450	473	508	98
z	0	23	54	70	33	66	44	168	171	221
Differenz										
Direktlänge	-1	0	0	2	-1	-4	0	39	-1	1
x	0	-1	1	1	-1	-3	0	40	-1	1
y	-1	1	-3	3	1	-2	0	2	-2	-3
z	-4	0	1	-1	1	-2	-2	0	2	0

D.2 Karosserievermessung Fahrzeug mit AHK – nach 5 km/h

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-06
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER	Typ _	
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	VIN Opel_CorsaB_AHK_5kmh	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	Kilometer	
E-Mail		Kennzeichen		
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-06-1	Startdatum 2026-07-06	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-06	
E-Mail		Unterschrift _____		

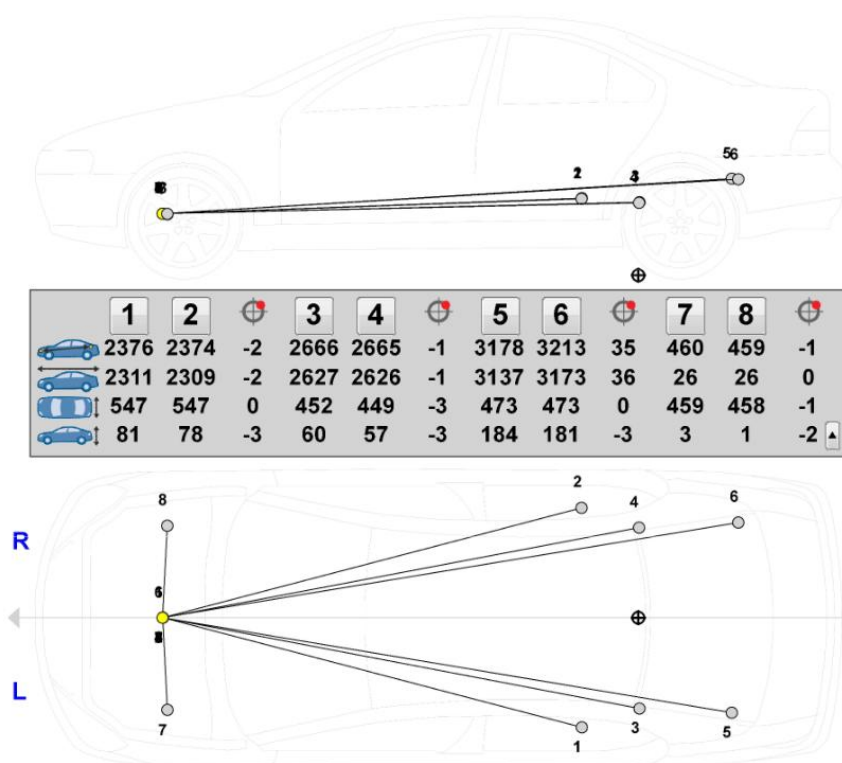


	1	2	3	4	5	6	7	8
	911	915	4	691	696	5	1011	1011
	834	838	4	595	598	3	919	918
	363	363	0	351	356	5	416	418
	47	48	1	21	19	-2	68	64



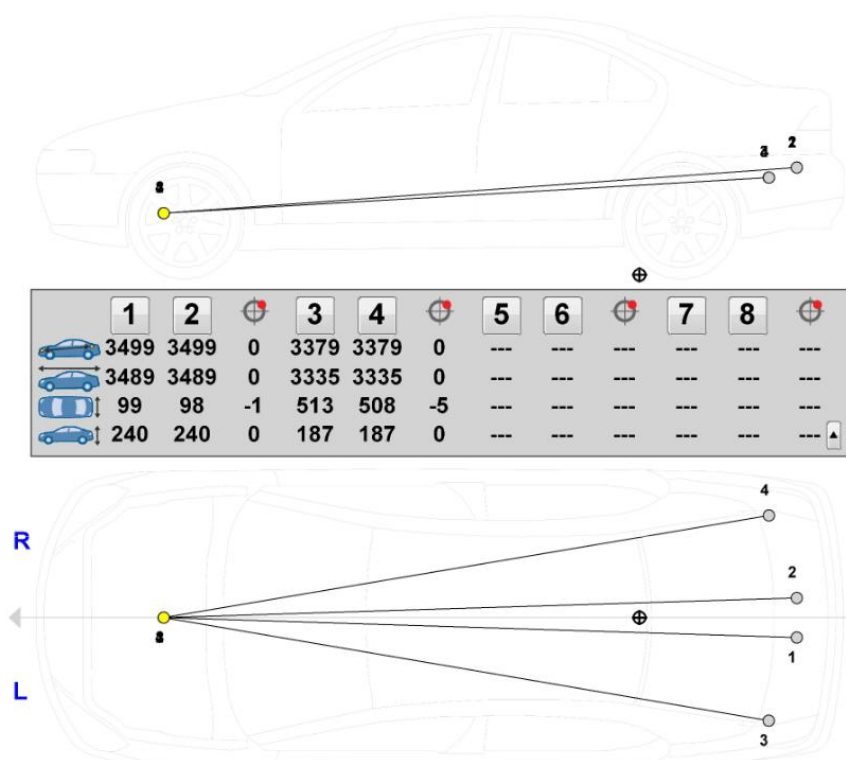
Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-06
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER		
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	Typ _	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	VIN Opel_CorsaB_AHK_5kmh	
E-Mail		Kennzeichen	Kilometer	
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-06-1	Startdatum 2026-07-06	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-06	
E-Mail		Unterschrift _____		



Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-06
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER		
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	Typ _	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	VIN Opel_CorsaB_AHK_5kmh	
E-Mail		Kennzeichen	Kilometer	
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-06-1	Startdatum 2026-07-06	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-06	
E-Mail		Unterschrift _____		



Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	

Zusammenfassung – 5 km/h AHK:

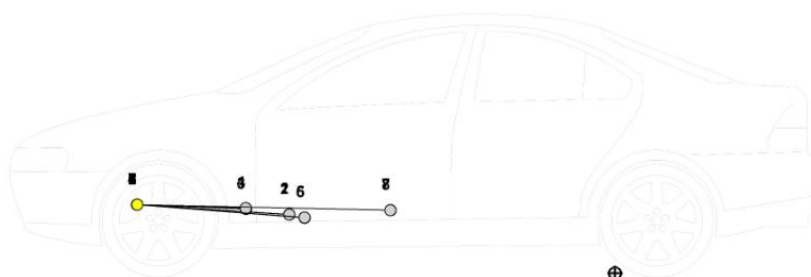
Die folgende Tabelle D. 3 fasst die Karosserievermessungskordinaten der 5 km/h Messung von dem Fahrzeug mit Anhängerkupplung zusammen:

