

**Abschlussbericht**

Forschungsprojekt FE 82.0543/2012

# **Lang-Lkw: Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt**

Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen

Autoren:  
Dipl.-Ing. Alexander Süßmann  
Dipl.-Ing. Armin Förg  
Dipl.-Ing. Andreas Wenzelis

15. Januar 2014



Technische Universität München  
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik



## Inhalt

	4.2	Stand der Wissenschaft und Technik .....	25
	4.3	Methodisches Vorgehen .....	25
	4.4	Ergebnisse .....	26
<b>1</b>	<b>Übergeordnete Problemstellung und Zielsetzung .....</b>		<b>3</b>
<b>2</b>	<b>AP 1 – Fahrzeugbegutachtung und Dokumentation .....</b>		<b>4</b>
2.1	Problemstellung und Zielsetzung .....		4
2.2	Methodisches Vorgehen.....		4
2.3	Zur Verfügung gestellte Informationen.....		4
2.4	Fahrzeuge und Abmessungen .....		5
2.5	Technische Anforderungen .....		6
2.6	Kombinierter Verkehr (KV) .....		8
2.6.1	ISO-Container und Wechselbrücken ..		9
2.6.2	Verladbare Sattelanhänger .....		9
2.6.3	Transport des gesamten Lang-Lkw (begleiteter Verkehr) .....		10
2.6.4	Ausführungsvarianten bei teilnehmenden Fahrzeugen .....		10
2.7	Achslastüberwachung .....		11
2.7.1	Problemstellung und Zielsetzung .....		11
2.7.2	Stand der Wissenschaft und Technik .....		11
2.7.3	Methodisches Vorgehen .....		12
2.7.4	Ergebnisse .....		12
2.8	Sichtprobleme für Fahrzeugführer .....		14
2.8.1	Problemstellung und Zielsetzung .....		14
2.8.2	Stand der Wissenschaft und Technik .....		14
2.8.3	Methodisches Vorgehen .....		15
2.8.4	Ergebnisse .....		15
<b>3</b>	<b>AP 2 – Untersuchung der Ausnutzung des BO-Kraftkreises .....</b>		<b>17</b>
3.1	Problemstellung und Zielsetzung .....		17
3.2	Stand der Wissenschaft und Technik.....		17
3.3	Methodisches Vorgehen.....		18
3.3.1	Analytische Berechnung des Kurvenlaufverhaltens .....		18
3.3.2	Fahrzeugbegutachtung .....		18
3.4	Ergebnisse .....		19
3.4.1	Auswertung der Gutachten .....		19
3.4.2	Auswirkungen verschiedener Varianten zur Bestimmung der überstrichenen Kreisringbreite .....		22
<b>4</b>	<b>AP 3 - Analyse der Bremsverzögerung und des Bremsansprechverhaltens .....</b>		<b>25</b>
4.1	Problemstellung und Zielsetzung .....		25
<b>5</b>	<b>AP 4 - Analytische Untersuchung von Windstabilität und mögliche Sogwirkung auf Zweiräder .....</b>		<b>28</b>
5.1	Problemstellung und Zielsetzung.....		28
5.2	Stand der Wissenschaft und Technik .....		28
5.2.1	Sogwirkung auf Zweiräder .....		28
5.2.2	Seitenwindstabilität .....		29
5.3	Methodisches Vorgehen .....		29
5.3.1	Sogwirkung auf Zweiräder .....		29
5.3.2	Seitenwindstabilität .....		31
5.4	Ergebnisse .....		31
5.4.1	Sogwirkung auf Zweiräder .....		31
5.4.2	Seitenwindstabilität .....		32
<b>6</b>	<b>AP 5 - Analytische Untersuchung der Fahrdynamik bei ausgewählten Manövern .....</b>		<b>33</b>
6.1	Problemstellung und Zielsetzung.....		33
6.2	Stand der Wissenschaft und Technik .....		33
6.3	Methodisches Vorgehen .....		35
6.3.1	Kombinationen .....		35
6.3.2	Bedatung der Fahrzeugmodelle .....		36
6.3.3	Fahrmanöver .....		37
6.4	Ergebnisse .....		38
6.4.1	Stationäre Kreisfahrt (ISO 14792) ....		38
6.4.2	Sinuslenken (ISO 14793).....		41
6.4.3	Einfacher Spurwechsel (ISO 14791) .....		45
6.4.4	Fazit .....		48
<b>7</b>	<b>AP 6 - Wirksamkeit der hinteren Kennzeichnung der Fahrzeuge und Sichtbeschränkung anderer Verkehrsteilnehmer.....</b>		<b>49</b>
7.1	Problemstellung und Zielsetzung.....		49
7.2	Stand der Wissenschaft und Technik .....		49
7.3	Methodisches Vorgehen .....		49
7.4	Ergebnisse .....		50
<b>8</b>	<b>AP 7 – Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen .....</b>		<b>51</b>
8.1	Problemstellung und Zielsetzung.....		51
8.2	Stand der Wissenschaft und Technik .....		51
8.3	Methodisches Vorgehen .....		51
8.4	Ergebnisse .....		52

---

9 Zusammenfassung.....	55
10 Anhang .....	57
11 Literatur .....	58

## 1 Übergeordnete Problemstellung und Zielsetzung

In Deutschland wird im Zeitraum vom 1. Januar 2012 bis 31. Dezember 2016 ein Feldversuch mit Lang-Lkw durchgeführt. Die im Feldversuch gemeldeten Fahrzeuge müssen den besonderen technischen Anforderungen der Verordnung über Ausnahmen von straßenverkehrsrechtlichen Vorschriften für Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge (LKWÜberStVAusV) genügen. Diese sehen neben definierten Kombinationstypen auch teilweise alternative Sicherheitssysteme sowie besondere Fahrzeugmarkierungen vor. Weitere Anforderungen umfassen beispielsweise die Tauglichkeit, Komponenten der eingesetzten Fahrzeuge im kombinierten Verkehr einsetzen zu können. Alternative Umsetzungsmöglichkeiten der genannten Anforderungen eröffnen den Fahrzeugbetreibern einen weiten Lösungsraum.

Ziel dieser Studie ist daher die Überprüfung und Dokumentation, wie die in LKWÜberStVAusV genannten technischen Anforderungen umgesetzt wurden. Hierzu wird teilweise für alle, teilweise für ausgewählte Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen bestimmten Fragestellungen nachgegangen:

- Aufteilung in Lang-Lkw-Kombinationstypen, Achsanordnung etc.
- Kurvenlaufeigenschaften nach § 32d der StVZO („BO-Kraftkreis“)
- Achslastüberwachung (Art, Genauigkeit, etc.)

Aus den Kombinations- und Umsetzungsmöglichkeiten leiten sich eine Reihe von Fragestellungen bezüglich der Fahrzeugsicherheit ab. Diese Studie umfasst daher Untersuchungen zu folgenden Aspekten:

- Fahrdynamik bei ausgewählten Manövern
- Bremsverzögerung und Bremsansprechverhalten
- Sichtprobleme für Fahrzeugführer (Kamera-Systeme am Heck des Fahrzeugs)
- Wirksamkeit der hinteren Kennzeichnung der Fahrzeugkombinationen
- mögliche Sogwirkung auf Zweiräder

Ein weiterer Punkt dieser Studie behandelt die Analyse des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO<sub>2</sub>-Emissionen der im Feldversuch eingesetzten Fahrzeuge. Ziel ist die Berechnung der sich tatsächlich einstellenden Transporteffizienz. Hierbei sowie bei den oben genannten Sicherheitsaspekten werden die im Feldversuch eingesetzten Fahr-

zeuge bzw. Fahrzeugkombinationen mit Sattel- und Lastzügen herkömmlicher Bauart verglichen.

In Arbeitspaket (AP) 1 werden Sichtprobleme für Fahrzeugführer, die Aufteilungen in Kombinationstypen, Achsanordnungen, etc. sowie die Achslastüberwachungssysteme adressiert. Hierzu werden bei der BASt eingereichte Dokumente zu am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeugen gesichtet und ausgewertet. Dies ermöglicht die Ableitung von Schwerpunkten für weitere Untersuchungen sowie gezielte Fahrzeugbegutachtungen.

AP 2 untersucht die Kurvenlaufeigenschaften der am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeugkombinationen. Basierend auf den bereitgestellten Daten werden analytische Untersuchungen durchgeführt und im Rahmen der Fahrzeugbegutachtungen mit Fahrversuchen validiert.

In AP 3 werden die Bremsverzögerung und das Bremsansprechverhalten experimentell untersucht.

In AP 4 wird der Fragestellung nach möglicher Sogwirkung auf Zweiräder in Form von CFD-Simulationen nachgegangen. Hierbei werden in einem Vergleich Lang-Lkw mit herkömmlichen Lastzügen gegenübergestellt.

Das fahrdynamische Verhalten ausgewählter Fahrzeugkombinationen in relevanten Manövern wird in AP 5 anhand von Fahrdynamiksimulationen untersucht.

In AP 6 werden durch Fragebögen die Wirksamkeit der hinteren Kennzeichnung von Lang-Lkw ermittelt und mögliche Sichtbeschränkung anderer Verkehrsteilnehmer abgefragt.

AP 7 befasst sich mit der Analyse der CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Kraftstoffverbräuche anhand von gemessenen Realverbräuchen.

Auf oben genannte Arbeitspakete und deren Durchführung wird jeweils in den folgenden Unterkapiteln näher eingegangen.

## 2 AP 1 – Fahrzeugbegutachtung und Dokumentation

### 2.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die freie Wahl unter verschiedenen Kombinationstypen (§ 3 LKWÜberStVAusV) und teilweise alternative Umsetzungsmöglichkeiten der technischen Anforderungen (§ 5 LKWÜberStVAusV) öffnen, wie einleitend bereits erwähnt, einen weiten Lösungsraum. Im Rahmen des Feldversuchs erscheint es daher untersuchenswert, welche Kombinationsmöglichkeiten Flottenbetreiber für ihre Fahrzeuge gewählt und wie sie die einzelnen technischen Anforderungen umgesetzt haben.