Tabelle D. 3: Zusammenfassung Koordinaten Karosserievermessung, AHK, 5 km/h

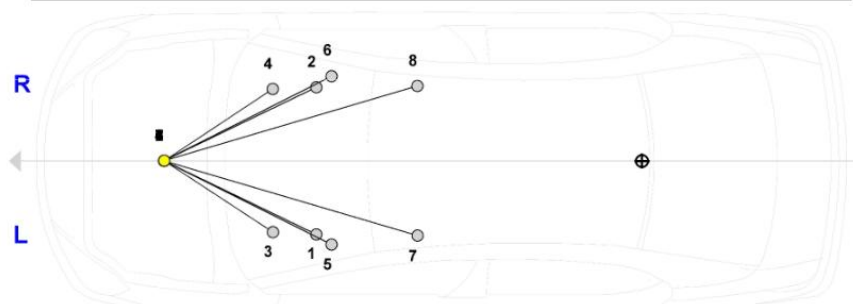
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fahrerseite										
Direktlänge	460	691	911	1011	1441	2376	2666	3178	3379	3499
x	26	595	834	919	1392	2311	2627	3137	3335	3489
y	459	351	363	416	370	547	452	473	513	99
z	3	21	47	68	26	81	60	184	187	240
Beifahrer- seite										
Direktlänge	459	696	915	1011	1441	2374	2665	3213	3379	3499
x	26	598	838	918	1392	2309	2626	3173	3335	3489
y	458	356	363	418	372	547	449	473	508	98
z	1	19	48	64	26	78	57	181	187	240
Differenz										
Direktlänge	-1	5	4	0	0	-2	-1	35	0	0
x	0	3	4	-1	0	-2	-1	36	0	0
y	-1	5	0	2	2	0	-3	0	-5	-1
z	-2	-2	1	-4	0	-3	-3	-3	0	0

D.3 Karosserievermessung Fahrzeug mit AHK – nach 15 km/h

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-06
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER	Typ _	
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	VIN Opel_CorsaB_AHK_15kmh	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	Kilometer	
E-Mail		Kennzeichen		
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-06-2	Startdatum 2026-07-06	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-06	
E-Mail		Unterschrift _____		

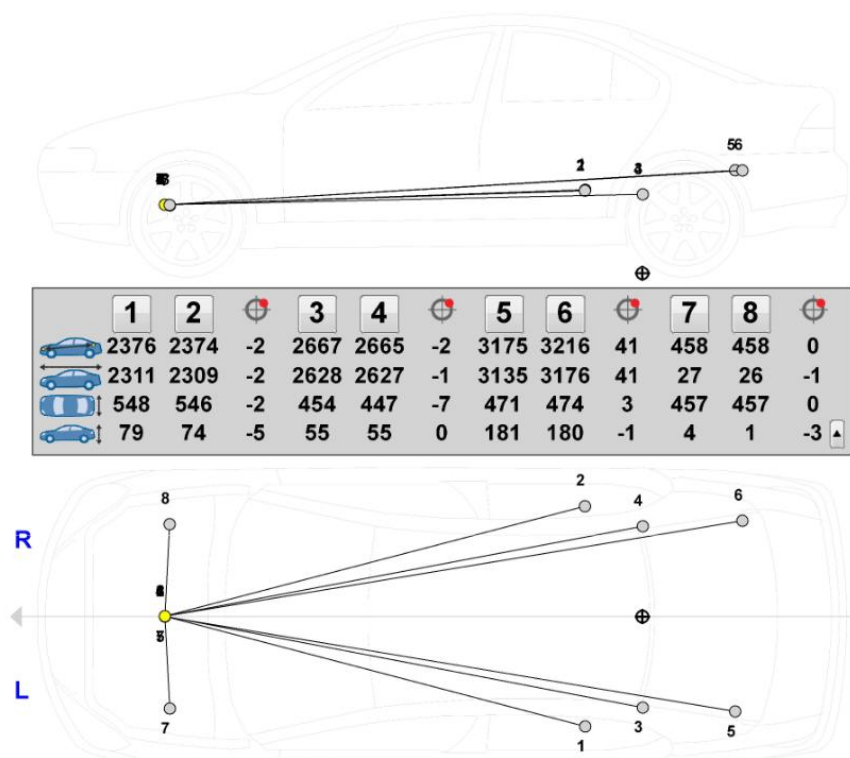


	1	2		3	4		5	6		7	8	
	914	913	-1	696	695	-1	1012	1013	1	1442	1439	-3
	836	836	0	598	596	-2	920	920	0	1393	1390	-3
	365	364	-1	355	357	2	415	419	4	371	371	0
	51	52	1	22	18	-4	69	67	-2	29	29	0



Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-06
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER	Typ _	
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	VIN Opel_CorsaB_AHK_15kmh	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	Kilometer	
E-Mail		Kennzeichen		
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-06-2	Startdatum 2026-07-06	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-06	
E-Mail		Unterschrift _____		



Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	

Zusammenfassung – 15 km/h AHK:

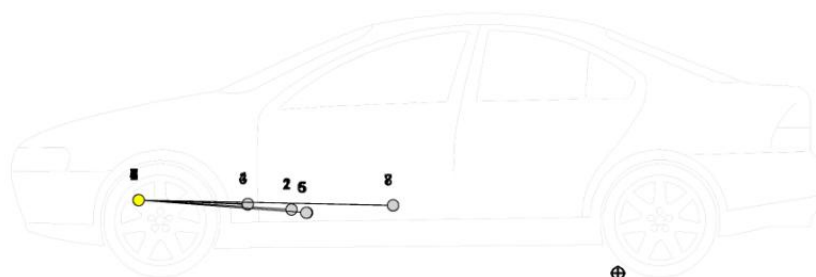
Die folgende Tabelle D. 4 fasst die Karosserievermessungskordinaten der 15 km/h Messung von dem Fahrzeug mit Anhängerkupplung zusammen:

Tabelle D. 4: Zusammenfassung Koordinaten Karosserievermessung, AHK, 15 km/h

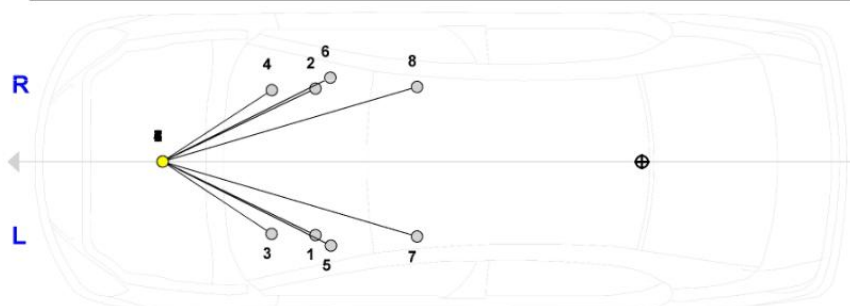
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fahrerseite										
Direktlänge	458	696	914	1012	1442	2376	2667	3175	3378	3509
x	27	598	836	920	1393	2311	2628	3135	3334	3499
y	457	355	365	415	371	548	454	471	513	103
z	4	22	51	69	29	79	55	181	184	239
Beifahrer- seite										
Direktlänge	458	695	913	1013	1439	2374	2665	3216	3380	3507
x	26	596	836	920	1390	2309	2627	3176	3337	3498
y	457	357	364	419	371	546	447	474	507	100
z	1	18	52	67	29	74	55	180	182	237
Differenz										
Direktlänge	0	-1	-1	1	-3	-2	-2	41	2	-2
x	-1	-2	0	0	-3	-2	-1	41	3	-1
y	0	2	-1	4	0	-2	-7	3	-6	-3
z	-3	-4	1	-2	0	-5	0	-1	-2	-2

D.4 Karosserievermessung Fahrzeug mit AÖ – Vorvermessung

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-13
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER	Typ _	
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	VIN Opel_CorsaB_Abschleppöse	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	Kilometer	
E-Mail		Kennzeichen		
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-13-1	Startdatum 2026-07-13	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-13	
E-Mail		Unterschrift _____		

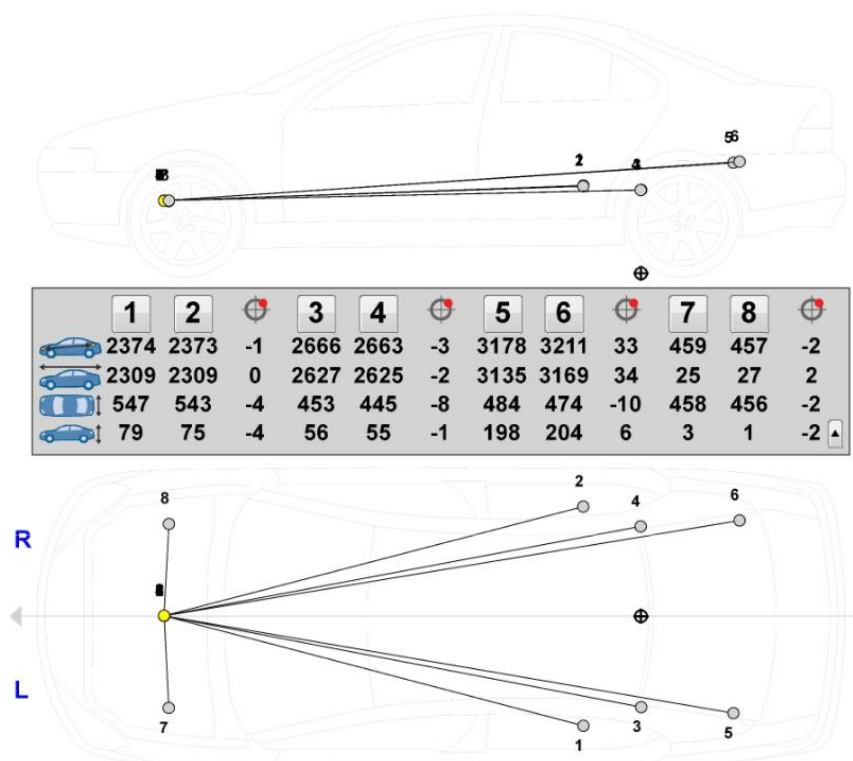


1	2	3	4	5	6	7	8
914	913	-1	696	695	-1	1014	1011
837	837	0	597	598	1	922	919
365	361	-4	358	353	-5	417	415
49	49	0	23	20	-3	66	66



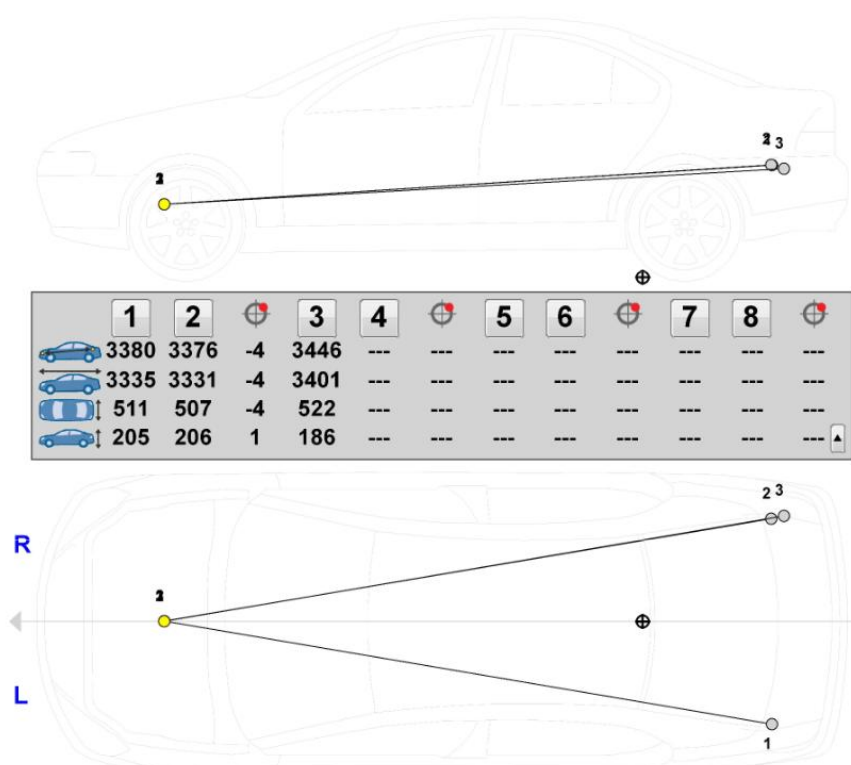
Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-13
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER	Typ _	
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	VIN Opel_CorsaB_Abschleppöse	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	Kilometer	
E-Mail		Kennzeichen		
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-13-1	Startdatum 2026-07-13	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-13	
E-Mail		Unterschrift _____		



Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-13
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER	Typ _	
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	VIN Opel_CorsaB_Abschleppöse	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	Kilometer	
E-Mail		Kennzeichen		
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-13-1	Startdatum 2026-07-13	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-13	
E-Mail		Unterschrift _____		



Karosseriewerkstatt Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	Anmerkungen
---	--------------------

Zusammenfassung - Vorvermessung AÖ:

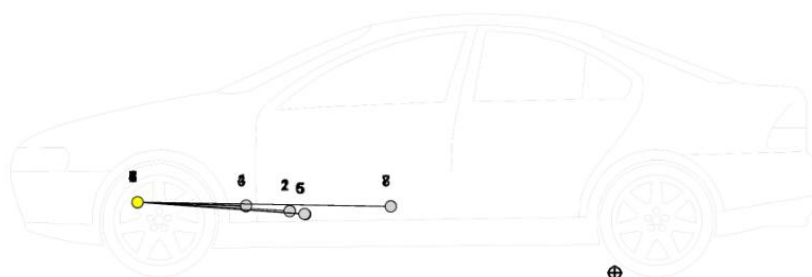
Die folgende Tabelle D. 5 fasst die Karosserievermessungskordinaten der Vorvermessung von dem Fahrzeug mit Abschleppöse zusammen:

Tabelle D. 5: Zusammenfassung Koordinaten Karosserievermessung, AÖ, Vorvermessung

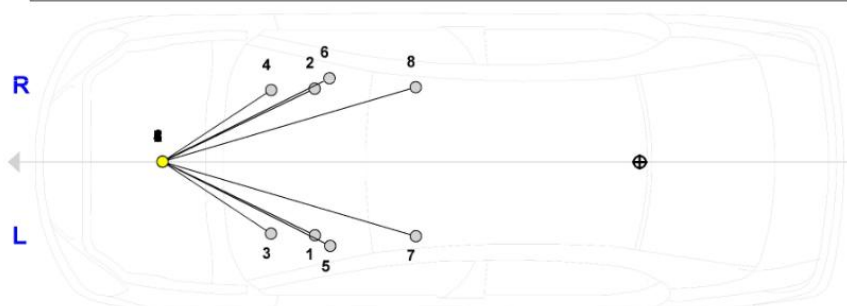
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fahrerseite										
Direktlänge	459	696	914	1014	1444	2374	2666	3178	3380	-
x	25	597	837	922	1395	2309	2627	3135	3335	-
y	458	358	365	417	371	547	453	484	511	-
z	3	23	49	66	28	79	56	198	205	-
Beifahrerseite										
Direktlänge	457	695	913	1011	1443	2373	2663	3211	3376	3446
x	27	598	837	919	1394	2309	2625	3169	3331	3401
y	456	353	361	415	370	543	445	474	507	522
z	1	20	49	66	27	75	55	204	206	186
Differenz										
Direktlänge	-2	-1	-1	-3	-1	-1	-3	33	-4	-
x	2	1	0	-3	-1	0	-2	34	-4	-
y	-2	-5	-4	-2	-1	-4	-8	-10	-4	-
z	-2	-3	0	0	-1	-4	-1	6	1	-

D.5 Karosserievermessung Fahrzeug mit AÖ – nach 5 km/h

Car-O-Liner Vision2 X2				2.12.0.124
Streckenmessung Diagnose Bericht				2026-07-13
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER	Typ _	
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	VIN Opel_CorsaB_Abschleppöse_5kmh	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	Kilometer	
E-Mail		Kennzeichen		
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-13-2	Startdatum 2026-07-13	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-13	
E-Mail		Unterschrift _____		

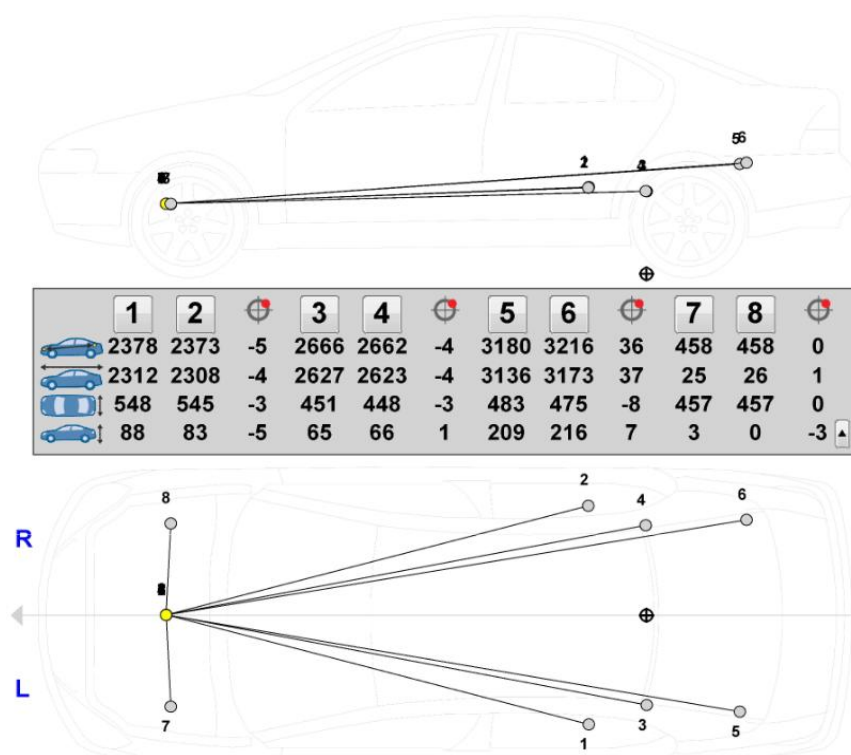


	1	2		3	4		5	6		7	8	
	916	914	-2	696	696	0	1016	1010	-6	1442	1441	-1
	838	837	-1	597	598	1	923	919	-4	1394	1393	-1
	366	363	-3	357	356	-1	419	414	-5	370	370	0
	45	47	2	21	17	-4	63	61	-2	21	23	2



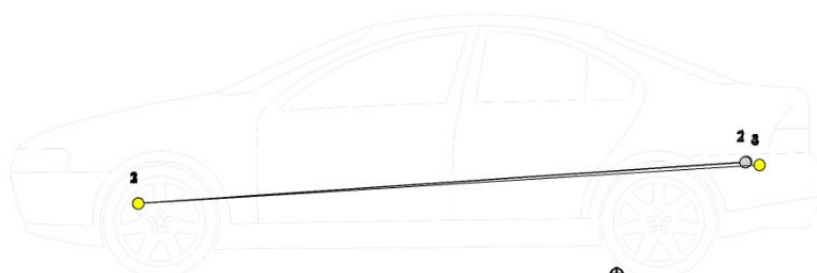
Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	

Car-O-Liner Vision2 X2				2.12.0.124
Streckenmessung Diagnose Bericht				2026-07-13
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER		
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	Typ _	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	VIN Opel_CorsaB_Abschleppöse_Skmh	
E-Mail		Kennzeichen	Kilometer	
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-13-2	Startdatum 2026-07-13	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-13	
E-Mail		Unterschrift _____		