Schwerpunkt bei den technischen Anforderungen bilden

- die „*automatische Achslastüberwachung mit sinnfälliger Anzeige*“ nach § 5.6 LKWÜberStVAusV.
- etwaige Sichtprobleme für Fahrzeugführer. Diese stehen in Zusammenhang mit dem in § 5.11 LKWÜberStVAusV geforderten „*Kamera-Systemen am Heck des Fahrzeugs oder der Fahrzeugkombination sowie einem zugehörigen Monitor im Sichtfeld des Fahrers für die Sicht nach hinten*“.

Ziel ist die Erstellung einer Dokumentation sowie einer Zusammenfassung, welche Kombinationstypen zusammengestellt bzw. wie die technischen Anforderungen jeweils umgesetzt wurden. Alternative Möglichkeiten der Achslastüberwachung und die zum Einsatz kommenden Kamera-Systeme werden hinsichtlich ihrer Funktionalität und Genauigkeit miteinander verglichen.

### 2.2 Methodisches Vorgehen

Zur Dokumentation der Fahrzeuge bzw. Fahrzeugkombinationen wurden alle der BASt zur Verfügung gestellten Daten gesichtet, auf Vollständigkeit überprüft und der gesamte Fahrzeugbestand mit Details zu den jeweiligen Untersuchungspunkten in eine Datenbank überführt.

Auf Basis von statistischen Aussagen sowie unter Berücksichtigung noch zu akquirierender Informationen werden anschließend Schwerpunkte für Fahrzeugbegutachtungen abgeleitet. Beispielsweise gilt es bei der Aufteilung in Kombinationstypen „typische Vertreter“ sowie „Exoten“ zu identifizieren, weil im Rahmen dieser Studien nicht alle Fahrzeuge begutachtet werden können.

In der Fahrzeugbegutachtung selbst werden die Kamera-Systeme in Hinblick auf Sichtfeld, Verschmutzungsanfälligkeit und Befestigungsart untersucht. Die für die Achslast- bzw. Gesamtmasseermittlung erforderlichen Schritte werden dokumentiert. Die Genauigkeit einer Achslast- bzw. Gesamtmassenanzeige wurde auf einer Fahrzeugwaage überprüft.

Des Weiteren wurden im Rahmen der Fahrzeugbegutachtung für AP 2, welche die Untersuchung der Kurvenläufigkeit von Lang-Lkw beinhaltet, experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

Für AP 7, der Untersuchung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, wurden teilweise Ladevolumina der Fahrzeugkombinationen gemessen.

### 2.3 Zur Verfügung gestellte Informationen

Diese Studie bildet den Stand vom 15. Juli 2013 ab. Zu diesem Zeitpunkt waren 43 Lang-Lkw-Kombinationen von insgesamt 23 Speditionen registriert.

Im Rahmen des Feldversuchs sind in einem Leitfaden alle teilnehmenden Speditionen gebeten, der BASt und damit auch Forschungsnehmern Unterlagen zu Ihren Fahrzeugen zur Verfügung zu stellen (BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN 2013). So wurden zu jedem Lang-Lkw, falls vorhanden, folgende angeforderte Informationsmaterialien ausgewertet und in einer Datenbank zusammengefasst:

*„Kopien der Zulassungsbescheinigungen Teil I für alle vom Unternehmen im Feldversuch eingesetzten Einzelfahrzeuge“*

Die Zulassungsbescheinigung Teil I liefert wichtige Zahlen zu Fahrzeug und Anhänger:

- Hersteller und Typ der Fahrzeugbestandteile
- Bereifung
- Zulässige Gesamtmasse
- Zulässige Achslasten
- Abmessungen

*„Kopien des gemäß § 7 LKWÜberStVAusV geforderten Gutachtens eines amtlich anerkannten Sachverständigen für den Kraftfahrzeugverkehr für alle eingesetzten Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen“*

Aus diesem Dokument leiten sich her:

- Der Typ der Fahrzeugkombination

- Hersteller und Typ der Fahrzeugbestandteile
- Die Abstände zwischen den Achsen sowie Angaben zu deren etwaiger Lift- oder Lenkbarkeit
- Angaben über die Kurvenlaufeigenschaften des Lang-Lkw nach § 32d StVZO.
- Checkliste zur Umsetzung der technischen Anforderungen nach § 5 der Ausnahmeverordnung.

*„Angaben zu den technischen Einrichtungen gemäß § 5 der LKWÜberStVAusnV“*

Hier wurden die Spediteure gebeten, formlos Informationen zu den technischen Einrichtungen zur Verfügung zu stellen; insbesondere zu

- Punkt 3 (*„Ist eine Differenzialsperre oder die Antriebsschlupfregelung verbaut?“*)
- Punkt 6 (*„Wie erfolgt die Achslastüberwachung? Wo werden die Achslasten angezeigt?“*)
- Punkt 9 (*„Ist ein Abstandsregeltempomat oder ein Notbremsassistentensystem verbaut?“*)
- Punkt 11 (*„Was für ein Kamera-Monitor-System ist verbaut?“*)

Die gemachten Angaben umfassten beispielsweise Fahrzeugausstattungslisten, Fotos der technischen Einrichtungen.

*„Kopien der Nachweise über die Einsetzbarkeit der Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen im kombinierten Verkehr gemäß § 6 der LKWÜberStVAusnV (z. B. Herstellerangabe, Bescheinigung über Bahnverladbarkeit o.ä.),“*

Wie bei den technischen Einrichtungen liegen entweder Speditionsangaben oder Auftragsdaten vor. Dabei wurden Kodifizierungsnachweise und/oder

Hebefestigkeitsnachweise für den Taschenwagenbetrieb zugeschiedt. Bei Wechselchassis sind zugesandte oder veröffentlichte Fotos der Lang-Lkw oder Nachweise von Bahnunternehmen ausschlaggebend.

Ergänzt wurden die Unterlagen im Rahmen dieser Studie durch Informationen die in Fahrzeugbegutachtungen gewonnen werden konnten.

### **Erstellung einer Excel-Datenbank**

Aus den gesammelten Informationen entstand eine Excel-Datenbank zur vereinfachten und übersichtlichen Darstellung der wichtigsten Daten. Die Tabelle bot für die Forschungsgruppe eine zentrale Basis, aus denen Daten für weitere Berechnungen in den folgenden Kapiteln abgeleitet wurden.

## **2.4 Fahrzeuge und Abmessungen**

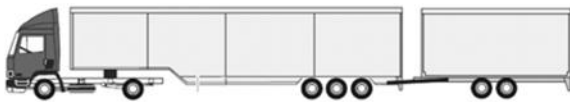
In fünf Punkten unterteilt die LKWÜberStVAusnV mögliche Kraftfahrzeug-Anhänger-Kombinationen (Bild 1). Im Unterschied zu § 32a der StVZO dürfen Lastkraftfahrzeuge zwei Anhänger in Form einer Untersetzachse und einem Sattelanhänger mitführen. Damit wird eine maximale Gesamtlänge der Fahrzeugkombination von 25,25 m ermöglicht. Möglich sind jedoch auch Lastkraftwagen mit einem *„verlängerten Anhänger bis zu einer Gesamtlänge von 24,00 Meter“* (Lastzug). Weiterhin führt die Verordnung einen weiteren Anhänger hinter einem Sattelkraftfahrzeug in Form eines *„Zentralachsanhängers ein oder einen weiteren Sattelanhänger“* ein (B-Double). Die zuvor bereits eingesetzten Sattelkraftfahrzeuge mit dem *„Verlängerter-Auflieger-Konzept“* sind nun als fünfte Kombinationsart mit einer Gesamtlänge von 17,80 m anstatt 16,50 m in die Ausnahmeverordnung integriert.

Die Fahrzeuge des Lang-Lkw Typ 3 (Lastkraftwagen mit Untersetzachse, Bild 2) bilden mit 31 von 43 Fahrzeugen den größten Anteil. Lang-Lkw vom Typ 2 (Sattelkraftfahrzeug mit Zentralachsanhänger) sind 7 Fahrzeuge zuzuordnen. Die restlichen drei Fahrzeugtypen 1, 4 und 5 sind neben ihrer geringen Anzahl jeweils nur einer einzigen Spedition zugehörig.

Für die Wahl des Lang-Lkw vom Typ 3 wurden von seiten der Spediteure als Begründung gute Eigenschaften bei Kurvenläufigkeit, Handling und Rangierfähigkeit genannt. Auch die Modularität der Fahrzeugkombination mit vorhandenen Fahrzeugkomponenten wurde hervorgehoben. Für das Betreiben der Fahrzeugkombination ist neben der Ausrüstung mit technischen Zusatzausstattungen allein der Zukauf einer Untersetzachse nötig. Auch bei der Wahl des Lang-Lkw nach Typ 2 wurde dessen Modularität als Grund genannt.



Typ 1: Sattelzugmaschine mit Sattelanhänger (Sattelkraftfahrzeug) bis zu einer Gesamtlänge von 17,80 Metern



Typ 2: Sattelkraftfahrzeug mit Zentralachsanhänger bis zu einer Gesamtlänge von 25,25 Metern



Typ 3: Lastkraftwagen mit Untersetzachse und Sattelanhänger bis zu einer Gesamtlänge von 25,25 Metern



Typ 4: Sattelkraftfahrzeug mit einem weiteren Sattelanhänger bis zu einer Gesamtlänge von 25,25 Metern



Typ 5: Lastkraftwagen mit einem Anhänger bis zu einer Gesamtlänge von 24,00 Metern

**Bild 1** Mögliche Kombinationstypen nach § 5 der LKWÜberStVAusnV.

## 2.5 Technische Anforderungen

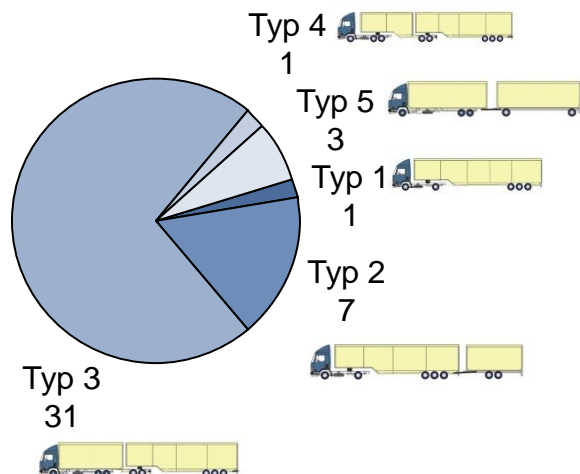
Im Folgenden werden die technischen Anforderungen nach § 5 der LKWÜberStVAusnV kurz erläutert und ein Überblick gegeben, wie diese bei dem im Rahmen des Feldversuchs eingesetzten Fahrzeugen umgesetzt wurden.