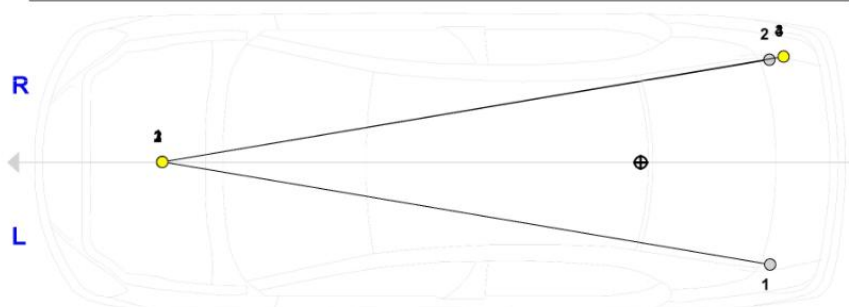


Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-13
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER	Typ _	
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	VIN Opel_CorsaB_Abschleppöse_5kmh	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	Kilometer	
E-Mail		Kennzeichen		
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-13-2	Startdatum 2026-07-13	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-13	
E-Mail		Unterschrift _____		



	1	2		3	4		5	6		7	8	
	3382	3378	-4	3456	---	---	---	---	---	---	---	---
	3336	3333	-3	3410	---	---	---	---	---	---	---	---
	509	507	-2	522	---	---	---	---	---	---	---	---
	217	215	-2	201	---	---	---	---	---	---	---	---



Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	

Zusammenfassung – 5 km/h AÖ:

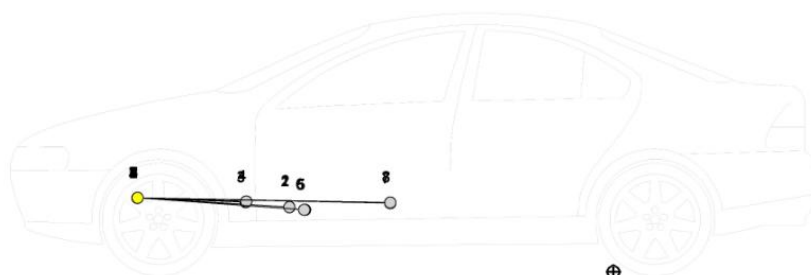
Die folgende Tabelle D. 6 fasst die Karosserievermessungskordinaten der 5 km/h Messung von dem Fahrzeug mit Abschleppöse zusammen:

Tabelle D. 6: Zusammenfassung Koordinaten Karosserievermessung, AÖ, 5 km/h

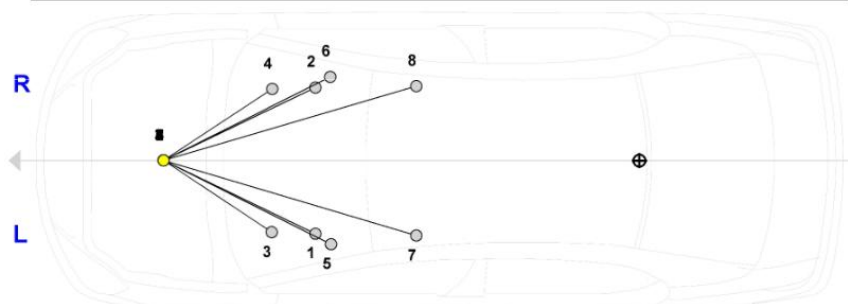
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fahrerseite										
Direktlänge	458	696	916	1016	1442	2378	2666	3180	3382	-
x	25	597	838	923	1394	2312	2627	3136	3336	-
y	457	357	366	419	370	548	451	483	509	-
z	3	21	45	63	21	88	65	209	217	-
Beifahrer- seite										
Direktlänge	458	696	914	1010	1441	2373	2662	3216	3378	3456
x	26	598	837	919	1393	2308	2623	3173	3333	3410
y	457	356	363	414	370	545	448	475	507	522
z	0	17	47	61	23	83	66	216	215	201
Differenz										
Direktlänge	0	0	-2	-6	-1	-5	-4	36	-4	-
x	1	1	-1	-4	-1	-4	-4	37	-3	-
y	0	-1	-3	-5	0	-3	-3	-8	-2	-
z	-3	-4	2	-2	2	-5	1	7	-2	-

D.6 Karosserievermessung Fahrzeug mit AÖ – nach 15 km/h

Car-O-Liner Vision2 X2				2.12.0.124
Streckenmessung Diagnose Bericht				2026-07-13
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER		
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	Typ _	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	VIN Opel_CorsaB_AÖ_15kmh	
E-Mail		Kennzeichen	Kilometer	
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-13-3	Startdatum 2026-07-13	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-13	
E-Mail		Unterschrift _____		

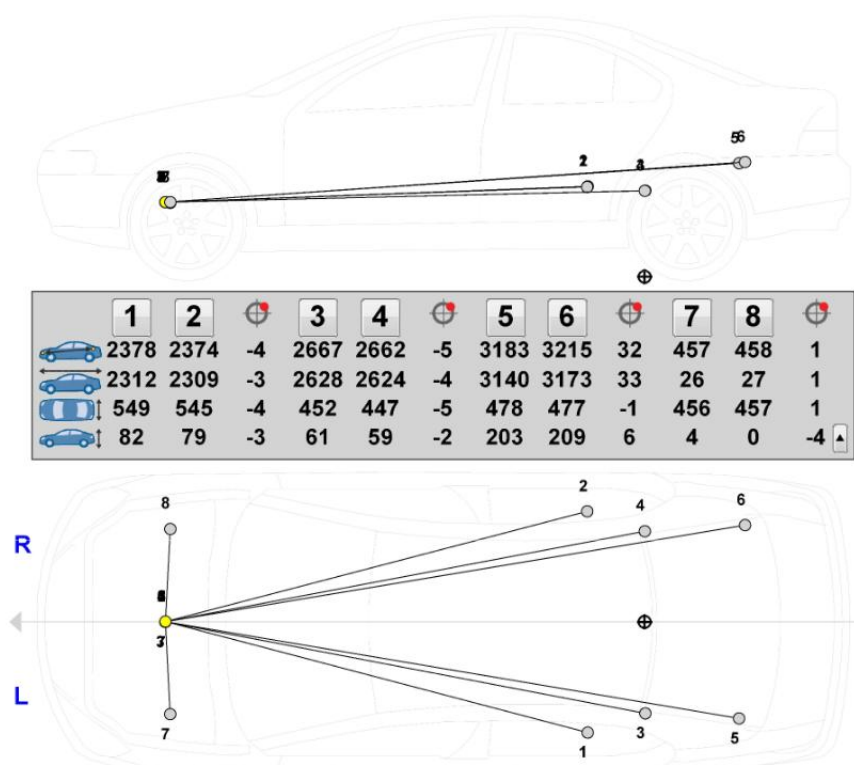


	1	2		3	4		5	6		7	8	
	914	914	0	696	697	1	1015	1011	-4	1443	1442	-1
	837	837	0	597	599	2	923	919	-4	1393	1393	0
	365	363	-2	358	356	-2	417	416	-1	374	370	-4
	49	49	0	22	19	-3	63	63	0	28	25	-3