1. *Spurhalteleuchten am hinteren Ende des Anhängers mit nach vorn wirkenden weißen Leuchten nach § 51 Absatz 1 der StVZO*

Spurhalteleuchten (Bild 3) stellen bei Anhängern zulassungsseitig eine optionale Ausstattung dar, sind jedoch bei Lang-Lkw verpflichtend. Ebenso wie gelbe Begrenzungsleuchten an den Seiten des Lkw, dienen sie bei Kurvenfahrten zur Erkennung der Fahrzeugkonturen in den Rückspiegeln. Diese Anforderung wurde von allen Lang-Lkw erfüllt. Lang-Lkw vom Typ 2, 3 und 4 wurden doppelt ausgestattet, entsprechend ihrer zwei Anhänger. Bei den Fahrzeugen vom Typ 1 und 5 kommt jeweils nur ein Paar zum Einsatz.

2. *Luftfedern auf allen Achsen bis auf die Lenkachse*

„Diese Anforderung reduziert die dynamischen Achslastschwankungen und dient der Straßenschonung.“ (GLAESER 2006, S. 110). Luftfedern sorgen für einen Achslastausgleich und verteilen die Bremskraft gleichmäßig und sind im Vergleich zu den bisher verwendeten Blattfedern geräuschärmer. Für liftbare Achsen sind Luftfedern obligatorisch. Bei Fahrzeugen im Wechselbrückenverkehr ersetzen Luftfedern eine zusätzliche Hubeinrichtung (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG 2011, S. 178–179).

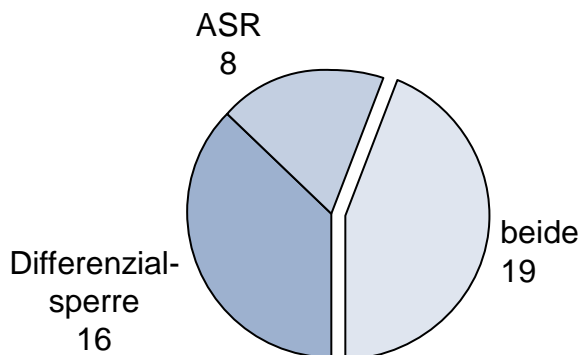


**Bild 2** Aufteilung der Lang-Lkw in Kombinationstypen

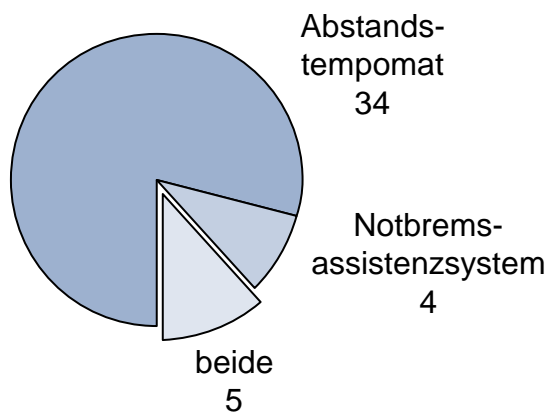




**Bild 3** Spurhalteleuchten nach § 51 Absatz 4 der StVZO



**Bild 4** Verteilung Differenzialsperre oder Antriebsschlupfregelung bei allen Lang-Lkw



**Bild 5** Verteilung Abstandstempomat oder Notbremsassistentensystem bei allen Lang-Lkw

Obwohl die Lenkachsen des Motorwagens nicht verpflichtend luftgefedert sein müssen, setzen bis auf drei Fahrzeuge alle Lang-Lkw eine Vollluftfederung ein. Sekundär soll es durch Luftfederung möglich sein, anhand des Drucks eine Achslastmessung durchzuführen.

3. *Differenzialsperre und/oder Antriebsschlupfregelung (ASR).*

Beide Sicherheitseinrichtungen sollen ein Durchdrehen der Antriebsachsen verhindern, wobei die Antriebsschlupfregelung elektronisch funktioniert und als Teil des ESP (Electronic Stability Programm) seit November 2011 in Deutschland für alle neuen Nutzfahrzeugmodelle verpflichtend ist (siehe UN/ECE Regelung Nr. 13). Im Gegensatz zur Differenzialsperre erreicht die Antriebsschlupfregelung seine Wirkung durch ein Abbremsen eines Rades, falls dieses durchdrehen sollte. Drehen beide Antriebsräder durch wird zusätzlich automatisch das Motormoment verringert. Bild 4 zeigt, welche Lösung bei den Fahrzeugen umgesetzt wurden.

4. *Elektronisch gesteuerten Bremssysteme (EBS) nach Nr. 13 UN/ECE.*

Dieser Punkt wird gesondert in Absatz 4 behandelt.

5. *Scheibenbremsen und Retarder im Zugfahrzeug.*

Diese Anforderung wurde in allen Fällen erfüllt.

6. *Automatische Achslastüberwachung mit sinnfälliger Anzeige der Achslasten für die Achsen mit Luftfederung oder der Gesamtmasse*

Dieser Punkt wird gesondert in Absatz 2.7 behandelt.

7. *Spurhaltewarnsystem*

Gängige Spurhaltewarnsysteme wie das Lane-Guard-System (LGS) von MAN oder dem Telligent-Spurassistent von Daimler erkennen Fahrspuren optisch über eine Kamera hinter der Windschutzscheibe und warnen vor einer Fahrspurüberschreitung, falls diese ohne Blinkereinsatz erfolgt. Die Systeme sind üblicherweise über 60 km/h aktiviert. Die Warnung erfolgt beispielsweise über ein akustisches Signal. Diese Anforderung wurde in allen Fällen erfüllt.

8. *Einrichtung eines elektronischen Fahrdynamikregelsystems (ESP) nach Nr. 13 UN/ECE*

Als Erweiterung von Punkt 3 und 4 bezüglich einer elektrischen Regelung fordert dieser Punkt eine allgemeine Verpflichtung der Integration der elektronischen Fahrdynamikregelung (ESP) ein. ESP ermittelt den aktuellen Zustand des Fahrzeuges und reduziert mittels Einzelregelungen der Bremsen über die elektronische Bremsregelung (Punkt 4) ein Schleudern bei der Kurvenfahrt. Diese Anforderung wurde in allen Fällen erfüllt.

9. *Abstandsregelsystem (Abstandstempomat) und/oder ein Notbremsassistentensystem*

Ein Abstandsregelsystem ermittelt über Radarsignale den Abstand und die Relativgeschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeuges. Das System regelt daraufhin die Geschwindigkeit der Lang-Lkw, sodass der geforderte Mindestabstand eingehalten wird. Die eingesetzten Produkte sind je nach Fahrzeughersteller verschieden. Die Notbremsassistentenz ist fähig, fahrende oder stehende Hindernisse zu erkennen, den Fahrer zu warnen und gegebenenfalls eine aktive Teilbremsung durchzuführen. Falls der Fahrer nicht reagiert, kann das Fahrzeug letztendlich eine Vollbremsung bis zum Stillstand des Fahrzeuges durchführen. Für eine Normierung der Notbremsassistentenz existiert derzeit eine Arbeitsgruppe der UN-ECE, die eine neue, einheitliche Regelung dazu erarbeitet. Bild 5 zeigt die Verteilung der verwendeten Systeme im Feldversuch. Die meisten Fahrzeuge verfügen über ein Abstandsregelsystem.

10. *Rückspiegel nach der aktuellen EU-Richtlinie 2003/97/EG*

Zur Verringerung des „toten Winkels“ wurde diese Richtlinie für schwere Lkw verabschiedet, welche zum Jahre 2010 die alte Richtlinie 71/127/EWG komplett ersetzen soll. Hier sind Bestimmungen zur Vergrößerung des Sichtfeldes, zusätzlichen Spiegeln, Krümmungsradien sowie erlaubte Kamera-Monitor-Systeme (siehe Punkt 11) zur indirekten Sicht enthalten. Diese Anforderung wurde in allen Fällen erfüllt.

11. *Heckkameranystem mit einem Monitor im Blickfeld des Fahrers*

Dieser Punkt wird gesondert in Absatz 2.8 behandelt.

12. *Retroreflektierende (Nr. 48 UN/ECE) Markierung der vertikalen und horizontalen Abmessungen des Fahrzeugs (Konturmarkierungen)*

Bereits für Neufahrzeuge seit 2011 verpflichtend sollen alle Fahrzeuge einer Fahrzeugkombination mit einer reflektierenden Vollkonturmarkierung in rot, gelb oder weiß hinten sowie an der Seite mit Teilkonturmarkierungen versehen werden. Teilkonturmarkierung bedeutet, dass in einem in der Regelung Nr. 48 UN/ECE definierten Abstand über dem Boden eine durchgehende Linienmarkierung sichtbar sein muss sowie jeweils an den oberen Ecken der Fahrzeugseiten über rechtwinklig angeordnete Streifen versehen sein müssen. Bei Fahrzeugen mit Wechselsystemen greift hier eine Ausnahme, bei der nur das Fahrgestell mit ei-

ner Linienmarkierung ausgestattet sein muss. In allen Fällen wurde diese Anforderung erfüllt.

13. *Reflektierendes (Nr. 70 UN/ECE) Schild am Heck mit der Aufschrift „Lang-Lkw“*

Dieser Punkt wird gesondert in Absatz 6 behandelt.

14. *Digitales EG-Kontrollgerät*

Das Kontrollgerät wurde zur Aufzeichnung der Lenkzeiten des Lkw-Fahrers in der EWG-Verordnung 3821/85 eingeführt und muss bei heutigem Stand digital und über einen Massenspeicher verfügen. Individuelle Lenkzeiten sollen regelmäßig vom digitalen Kontrollgerät (oder Fahrtenschreiber) heruntergeladen werden. Die letzte Änderung (EU Nr. 1266/2009) beinhaltet geringfügige Anpassungen bezüglich Begrifflichkeiten und Funktionen des Kontrollgeräts. In allen Fällen wurde diese Anforderung erfüllt.

## 2.6 Kombiniertes Verkehr (KV)

Die LKWÜberStVAusV fordert in § 6 eine theoretische Einsetzbarkeit der Lang-Lkw im Kombinierten Verkehr (KV) und beschreibt diesen als „Transport von Gütern in einer Ladeeinheit (Container, Wechselbrücke, Sattelanhänger mit oder ohne Zugmaschine, Lastkraftwagen, Anhänger), die mit Geräten umgeschlagen“ werden können.

Es wird im Allgemeinen unterschieden zwischen begleitetem und unbegleitetem KV. Im begleiteten KV wird das gesamte Fahrzeug auf die „Rollende Landstraße“ (RoLA) oder eine Roll-on-Roll-off-Fähre (RoRo-Fähre) verladen. Im unbegleiteten KV werden Ladeeinheiten wie Container, Wechselbehälter oder Sattelanhänger transportiert.

In einem Schreiben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) zum Lang-Lkw-Feldversuch vom 30.11.2012 wird die Einsetzbarkeit im Kombinierten Verkehr im Sinne des § 6 der LKWÜberStVAusV näher beschrieben (LEYENDECKER 2012). Demnach ist nur der unbegleitete KV zulässig. Der begleitete KV auf RoLa oder RoRo-Fähren sei praktisch nicht möglich, weil der „Einsatz von Lang-Lkw nur innerdeutsch stattfindet und ein grenzüberschreitender Einsatz der Fahrzeug bzw. Fahrzeugkombinationen nicht zulässig ist“.

Weiterhin wird erklärt, dass es für die KV-Tauglichkeit im Sinne des § 6 der LKWÜberStVAusV ausreichend sei, dass lediglich ein Teil der Fahrzeugkombination eine Ladeeinheit transportieren kann, deren Umschlag mit Geräten möglich ist.



**Bild 6** Oben: Verladung eines Containers auf ein Wechselchassis.  
Unten: Beispielhafte Verladung von Wechselbehälter

Eine Prüfung durch die BASt erfolgt hier, wie auch hinsichtlich der Einhaltung aller anderen Anforderungen aus der LKWÜberlStVAusnV, nicht.

Im Folgenden wird auf die erwähnten Möglichkeiten des KV näher eingegangen und die dafür notwendigen technischen Ausstattungen der Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen beschrieben.

### 2.6.1 ISO-Container und Wechselbrücken

Beide Ladeeinheiten, sowohl genormte Container (Bild 6, oben) wie auch Wechselbrücken (Bild 6, unten), sind bahn- und schiffsverladbare Behälter. Die Wechselbrücke, im Gegensatz zum ISO-Container, ist eine europäische Entwicklung, deren Maße auf Europaletten basieren. Die C715 Wechselbrücke (Normung nach CEN - Europäisches Komitee für Normung) fasst mit einer Länge von 7,15 m 17 Europaletten.

Für einen Transport per Schiff müssen Behälter stapelbar ausgeführt sein. Für bahn- und schiffsverladbare Behälter kann im Allgemeinen unterschieden werden zwischen:

- Standard-ISO-Container, welche wegen ihrer Stabilität und Hochseetauglichkeit grundsätzlich mehrfach stapelbar sind. Diese verfügen über vier Befestigungsbeschläge am Boden für den Transportträger sowie Eckbeschläge auf dem Dach für den vertikalen Umschlag.
- Nichtstapelbare Wechselbehälter (nach CEN 284, CEN 452). Diese werden eben-

falls über vier Befestigungsbeschläge am Boden am Transportträger arretiert und müssen für den Umschlag über Greifkanten für Greifkräne verfügen (ähnlich Bild 7). Diese Behälter können wegen ihrer Nichtstapelbarkeit nur bedingt in der Binnenschifffahrt eingesetzt werden, sind jedoch vollständig einsetzbar auf der Schiene (bei gegebener Kodifizierung).

- Stapelbare Wechselbehälter (nach CEN 13853), welche über dieselben Innenmaße wie die nichtstapelbare Version verfügen, jedoch eine ähnliche Stabilität wie ISO-Container besitzen. Die Befestigung am Transportträger ist wie bei den Vorigen, jedoch erfolgt der Umschlag wie bei ISO-Container über Eingreifen an den Eckbeschlägen auf dem Dach.

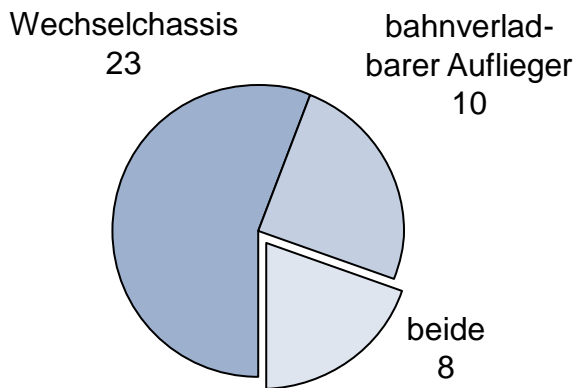
Wechselbehälter verfügen zusätzlich über Stützfüße, welche ein Abstellen und Aufnehmen der Behälter mit einem Lkw mit absenkbarem Chassis, also ohne Geräte, ermöglichen.

Für den Straßentransport aller genannten Behälter ist bei Nutzfahrzeugen ein Chassis vorzusehen, welche ebenfalls über vier Beschläge zur Befestigung der Behälter verfügt. Dabei stehen zum Sichern sogenannte Twistlocks, ein schraubenartiger Schnellverschluss, für eine transportsichere Befestigung zur Verfügung.

### 2.6.2 Verladbare Sattelanhänger

Eine weitere Möglichkeit zum Kombinierten Verkehr bildet der Transport von Sattelanhängern auf sogenannten Taschenwagen (Bild 7). Diese Waggon besitzen eine Mulde zur Arretierung der Achsen und sichern den Sattelanhänger zusätzlich über den Königszapfen ab. Diese Taschenwagen können damit alle vertikal umschlagbare Sattelanhänger mit einer Länge von 13,60 m aufnehmen bzw. 12,00 m Abstand von Königszapfen zum hinteren Ende. Verlängerte Sattelaufleger (Typ 1 nach § 3 der LKWÜberlStVAusnV) mit 14,90 m Länge, bzw. 13,30 m Abstand von Königszapfen zum hinteren Ende, können auch transportiert werden, insofern diese über einen hochklappbaren Unterfahrerschutz verfügen.

Festgehalten wird die Tauglichkeit zum vertikalen Umschlag der Sattelanhänger in einer Kodifizierung nach UIC 592. Hierzu müssen Sattelanhänger wie auch vorhergenannte Wechselbrücken über verstärkte und gelbmarkierte Greifkanten verfügen und zusätzlich ein verstärktes Chassis aufweisen.



**Bild 8** KV-Tauglichkeit: Wechselsystem oder bahnverladbarer Sattelanhänger

### 2.6.3 Transport des gesamten Lang-Lkw (begleiteter Verkehr)

Eine Möglichkeit zum Transport der gesamten Lkw besteht im RoRo-Verkehr (roll on roll off) auf dem Schiff oder mittels RoLa (Rollende Landstraße) im Bahnverkehr. Der begleitete KV ist im Rahmen des Feldversuchs irrelevant (siehe Kapitel 2.6). Die fahrzeugtechnische Ausstattung hierfür sei jedoch der Vollständigkeit halber im Folgenden kurz erläutert. Zur Ladungssicherung auf Schiffen sind am Lkw Befestigungslaschen entsprechend EN-29367-1 erforderlich (Bild 9). Zudem sind Auflieger teilweise mit einem runden Unterfahrschutz ausgestattet, welche Schäden am Koffer durch Aufsetzen der Lkw bei rauen Seebedingungen verhindern soll.

Für die Rollende Landstraße werden Niederflrwaggons genutzt, auf denen die Lkw auffahren können. Lkw-Fahrer können während des Transports auf der Schiene in gesonderten Waggons



**Bild 7** Verladung eines verlängerten Aufliegers (entsprechend Lang-Lkw Typ 1) mit hochgeklappten Unterfahrschutz auf ein Taschenwagen



**Bild 9** Befestigungslaschen für den RoRo-Verkehr

des Zuges mitfahren. Dieses Verfahren wird beispielsweise im Alpentransitverkehr genutzt, ist jedoch vorerst nicht für komplette Lang-Lkw-Kombinationen geeignet, weil Niederflrwaggons bisher nur eine maximale Länge von 18,75 m erlauben. Im RoRo-Verfahren sind aufgrund der Auf- und Abfahr- und Abfahr-richtung auf der Schiffsladefläche Fahrzeuglängen praktisch nicht limitiert.

### 2.6.4 Ausführungsvarianten bei teilnehmenden Fahrzeugen

Von den 43 betrachteten Lang-Lkw verfügen 31 über die Möglichkeit, oben genannte Behälter auf Motorwagen (26 Lang-Lkw von Typ 3, 3 von Typ 5), Zentralachsanhängern (1 von Typ 2) oder auf Sattelanhängern aufzunehmen (1 von Typ 2, 5 von Typ 3, 1 von Typ 4). Genannte Wechselsysteme können jedoch auch dazu genutzt werden, Kofferaufbauten, die weder über Greifkanten noch Eckbeschläge verfügen, auf Lang-Lkw zu befestigen. Beispielhaft zu nennen sind Kofferaufbauten zur Aufnahme von Luftfrachtcontainern im Luftfrachtersatzverkehr.

Bei 18 der 43 Kombinationen können jeweils die Sattelanhänger vertikal auf Bahn oder Schiff umgeschlagen werden.

8 Kombinationen verfügen sowohl über Sattelanhänger mit Greifkanten als auch über die Möglichkeit des Transports von Wechselbrücken oder Containern.

2 Kombinationen vom Typ 2 verfügen über keine der beiden Möglichkeiten, sind nicht schiffverladbar und wären daher lediglich ohne zweiten Anhänger für einen Transport auf der RoLa geeignet. Laut Fahrzeughersteller und Übereinstimmungsnach-

weis sind die beiden Fahrzeuge jedoch im kombinierten Verkehr einsetzbar.