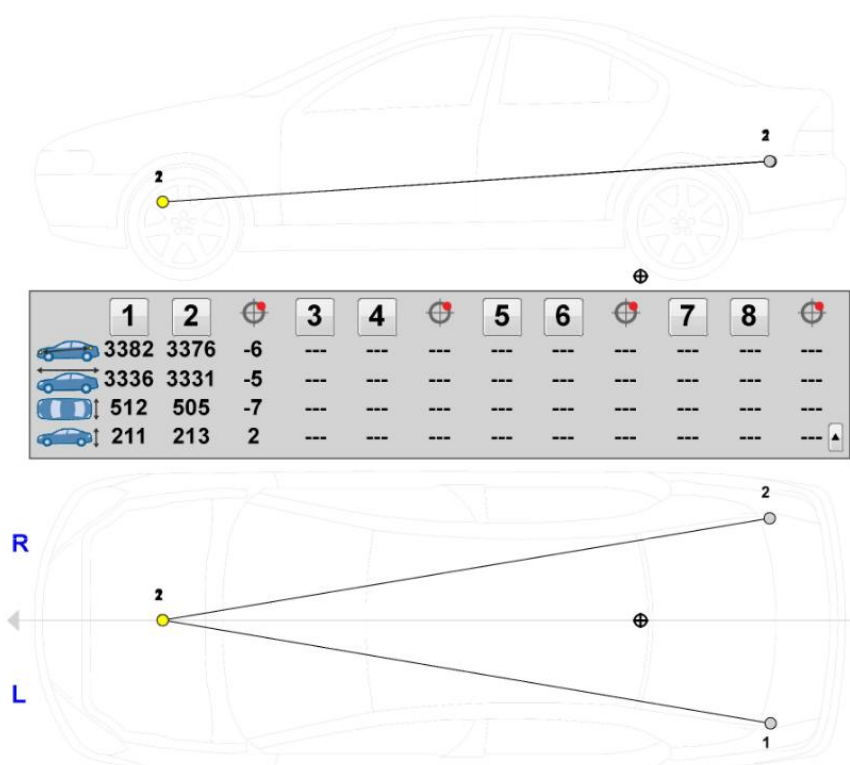
Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-13
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER	Typ _	
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	VIN Opel_CorsaB_AÖ_15kmh	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	Kilometer	
E-Mail		Kennzeichen		
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-13-3	Startdatum 2026-07-13	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-13	
E-Mail		Unterschrift _____		



Karosseriewerkstatt	Anmerkungen
Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	

Car-O-Liner Vision2 X2 Streckenmessung Diagnose Bericht				2.12.0.124 2026-07-13
Kunde		Fahrzeug		
Name		Datenblatt 123:001	Problem 2003-02-01	
Adresse		Hersteller _CAROLINER		
Stadt	PLZ	Modell Empty data sheet	Typ _	
Bundesland	Telefon	Baujahr 2000-	VIN Opel_CorsaB_AÖ_15kmh	
E-Mail		Kennzeichen	Kilometer	
Versicherung		Auftrag		
Versicherungsgesellschaft	Anspruch-Nr.	Arbeitsauftrag 2026-07-13-3	Startdatum 2026-07-13	
Regulierer	Telefon	Techniker	Enddatum 2026-07-13	
E-Mail		Unterschrift _____		



Karosseriewerkstatt Unternehmen Westsächsische Hochschule Zwickau Adresse August-Horch-Bau Stadt Zwickau PLZ 08056 Bundesland Sachsen Telefon +49 375 5363824 E-Mail guido.bau@fh-zwickau.de	Anmerkungen
---	--------------------

Zusammenfassung – 15 km/h AÖ:

Die folgende Tabelle D. 7 fasst die Karosserievermessungskordinaten der 15 km/h Messung von dem Fahrzeug mit Abschleppöse zusammen:

Tabelle D. 7: Zusammenfassung Koordinaten Karosserievermessung, AÖ, 15 km/h

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fahrerseite										
Direktlänge	457	696	914	1015	1443	2378	2667	3183	3382	-
x	26	597	837	923	1393	2312	2628	3140	3336	-
y	456	358	365	417	374	549	452	478	512	-
z	4	22	49	63	28	82	61	203	211	-
Beifahrer- seite										
Direktlänge	458	697	914	1011	1442	2374	2662	3215	3376	-
x	27	599	837	919	1393	2309	2624	3173	3331	-
y	457	356	363	416	370	545	447	477	505	-
z	0	19	49	63	25	79	59	209	213	-
Differenz										
Direktlänge	1	1	0	-4	-1	-4	-5	32	-6	-
x	1	2	0	-4	0	-3	-4	33	-5	-
y	1	-2	-2	-1	-4	-4	-5	-1	-7	-
z	-4	-3	0	0	-3	-3	-2	6	2	-

E. Protokolle – Achsvermessung

E.1 Achsvermessung Fahrzeug mit AHK – Vorvermessung

Messprotokoll

PKW Standardvermessung

Bosch © * SL - Bosch

M * R+ * * OK * EU / 44.00 / 106931 / C

Datum: 30.06.2026 14:42:26

Version (Programm)
v5.0b3225/v5.0b3225

Version (FWA)
v5.0b1801

Version (Solldaten)
Cars and Vans EU v44.00

Seriennummer
LZ0000994

Letzter Service
20.08.2020



BOSCH

Westfälische Hochschule Zwickau
Scheffelstr. 39
08066 Zwickau
August Horch Bau Kfz
Raum 9 114