## 2.7 Achslastüberwachung

### 2.7.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die LKWÜberStVAusnV schreibt in § 5 Absatz 6 eine „*automatische Achslastüberwachung mit sinnfälliger Anzeige der Achslasten für die Achsen mit Luftfederung oder der Gesamtmasse*“ vor. Dies erscheint sinnvoll; besonders vor dem Hintergrund, dass Lang-Lkw mit höheren Leergewichten und größeren Ladevolumina tendenziell anfälliger für Überladung im Sinne überschrittener Gesamtgewichte oder Achslasten sind. Mit einer sinnfälligen Anzeige der Achslasten oder der Gesamtmasse können etwaige Überladungszustände transparent gemacht werden.

Auch bei dieser technischen Anforderung standen den Teilnehmern des Lang-Lkw Feldversuchs alternative Möglichkeiten der Umsetzung zur Verfügung. Ziel war es daher, die Umsetzung einiger verbauter Systeme zu dokumentieren, um einen Überblick über verschiedene Alternativen geben zu können.

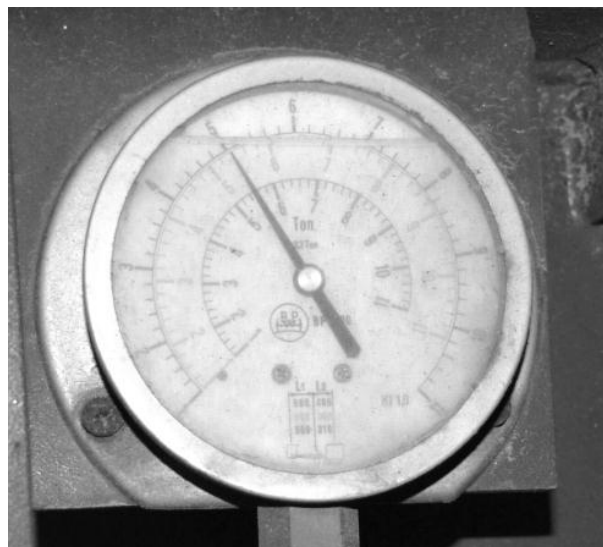
Augenmerk wurde hierbei auf Genauigkeit, Ort der Anzeige und der zur Ermittlung der Gesamtmasse erforderlichen Arbeitsschritte gelegt.

### 2.7.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Üblicherweise werden Achslasten über eine sogenannte Balgdruckmessung ermittelt. An jeder luftgefederten Achse erfassen verbaute Drucksensoren oder Manometer die Drücke in den Federbälgen. Die Drücke sind proportional zur Achslast, sodass ein Steuergerät mit Anzeige die Achslasten mittels einer Achslast-Balgendruck-Geraden berechnen und anzeigen kann.

Die Achslasten können auch über CAN-Bus an Anzeigen im Fahrerhaus übermittelt werden.

Eine weitere Alternative zur Anzeige der Achslast besteht mittels einer Skala, welche auf einem Manometer angebracht wird, das den Balgdruck misst. Im Beispiel in Bild 10 sind die Skalen von drei verschiedenen möglichen Achstypen in einer Anzeige zusammengefasst. Zum Ablesen ist es daher erforderlich zu wissen, welche Achsvariante verbaut ist.

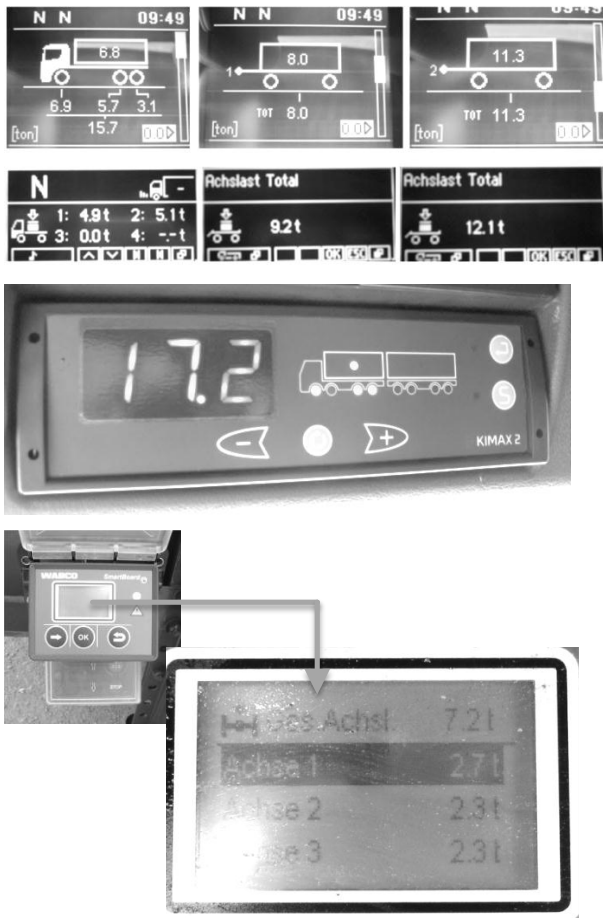


**Bild 10** Manometer mit Achslast-Beschriftung für drei unterschiedliche Achsvarianten.

Die Ermittlung der Federbalgdruck-Achslast-Gerade erfolgt bei dem Achshersteller. Bei der Montage der Achse an Fahrzeugen und Anhängern wird das System nach der beim Achshersteller ermittelten Gerade eingestellt, ohne dass eine produktspezifische Kalibrierung durchgeführt wird. Die Messgenauigkeit im Sinne einer Spezifikation wird im Allgemeinen nicht gegeben. Die Eigenschaften der Luftfederbälge und somit die Genauigkeit der Messung können sich über die Lebensdauer ändern. Eine regelmäßige Kalibrierung im verbauten Zustand der Achse könnte die Genauigkeit des Systems verbessern und aufrecht erhalten (WABCO HOLDINGS INC. 2012).

Für die Messung der Achslasten von blattgefederten Achsen, üblich bei Sattelzugmaschinen, stünden Systeme auf Basis von Dehnungsmessstreifen zur Verfügung (WEINHÖPPEL GMBH 2012).

Eine weitere alternative Möglichkeit der Ermittlung der Gesamtmasse besteht in sogenannten dynamischen Masseschätzern. Hierbei wird im Zugfahrzeug die Gesamtmasse aus Parametern wie Antriebs- und Bremsmoment während der Fahrt errechnet. Die geschätzte Gesamtmasse steht so erst nach einer gewissen gefahrenen Strecke zur Verfügung, wird üblicherweise auf dem Fahrzeug-CAN-Bus hinterlegt und findet beispielsweise in Flottentelematiksystemen Eingang (ACEA WORKING GROUP HDEI/BCEI 2012). Eine direkte Anzeige im Fahrzeug ist nicht üblich.



**Bild 11** Oben: Achslastanzeigen in der Tachomuschel des Fahrerhauses.  
Mitte: nachgerüstete System mit Anzeige im Fahrerhaus (Kimax)  
Unten: Elektronische Anzeige am Anhänger (Wabco Smartboard System)

### 2.7.3 Methodisches Vorgehen

Zur Dokumentation der im Feldversuch eingesetzten Systeme wurden von den Fahrzeugbetreibern neben zugesandten Informationen, angefordert über die Checkliste, weitere Informationen bezüglich der Achslastüberwachungssysteme angefragt. Im Speziellen wurde um Informationen bezüglich Produktbezeichnung und der Art der Anzeige im Fahrzeug gebeten.

Des Weiteren wurden in den Fahrzeugbegutachtungen Achslastüberwachungssysteme näher untersucht. Die angezeigten Achslasten eines Systems eines Lang-Lkw wurden mit Messwerten auf einer Fahrzeugwaage verglichen, um Aussagen über die Genauigkeit treffen zu können.

### 2.7.4 Ergebnisse

Im Rahmen der Fahrzeugbegutachtungen wurden die Systeme von 8 Fahrzeugen näher betrachtet. Durch die Begutachtung dieser 8 Fahrzeuge lassen sich Schlüsse auf weitere 8 baugleiche Fahrzeuge ableiten, sodass die Begutachtung einen Überblick über 16 Achslastüberwachungssysteme darstellt. Weitere Informationen über die Achslastüberwachungssysteme wurden direkt über teilnehmende Speditionen eingeholt.

#### Art und Ort der Anzeige

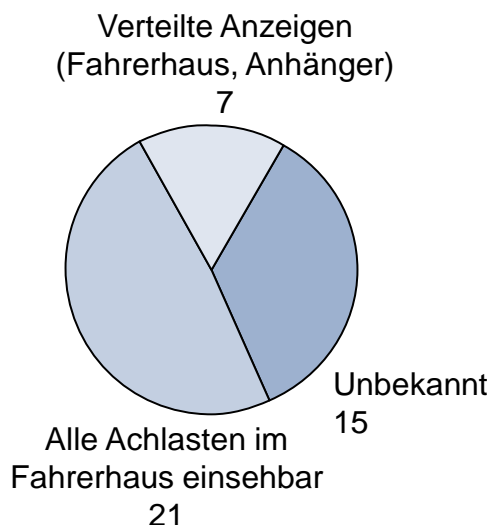
Bild 12 zeigt einen Überblick, wo die Anzeigen der Achslasten bei den Lang-Lkw erfolgen. Die Anzeige aller Achslasten kann in 21 dokumentierten Fällen im Fahrerhaus erfolgen. Hierbei sind einzelne Achslasten und von Teilen der Fahrzeugkombination auf einem Display digital dargestellt (Bild 11, oben und mittig). Die Achslasten von mehreren Achsen eines Anhängers oder einer Unteretzachse werden bei der Anzeige im Fahrerhaus oft nur addiert ausgegeben. Teilweise können die Achslasten auch zusätzlich an Unteretzachsen oder Anhängern abgelesen werden. In 7 Fällen wird nur ein Teil der Achslasten der Fahrzeugkombination im Fahrerhaus ausgegeben. Die Anzeige der Achslasten von Unteretzachsen und Anhängern erfolgt jeweils über ein Anzeigegerät an deren Rahmen (Bild 11, unten). Bei 15 Fahrzeugkombinationen konnte die Art der Achslastanzeige nicht dokumentiert werden.

#### Ermittlung der Gesamtmasse

Die Gesamtmasse der Fahrzeugkombination wurde in keinem der dokumentierten Fälle direkt ausgegeben. Die Ermittlung der Gesamtmasse erfordert somit immer eine Addition der im Fahrerhaus und/oder an Anhängern gegebenen Achslasten. Bei Fahrzeugen mit blattfederter Vorderachse kann die Gesamtmasse nur über eine Schätzung der unbekannteren Achslast erfolgen. Hierbei wäre bei Sattelzugmaschinen ein Wert von 6 t bis 7 t anzusetzen.

#### Vergleich mit Fahrzeugwaage

Zur Beurteilung der Genauigkeit wurde ein Teil einer Lang-Lkw-Kombination vom Typ 2 auf die Waage eines Nutzfahrzeugherstellers gefahren. Die Kombination bestand aus einer Sattelzugmaschine mit einer blattfedernden Vorderachse und einem dreiachsigen Auflieger, der über eine Lift-



**Bild 12** Ort der Anzeige von Achslasten

achse verfügt<sup>1</sup>. Der Auflieger war teilbeladen. In der Sattelzugmaschine ist ein System des Herstellers verbaut. Im Auflieger handelt es sich um das elektronische System SmartBoard der Firma Wabco, welches standardmäßig über die Balgdruck-Achslast-Gerade des Achsherstellers kalibriert ist.

Es wurden die Achslasten in 3 verschiedenen Konfigurationen verglichen, sodass sich unterschiedliche Achsen in Kontakt mit der Waage befanden. Tab. 1 zeigt jeweils die im Fahrzeug gemessenen, addierten Werte sowie die prozentuale Abweichung von den Referenzwerten der Waage<sup>2</sup>. Bei angezogener Liftachse am Trailer zeigte das System des Fahrzeugs jeweils 200 kg weniger als die Waage an, bei abgelassener Liftachse 500 kg mehr. Dies entspricht einer maximalen Abweichung von etwa 3 %. Bei 40 t würde dies einer absoluten Abweichung von etwa 1,2 t entsprechen.

Die in der LKWÜberStVAusnV in § 5 Absatz 6 vorgeschriebene „*automatische Achslastüberwachung mit sinnfälliger Anzeige der Achslasten für die Achsen mit Luftfederung oder der Gesamtmasse*“ eröffnet einen weiten Lösungsraum, wel-

ches sich in den angetroffenen Umsetzungen widerspiegelt. Der Frage nach „Sinnfälligkeit“ kann im Rahmen dieser Studie nicht nachgegangen werden. Es können jedoch folgende Aussagen zur Praktikabilität abgeleitet werden:

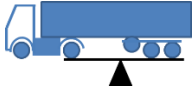


- Die Ermittlung der Fahrzeuggesamtmasse durch Addition von Einzelmassen und Achslasten stellt einen fehleranfälligen und mit Aufwand verbundenen Vorgang dar, der in der im Speditionsalltag vermutlich weniger durchgeführt wird als ein direktes Ablesen der Gesamtmasse im Fahrerhaus.
  - Die Addition von Erfahrungswerten für blattgefederte Vorderachsen erscheint hier erschwerend hinzuzukommen.
  - Verteilte Anzeigen von Achslasten an Anhängern und Untersetzachsen erhöhen den Aufwand zur Ermittlung der Gesamtmasse des Fahrzeugs.
- Manometer mit verschiedenen Skalen für unterschiedliche Achsvarianten begünstigen Ablesefehler (Bild 10).

Die praktikabelste Lösung stellt somit ein System dar, das alle Achslasten sowie die Gesamtmasse der Fahrzeugkombination im Fahrerhaus direkt anzeigen kann und auch die Achslast von blattgefederten Vorderachsen überschlägig mit einberechnet.

Die Genauigkeit des überprüften Systems erscheint ausreichend, um Überladungszustände der Fahrzeugkombination transparent zu machen. Um die Vertrauenswürdigkeit und Vergleichbarkeit der Achslastüberwachungssysteme zu erhöhen, wären Spezifikationen hinsichtlich der Genauigkeit wünschenswert. Bei bekannter Messgenauigkeit können, unter optimaler Ausnutzung der maximalen Nutzlast, ungewollte Überladungszustände zuverlässig ausgeschlossen werden.

<sup>1</sup> Der zweite Anhänger konnte leider nicht mit verwogen werden, weil sich die Waage außerhalb des Positivnetzes für Lang-Lkw befindet.

<sup>2</sup> Achsweises wiegen der Gesamtfahrzeugmasse ist bei Bodenwaagen ungültig, weil sich die Lastverteilung beim Bewegen des Fahrzeugs aufgrund unterschiedlicher Bodenniveaus ändern kann. Bei den Messvorgängen handelt es sich allerdings nicht um einen solchen Messvorgang, weil jeweils einzelne Werte von Waage und Fahrzeug direkt miteinander verglichen wurden.

Position auf Waage	Waage	Anzeige im Fahrzeug	Prozentuale Abweichung
	24,3 t	24,1t	-0,8 %
	14,9 t	14,7 t	-1,3%
	16 t	16,5 t	+3,1%

Tab. 1 Vergleichsmessungen der Achslasten: Anzeige im Fahrzeug und Waage

## 2.8 Sichtprobleme für Fahrzeugführer

### 2.8.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die LKWÜberStVAusnV schreibt in § 5 Absatz 11 ein „Kamera-System am Heck des Fahrzeugs oder der Fahrzeugkombination sowie einem zugehörigen Monitor im Blickfeld des Fahrers für die Sicht nach hinten“ vor. Die vorgeschriebenen Systeme können als möglicher Ersatz für Innenrückspiegel oder als Rangierhilfe bei Rückwärtsfahrt angesehen werden. Einzuhaltende Sichtfelder, Auflösungen der Kamera und Anbringungsorte von Kamera und Bildschirm sind jedoch nicht näher spezifiziert. Ziel der Untersuchungen, die im Rahmen der Fahrzeugbegutachtungen stattfanden, war die Dokumentation und die Gewinnung eines ersten Überblicks über verbaute Systeme. Die Untersuchungen richteten sich auf Sichtfeld, Befestigungsart und -arten sowie eine etwaige Verschmutzungsanfälligkeit der Kameras.

### 2.8.2 Stand der Wissenschaft und Technik

#### Sichtfelder

Die Richtlinie 2003/97/EG, auf welche auch in der LKWÜberStVAusnV in § 5 Absatz 10 für Einrichtungen für indirekte Sicht verwiesen wird, beschreibt Sichtfelder für Innenrückspiegel (Artikel 5.1, Bild 13 oben) sowie für Sichthilfen am Fahrzeugheck, beispielsweise für Müllsammelfahrzeuge (Artikel 10, Bild 13 unten). Das Sichtfeld des Innenrückspiegels mit einer Sicht auf die Fahrbahn ab 60 m hinter dem Fahrer dient der Beobachtung

des rückwärtigen Verkehrs. Die Sichthilfe am Fahrzeugheck mit einer Sichtweite von 2 m auf die Fahrbahn unmittelbar hinter dem Fahrzeug deutet hingegen auf eine Rückfahrlilfe. Fahrzeuge, welche beispielsweise während der Fahrt sich mittig hinter dem Fahrzeug befinden und über Außenrückspiegel nicht erkennbar sind, erscheinen auch in diesem Sichtfeld nicht.

#### Kamera-Monitor-Systeme

Für Kamera-Monitor-Systeme gibt es aufgrund von standardisierten Schnittstellen und Komponenten für Kameras, Monitore und Übertragungsmöglichkeit unterschiedlichste Umsetzungsmöglichkeiten. Die Systeme können beliebig zusammengestellt werden. Tab. 2 zeigt Teillösungen aus denen Kamera-Monitor-Systeme aufgebaut sein können. So bieten einige Nutzfahrzeughersteller die Möglichkeit, Kamerabilder direkt in der Tachomuschel auf einem kleinen Monitor, welcher auch für die Anzeige von weiteren Fahrzeugdaten wie Achslasten genutzt werden kann, anzuzeigen. Die Anzeige erfolgt hierbei nicht dauerhaft, weil während der Fahrt gegebenenfalls andere Informationen angezeigt werden. Es besteht jedoch teilweise die Funktion, das Kamerabild beim Einlegen eines Rückwärtsganges automatisch anzuzeigen. Eine permanente Darstellung ermöglichen hingegen separate Monitore im Blickfeld des Fahrers. Separate Monitore bilden mit einer Bildschirmdiagonale von etwa 20 cm ein größeres und höher auflösendes Bild als Monitore in Tachomuscheln mit etwa 7 cm.

Die Übertragung des Kamerasignals kann per Funk oder Kabel stattfinden. Kabelverbindungen müssen dabei so ausgelegt sein, dass sie wie Brems- und Steuerleitungen durch Drehbewegungen von unterschiedlichen Fahrzeugteilen nicht beschädigt werden.

Die Kameras können im Bereich des Stoßfängers

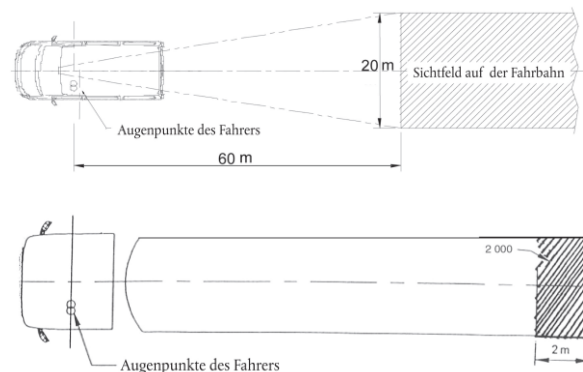


Bild 13 Sichtfelder für Innenrückspiegel und Sichthilfen am Fahrzeugheck nach Richtlinie 2003/97/EG



<b>Anzeige</b>	in HMI Monitor (Tachomuschel), nicht dauerhaft	extra Monitor, dauerhaft
<b>Übertragung</b>	Kabel	Funk
<b>Kamera</b>	<b>Befestigung</b>	fest installiert
	<b>Ort</b>	Dach des Anhängers / hinterer Unterfahrschutz

Tab. 2 Teillösungen für Kamera-Monitor-Systeme

oder am oberen Ende eines Aufliegers oder Aufbaus angebracht werden mit entsprechender Auswirkung auf das Sichtfeld. Weiteren entscheidenden Einfluss auf das Sichtfeld bilden die Objektive (Bildwinkel) der Kameras.