Kunde

Fahrzeug Auftrag

Fahrzeug: Cars and Vans EU v44.00

OPEL * Corsa-B * Produktion: 1993 - 2000 * Servolenkung: ohne Servolenkung

Hinterachse		Eingangsvermessung	Sollwerte	Ausgangsvermessung
Sturz	links	-1°10'	-0°30' [-1°30'] +0°30'	-1°11'
	rechts	-1°30'		-1°30'
Sturz max.Differenz		+0°20'	[0°30']	+0°19'
Einzelspur	links	+0°01'	-0°07' [+0°05'] +0°15'	+0°01'
	rechts	+0°09'		+0°09'
Einzelspur max.Differenz		-0°08'	[0°15']	-0°08'
Gesamtspur		+0°09'	-0°15' [+0°10'] +0°30'	+0°10'
Radversatz		+0°02'		+0°02'
Fahrachswinkel		+0°04'		+0°04'
Vorderachse		Eingangsvermessung	Sollwerte	Ausgangsvermessung
Nachlauf 20°	links	+1°27'	-1°00' [+1°50'] +1°00'	+1°25'
	rechts	+1°28'		+1°25'
Spreizung 20°	links	+13°56'		+13°56'
	rechts	+14°13'		+14°18'
Spurdifferenzwinkel	links	-1°27'	-0°45' [-1°25'] +0°45'	-1°40'
	rechts	-0°47'		-1°08'
Sturz	links	-0°17'	-0°45' [-0°25'] +0°45'	-0°17'
	rechts	-0°22'		-0°22'
Sturz max.Differenz		+0°05'	[1°00']	+0°05'
Einzelspur	links	+0°10'	-0°05' [-0°05'] +0°05'	+0°12'
	rechts	+0°09'		+0°01'
Gesamtspur		+0°19'	-0°10' [-0°10'] +0°10'	+0°13'
Radversatz		+0°01'		+0°01'
Eingeschlossener Winkel 20°	links	+13°40'		+13°39'
	rechts	+13°50'		+13°52'
Max.Linkseinschlag	links	+35°59'		+35°24'
	rechts	+31°25'		+31°27'
Max.Rechtseinschlag	links	+31°33'		+31°55'
	rechts	+36°45'		+36°38'

E.2 Achsvermessung Fahrzeug mit AHK – nach 5 km/h

Messprotokoll

PKW Standardvermessung

Bosch © * SL - Bosch

M * R+ ** OK * EU / 44.00 / 106931 / C

Datum: 06.07.2026 11:44:39


BOSCH

Version (Programm) v5.0b3225/v5.0b3225	Version (FWA) v5.0b1801	Version (Solldaten) Cars and Vans EU v44.00	Seriennummer LZ0000994	Letzter Service 20.08.2020
---	----------------------------	--	---------------------------	-------------------------------

Westfälische Hochschule Zwickau
Scheffelstr. 39
08066 Zwickau
August Horch Bau Kfz
Raum 9 114

Kunde

Fahrzeug Auftrag

Fahrzeug: Cars and Vans EU v44.00

OPEL * Corsa-B * Produktion: 1993 - 2000 * Servolenkung: ohne Servolenkung

Hinterachse		Eingangsvermessung	Sollwerte	Ausgangsvermessung	
Sturz	links	-1°10'	-0°30' [-1°30'] +0°30'		
	rechts	-1°33'			
Sturz max.Differenz		+0°23'	[0°30']		
Einzelspur	links	+0°01'	-0°07' [+0°05'] +0°15'		
	rechts	+0°09'			
Einzelspur max.Differenz		-0°07'	[0°15']		
Gesamtspur		+0°10'	-0°15' [+0°10'] +0°30'		
Radversatz		-0°02'			
Fahrachswinkel		+0°03'			
Vorderachse		Eingangsvermessung	Sollwerte	Ausgangsvermessung	
Nachlauf 20°	links	+1°14'	-1°00' [+1°50'] +1°00'	+1°15'	
	rechts	+1°23'		+1°24'	
Spreizung 20°	links	+14°11'			
	rechts	+15°17'			
Spurdifferenzwinkel	links	-1°33'	-0°45' [-1°25'] +0°45'		
	rechts	-0°53'			
Sturz	links	-0°17'	-0°45' [-0°25'] +0°45'		-0°18'
	rechts	-0°28'			-0°22'
Sturz max.Differenz		+0°11'	[1°00']	+0°04'	
Einzelspur	links	+0°20'	-0°05' [-0°05'] +0°05'		
	rechts	+0°07'			
Gesamtspur		+0°26'	-0°10' [-0°10'] +0°10'		
Radversatz		+0°00'			
Eingeschlossener Winkel 20°	links	+13°52'			
	rechts	+14°52'			
Max.Linkseinschlag	links	+32°34'			
	rechts	+29°11'			
Max.Rechtseinschlag	links	+31°29'			
	rechts	+37°17'			

E.3 Achsvermessung Fahrzeug mit AHK – nach 15 km/h

Messprotokoll

PKW Standardvermessung

Bosch © * SL - Bosch

M * R+ * * OK * EU / 44.00 / 106931 / C

Datum: 06.07.2026 13:23:03



BOSCH

Version (Programm)
v5.0b3225/v5.0b3225

Version (FWA)
v5.0b1801

Version (Solldaten)
Cars and Vans EU v44.00

Seriennummer
LZ0000994

Letzter Service
20.08.2020

Westfälische Hochschule Zwickau
Scheffelstr. 39
08066 Zwickau
August Horch Bau Kfz
Raum 9 114

Kunde

Fahrzeug Auftrag

Fahrzeug: Cars and Vans EU v44.00

OPEL * Corsa-B * Produktion: 1993 - 2000 * Servolenkung: ohne Servolenkung

Hinterachse		Eingangsvermessung	Sollwerte	Ausgangsvermessung
Sturz	links rechts	-1°08' -1°36'	-0°30' [-1°30'] +0°30'	
Sturz max.Differenz		+0°27'	[0°30']	
Einzelspur	links rechts	+0°07' +0°07'	-0°07' [+0°05'] +0°15'	
Einzelspur max.Differenz		+0°01'	[0°15']	
Gesamtspur		+0°14'	-0°15' [+0°10'] +0°30'	
Radversatz		+0°01'		
Fahrachswinkel		+0°00'		
Vorderachse		Eingangsvermessung	Sollwerte	Ausgangsvermessung
Nachlauf 20°	links rechts	+1°33' +1°35'	-1°00' [+1°50'] +1°00'	+1°33' +1°36'
Spreizung 20°	links rechts	+13°54' +14°13'		
Spurdifferenzwinkel	links rechts	-1°27' -0°37'	-0°45' [-1°25'] +0°45'	
Sturz	links rechts	-0°10' -0°29'	-0°45' [-0°25'] +0°45'	-0°14' -0°27'
Sturz max.Differenz		+0°19'	[1°00']	+0°13'
Einzelspur	links rechts	+0°12' +0°08'	-0°05' [-0°05'] +0°05'	
Gesamtspur		+0°20'	-0°10' [-0°10'] +0°10'	
Radversatz		+0°01'		
Eingeschlossener Winkel 20°	links rechts	+13°45' +13°39'		
Max.Linkseinschlag	links rechts	+36°04' +31°28'		
Max.Rechtseinschlag	links rechts	+31°46' +36°43'		