### 2.8.3 Methodisches Vorgehen

Im Rahmen der Fahrzeugbegutachtung wurden die Kamerabilder im Fahrerhaus erfasst und die Anbringung der Kameras dokumentiert. Wo möglich, wurden Sichtfelder vermessen. Darüber hinaus wurden die anwesenden Fahrzeugführer zum Einsatz des Kamera-Monitor-Systems befragt.

### 2.8.4 Ergebnisse

Die begutachteten Fahrzeuge wiesen die unterschiedlichsten Kombinationsmöglichkeiten entsprechend Tab. 2 auf. Trotz der Möglichkeit der Anzeige des Kamerabildes in der Tachomuschel wurden von einigen Teilnehmern des Feldversuchs die Bilder auf einen zusätzlichen Monitor übertragen, um oben genannte Vorteile der dauerhaften Anzeige und besseren Auflösung zu nutzen.

Die Anbringung der Kameras erfolgte nur in Ausnahmefällen am oberen Ende von Aufbauten oder Aufliegern. Die Ausnahmefälle sind dadurch gekennzeichnet, dass der Lang-Lkw in einer gleichbleibenden Kombination aus demselben Zugfahrzeug, Anhänger und ggf. Ladeeinheit (Aufbau) fährt. Die Kamera ist in diesem Falle fest installiert. Bei wechselnden Ladeeinheiten oder Anhängern waren Kameras im Bereich des hinteren Unterfahrschutzes angebracht. Eine feste Installation fand bei Chassis-Anhängern mit wechselnden Ladeeinheiten statt. Bei wechselnden Anhängern (insbesondere Typ 3) waren die Kameras nicht fest installiert. Hierbei wurde beispielsweise die Verkabelung entlang der Seitenplane durchgefädelt und die Kamera mithilfe einer Klemme am hinteren Unterfahrschutz befestigt und mit einem Drahtseil zusätzlich am Rahmen gesichert.

Die beiden Möglichkeiten der Anbringungsorte der Kameras wirken sich stark auf die Sichtfelder aus. Bei der Anbringung im Bereich des hinteren Stoß-



Bild 14 Sichtfelder bei Anbringung der Kamera im Bereich des hinteren Unterfahrschutzes

fängers reicht die Sicht bis an den Horizont (Bild 14), wohingegen bei höheren Kamerapositionen die Sichtweite nach hinten je nach Objektiv begrenzt ist (Bild 15).

Kameras mit starkem Weitwinkelobjektiv weisen optische Verzerrungen auf (tonnenförmige Verzerrung). Diese Verzerrungen und eher horizontale Perspektiven auf die Fahrbahn bei Anbringung der Kameras im Bereich des hinteren Unterfahrschutzes erschweren laut Fahreraussagen die Einschätzung von Entfernungen von Objekten hinter dem Lang-Lkw. Höher angebrachte Kameras verbessern tendenziell das Einschätzen von Distanzen über Kamera-Monitor-Systeme. Hervorzuheben ist hier die Kamera eines Typ 2 Lang-Lkw. Diese ist mit steilem Winkel auf den unmittelbaren Nahbereich hinter dem zweiten Anhänger gerichtet, bis ca. 5 m. Diese relativ vertikale Perspektive ermöglicht eine sehr gute Einschätzung der Entfernung von Objekten hinter dem Lang-Lkw. Dadurch eignet sich das System besonders zum sicheren Heranfahren an Laderampen.

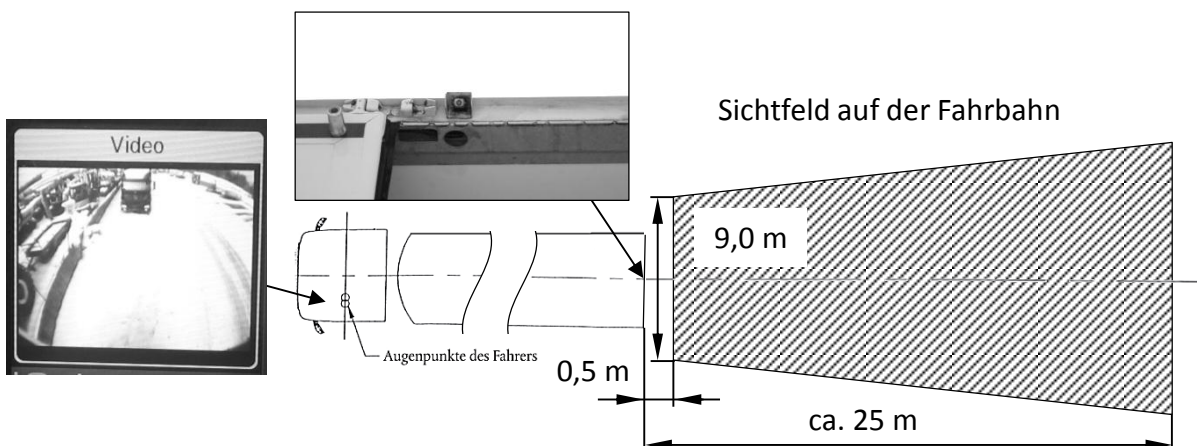
Laut Fahreraussagen werden die Kamera-Monitor-Systeme vor allem bei Rangiermanövern und Rückwärtsfahrten genutzt, auch wenn Distanzen nur schwer einzuschätzen sind. Personen und größere Objekte im Nahbereich hinter dem Fahrzeug sind jedoch bei allen Varianten erkennbar.

Die Verschmutzungsanfälligkeit der Kameras ist sowohl bei Montage im Bereich des hinteren Unterfahrschutzes als auch am Dach von Aufbauten und Anhängern gegeben, wobei Reinigungen bei

tiefer liegenden Kameras leichter durchzuführen sind.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Sichtfelder für oben bzw. unten am Fahrzeugheck angebrachte Kameras lassen sich jeweils Vor- und Nachteile der Montagepositionen ableiten. Bei Kameras im Bereich des hinteren Unterfahrschutzes ist das Sichtfeld nach hinten nicht begrenzt. Somit stellen sie die bessere Alternative für Innenrückspiegel zur Beobachtung des rückwärtigen Verkehrs dar (Bild 13, oben). Die Möglichkeit der Kameramontage in diesem Bereich ist bei allen am Feldversuch teilnehmenden Lang-Lkw möglich. Die Montage von Kameras am Dach von Anhängern und Ladungseinheiten (Aufbauten) ist jedoch nur in seltenen Fällen möglich, weil Anhänger und Ladungseinheiten im Normalfall oft ausgewechselt werden müssen. Hier angebrachte Kameras erweisen sich aber als bessere Alternative für indirekte Sicht im Nahbereich hinter dem Lang-Lkw (Bild 13, unten). Der rückwärtige Verkehr kann jedoch nur bedingt beobachtet werden, weil Sichtfelder nach hinten begrenzt sind. So bewegen sich beispielsweise Pkw, die auf der Landstraße bei 60 km/h einen Sicherheitsabstand nach der Faustformel „halber Tacho“ einhalten, im Fallbeispiel Bild 15 außerhalb des Sichtfeldes des Kamera-Monitor-Systems.

Separate Monitore im Fahrerhaus ermöglichen eine permanente Darstellung des Kamerabildes und weisen bessere Auflösungen als Displays in der Tachomuschel auf. Inwieweit diese Vorteile auch zu einem Zugewinn an Sicherheit führen, konnte in den Fahrerinterviews nicht geklärt werden. Möglicherweise stellt eine permanente Darstellung des Kamerabildes auch eine Ablenkung dar. Beispielhaft zu nennen sind Abbiegemanöver bei denen bereits 6 Spiegelflächen zu beobachten sind.



**Bild 15** Sichtfeld bei Anbringung der Kamera über dem Heckportal eines Aufbaus – begrenzte Sichtweite nach hinten

### 3 AP 2 – Untersuchung der Ausnutzung des BO-Kraftkreises

#### 3.1 Problemstellung und Zielsetzung

Bei Kurvenfahrt eines Fahrzeugs vergrößert sich dessen Flächenbedarf durch Nachlauf und Ausschwenken teilweise erheblich. Insbesondere beim Betrieb von Nutzfahrzeugkombinationen mit einem oder mehreren Anhängern ist dieser Effekt zu beobachten. Diese zusätzliche Flächeninanspruchnahme eines Fahrzeugs bei Kurvenfahrt hängt neben den äußeren Abmessungen von einer Vielzahl weiterer konstruktiver Eigenschaften ab. So beeinflussen beispielsweise die Achsabstände, Anzahl und Position gelenkter Achsen, Art, Position und Länge der Kupplungseinrichtung eines mitgeführten Anhängers sowie Länge und Form der Front- und Hecküberhänge an den Fahrzeugen wesentlich die von den Fahrzeugumrissen überstrichene Fläche während der Kurvenfahrt.

Zur Vereinfachung der Bemessung von Verkehrswegen wurden deshalb in der StVZO neben den maximalen äußeren Abmessungen auch die Kurvenlaufeigenschaften für Straßenfahrzeuge festgelegt. Nach § 32d der StVZO muss jedes Kraftfahrzeug und jede Fahrzeugkombination bei einer Kreisfahrt von 360° mit einem äußeren Radius von 12,5 m (der sogenannte „BO-Kraftkreis“) innerhalb einer Kreisringbreite von 7,2 Meter bleiben. Dies bedeutet, dass ein innerer Kreis mit einem Radius von 5,3 m nicht überstrichen werden darf. Außerdem darf bei der tangentialen Einfahrt in oben genannten äußeren Kreis kein Teil der Fahrzeugkombination mehr als 0,8 m über die Tangente der Einfahrt hinausragen (Ausschermaß, Bild 16).