E.4 Achsvermessung Fahrzeug mit AÖ – Vorvermessung

Messprotokoll

PKW Standardvermessung

Bosch © * SL - Bosch

M * R+ * * OK * EU / 44.00 / 106931 / C

Datum: 13.07.2026 11:04:11

Version (Programm)
v5.0b3225/v5.0b3225

Version (FWA)
v5.0b1801

Version (Solldaten)
Cars and Vans EU v44.00

Seriennummer
LZ0000994

Letzter Service
20.08.2020



BOSCH

Westfälische Hochschule Zwickau
Scheffelstr. 39
08066 Zwickau
August Horch Bau Kfz
Raum 9 114

Kunde

Fahrzeug

Auftrag

Fahrzeug: Cars and Vans EU v44.00

OPEL * Corsa-B * Produktion: 1993 - 2000 * Servolenkung: ohne Servolenkung

Hinterachse		Eingangsvermessung	Sollwerte
Sturz	links	-1°33'	-0°30' [-1°30'] +0°30'
	rechts	-1°17'	
Sturz max.Differenz		-0°16'	[0°30']
Einzelspur	links	+0°05'	-0°07' [+0°05'] +0°15'
	rechts	+0°01'	
Einzelspur max.Differenz		+0°03'	[0°15']
Gesamtspur		+0°06'	-0°15' [+0°10'] +0°30'
Radversatz		+0°00'	
Fahrrachswinkel		-0°02'	
Vorderachse		Eingangsvermessung	Sollwerte
Nachlauf 20°	links	+1°26'	-1°00' [+1°50'] +1°00'
	rechts	+2°02'	
Spreizung 20°	links	+13°53'	
	rechts	+13°52'	
Spurdifferenzwinkel	links	-1°37'	-0°45' [-1°25'] +0°45'
	rechts	-1°03'	
Sturz	links	-0°12'	-0°45' [-0°25'] +0°45'
	rechts	+0°12'	
Sturz max.Differenz		-0°25'	[1°00']
Einzelspur	links	+0°03'	-0°05' [-0°05'] +0°05'
	rechts	+0°00'	
Gesamtspur		+0°03'	-0°10' [-0°10'] +0°10'
Radversatz		+0°10'	
Eingeschlossener Winkel 20°	links	+13°41'	
	rechts	+14°05'	
Max.Linkseinschlag	links	+36°10'	
	rechts	+31°51'	
Max.Rechtseinschlag	links	+32°09'	
	rechts	+38°14'	

E.5 Achsvermessung Fahrzeug mit AÖ – nach 5 km/h

Messprotokoll

PKW Standardvermessung

Bosch © * SL - Bosch

M * R+ ** OK * / 44.00 // C

Datum: 13.07.2026 13:08:36



BOSCH

Version (Programm)
v5.0b3225/v5.0b3225

Version (FWA)
v5.0b1801

Version (Solldaten)

Seriennummer
LZ0000994

Letzter Service
20.08.2020

Westfälische Hochschule Zwickau
Scheffelstr. 39
08066 Zwickau
August Horch Bau Kfz
Raum 9 114

Kunde

Fahrzeug

Auftrag

Fahrzeug:

Hinterachse		Eingangsvermessung	Sollwerte	Ausgangsvermessung
Sturz	links	-1°31'		
	rechts	-1°20'		
Einzelspur	links	+0°05'		
	rechts	+0°00'		
Gesamtspur		+0°04'		
Radversatz		+0°02'		
Fachswinkel		-0°02'		
Vorderachse		Eingangsvermessung	Sollwerte	Ausgangsvermessung
Nachlauf 20°	links	+1°20'		+1°19'
	rechts	+1°54'		+1°54'
Spreizung 20°	links	+13°47'		
	rechts	+14°08'		
Spurdifferenzwinkel	links	-1°30'		
	rechts	-1°04'		
Sturz	links	-0°15'		-0°14'
	rechts	+0°06'		+0°09'
Einzelspur	links	+0°01'		
	rechts	+0°06'		
Gesamtspur		+0°07'		
Radversatz		+0°11'		
Eingeschlossener Winkel 20°	links	+13°35'		
	rechts	+14°14'		
Max.Linkseinschlag	links	+36°54'		
	rechts	+31°54'		
Max.Rechtseinschlag	links	+32°41'		
	rechts	+38°50'		

E.6 Achsvermessung Fahrzeug mit AÖ – nach 15 km/h

Messprotokoll

PKW Standardvermessung

Bosch © * SL - Bosch

M * R+ * * OK * EU / 44.00 / 106931 / C

Datum: 13.07.2026 14:33:52

Version (Programm)
v5.0b3225/v5.0b3225

Version (FWA)
v5.0b1801

Version (Solldaten)
Cars and Vans EU v44.00

Seriennummer
LZ0000994

Letzter Service
20.08.2020



BOSCH

Westfälische Hochschule Zwickau
Scheffelstr. 39
08066 Zwickau
August Horch Bau Kfz
Raum 9 114

Kunde

Fahrzeug

Auftrag

Fahrzeug: Cars and Vans EU v44.00

OPEL * Corsa-B * Produktion: 1993 - 2000 * Servolenkung: ohne Servolenkung

Hinterachse		Eingangsvermessung	Sollwerte	Ausgangsvermessung
Sturz	links	-1°32'	-0°30' [-1°30'] +0°30'	
	rechts	-1°16'		
Sturz max.Differenz		-0°16'	[0°30']	
Einzelspur	links	+0°09'	-0°07' [+0°05'] +0°15'	
	rechts	-0°06'		
Einzelspur max.Differenz		+0°15'	[0°15']	
Gesamtspur		+0°03'	-0°15' [+0°10'] +0°30'	
Radversatz		+0°03'		
Fahrachswinkel		-0°08'		
Vorderachse		Eingangsvermessung	Sollwerte	Ausgangsvermessung
Nachlauf 20°	links	+1°23'	-1°00' [+1°50'] +1°00'	+1°23'
	rechts	+1°58'		+1°58'
Spreizung 20°	links	+14°03'		
	rechts	+13°49'		
Spurdifferenzwinkel	links	-1°41'	-0°45' [-1°25'] +0°45'	
	rechts	-1°04'		
Sturz	links	+0°01'	-0°45' [-0°25'] +0°45'	+0°02'
	rechts	+0°05'		+0°03'
Sturz max.Differenz		-0°04'	[1°00']	-0°01'
Einzelspur	links	+0°05'	-0°05' [-0°05'] +0°05'	
	rechts	+0°01'		
Gesamtspur		+0°06'	-0°10' [-0°10'] +0°10'	
Radversatz		+0°19'		
Eingeschlossener Winkel 20°	links	+14°05'		
	rechts	+13°50'		
Max.Linkseinschlag	links	+35°44'		
	rechts	+31°42'		
Max.Rechtseinschlag	links	+29°37'		
	rechts	+34°44'		