Um einen problemlosen Einsatz der Lang-Lkw zu

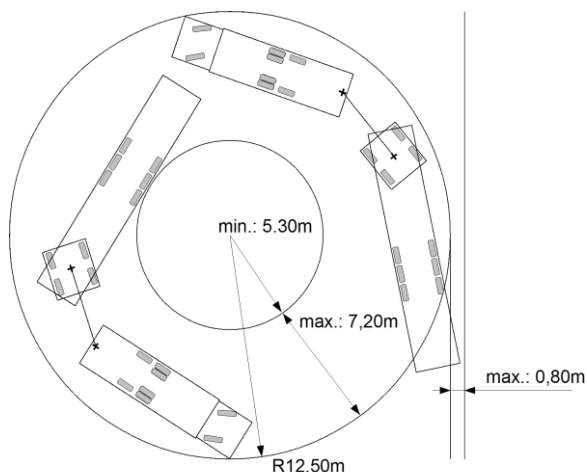


Bild 16 Darstellung der Grenzwerte nach § 32d der StVZO

garantieren, gilt § 32d der StVZO auch uneingeschränkt für alle Fahrzeugkombinationen im Feldversuch nach der LKWÜberStVAusnV. Die Einhaltung der Vorschriften zum Kurvenlaufverhalten muss, neben anderen technischen Vorschriften, durch ein Sachverständigengutachten im Übereinstimmungsnachweis nach § 7 der LKWÜberStVAusnV nachgewiesen werden.

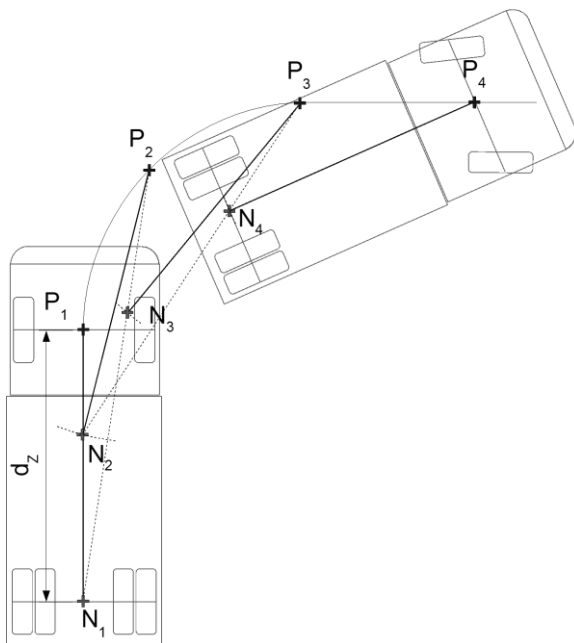
Ziel der Untersuchungen im Rahmen dieses Arbeitspakets ist die Berechnung und Dokumentation der charakteristischen Maße zur überstrichenen Kreisringfläche und zum Ausschermaß nach § 32d der StVZO der am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeugkombinationen unter Berücksichtigung der jeweiligen Fahrzeugkonfiguration. Auf diese Weise werden die Angaben aus den Übereinstimmungsnachweisen verifiziert sowie eine Möglichkeit zur Vorausberechnung zukünftiger möglicher Fahrzeugkonfigurationen geschaffen. Zur Validierung der Simulationsrechnung wurden die berechneten Ergebnisse für ausgewählte Fahrzeugkombinationen experimentell überprüft.

#### 3.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Zur Ermittlung der charakteristischen Maße zum Nachweis der Konformität zu § 32d der StVZO werden in der Regel Fahrversuche an einem aufgezeichneten Kreis mit einem Außendurchmesser von 12,5 m durchgeführt und die charakteristischen Werte zur Kreisringbreite und zum Ausschermaß aufgezeichnet und vermessen.

Als Alternative zu den realen Fahrversuchen lassen sich die entsprechenden Werte auch analytisch berechnen, beziehungsweise durch eine iterative Näherung simulieren. Die überstrichene Kreisringfläche bei einer stationären Kreisfahrt lässt sich dabei aufgrund der konstanten Radien der Position der Fahrzeugkombination im Kreis auch rein analytisch berechnen. Zur Berechnung instationärer Fahrmanöver, wie der Einfahrt in den Kreis nach § 32d der StVZO muss die Schleppkurve der einzelnen Fahrzeugteile ermittelt werden. Hierfür gibt es verschiedene Algorithmen und grafische Verfahren wie beispielsweise die Verfahren nach Everling-Schoss, Osterloh, Hauska-Neumann, Halter oder Guhlmann (MESCHIK 1992) (Bild 17).

Für eine möglichst einfache und anwendungsorientierte Berücksichtigung von Schleppkurven bei der Planung von Verkehrswegen gibt es entsprechende kommerzielle Programme mit grafischer Schleppkurvensimulation als Erweiterung für CAD-Anwendungen. Beispiele für solche Programme sind z. B. AUTO-TURN, VESTRA PRO, die



**Bild 17** Schematische Darstellung des grafischen Verfahrens zur Schleppkurvenbestimmung nach Guhlmann

Schleppkurvenprogramme von RZI-Software oder das CARD/1-System. Bei diesen Systemen wird in der Regel die Vorderachsmittle des zu simulierenden Fahrzeugs entlang einer vorher gezeichneten Leitlinie geführt und dabei die überstrichene Fläche aufgezeichnet. Aufgrund der rein grafischen Darstellung und Auswertung der Simulation sind diese Programme aber nur bedingt für eine genaue Betrachtung des Verhaltens im „BO-Kraftkreis“ geeignet. Nach aktuellem Stand können mit den oben genannten Programmen keine selbstlenkenden Untersetzachsen, wie sie im Feldversuch weit verbreitet sind, berücksichtigt werden.

### 3.3 Methodisches Vorgehen

#### 3.3.1 Analytische Berechnung des Kurvenlaufverhaltens

Zur Bestimmung des Kurvenfahrverhaltens der verschiedenen möglichen Fahrzeugkombinationen für Lang-Lkw wurde ein Berechnungsprogramm entwickelt, das die charakteristischen Werte nach § 32d der StVZO einer gegebenen Fahrzeugkombination ermittelt. Dieses basiert auf einer vektorgeometrischen Umsetzung der Guhlmann'schen Schleppkurvenkonstruktion, wobei die Schrittweite der Simulation bis auf einen Zentimeter verkleinert wird, um präzise Berechnungsergebnisse zu erhalten. Durch entsprechende, parametrische Funktionen und Eingabemasken kann für alle 5 Typen von Lang-Lkw eine Kreisfahrt nach § 32d der StVZO simuliert und daraus die Werte für die über-

strichene Kreisringbreite und das Ausschermaß ermittelt werden. Für den Lang-Lkw Typ 3, eines Lkw mit Untersetzachse und Sattelanhänger, kann hierbei auch ein selbstlenkender Dolly nach Krone-Bauart berücksichtigt werden, wie er in den meisten Lang-Lkw diesen Typs im Feldversuch zum Einsatz kommt. Zu diesem Zweck wurde eine entsprechende Berechnungsfunktion für das Simulationsprogramm entwickelt.

In die Simulation fließen dabei die äußeren Abmessungen und die aus den Übereinstimmungsnachweisen bekannten Achsabstände der Fahrzeugkomponenten genauso ein, wie die Positionen von Anhängerkupplungen und Sattelzapfen sowie die Anzahl und Position von Lift- und Lenkachsen. Für die Berechnung der Kombinationen mit selbstlenkenden Untersetzachsen wird das Übersetzungsverhältnis der verwendeten Zwangslenkung ebenso berücksichtigt.

Ein weiterer Einflussfaktor bei der Bestimmung des Verhaltens nach § 32d der StVZO ist die Gestaltung des vorderen Überhangs an der ziehenden Einheit. Die Breite und Eckrundung von Frontstoßstange und Fahrerhaube beeinflussen die Position der gesamten Fahrzeugkombination während der Fahrt entlang des Außenkreises. Da sich hierbei marken- und typspezifische Unterschiede zeigen, werden die relevanten Maße hierzu im Rahmen der Fahrzeugbegutachtung mit erfasst.

#### 3.3.2 Fahrzeugbegutachtung

Zur Überprüfung der berechneten Werte sowie der zugrunde liegenden Daten wurden mehrere Fahrzeuge in ihrem Kurvenlaufverhalten nach § 32d der StVZO experimentell untersucht. Da die begutachteten Fahrzeuge jeweils nur eine begrenzte Zeit zur Verfügung standen, wurde ein möglichst einfach und zügig zu realisierender Versuchsaufbau erarbeitet, um die benötigten Daten bei den Speditionen vor Ort ermitteln zu können. Hierfür wurden mit Kreide der Außenkreis mit 12,50 m Radius, sowie die Tangente der Einfahrt an den Kreis aufgezeichnet. Zur Bestimmung des maximalen Ausschermaßes wurde die Spur der hinteren, äußeren Fahrzeugecke mithilfe einer tropfenden Flüssigkeit markiert und der entsprechende Wert ausgemessen. Bei mehrteiligen Fahrzeugen wurden beide relevanten Ausschermaße ermittelt, das heißt an Sattelanhänger und Zentralachsanhänger (Typ 2) bzw. an Lkw-Aufbau und (Sattel-) Anhänger (Typ 3 und 5).

Für exaktere Ergebnisse in den Fahrversuchen und als Hilfe für die Fahrer der Lkw wurde eine Peilhilfe verwendet, um die Fahrzeuge möglichst exakt entlang des Außenkreises steuern zu können (Bild 18).



**Bild 18** Peilhilfe an vorderer, äußerer Ecke des Fahrzeugs für die Kreisfahrt nach § 32d der StVZO

## 3.4 Ergebnisse

### 3.4.1 Auswertung der Gutachten

Die Ausgangsdaten zur Berechnung des Verhaltens der Fahrzeuge im „BO-Kraftkreis“ werden aus einer Kombination der Angaben aus den Gutachten zum Übereinstimmungsnachweis, den Angaben aus den Zulassungsbescheinigungen Teil I (soweit vollständig vorliegend), sowie aus Datenblättern der Fahrzeughersteller ermittelt und berechnet. Bei der Auswertung der zur Verfügung stehenden Daten fallen hierbei bereits einige Abweichungen in einzelnen Abmessungen zwischen den unterschiedlichen Quellen auf. Des Weiteren sind die Angaben zu Anzahl und Position von Lenkachsen bei einzelnen Fahrzeugkombinationen in den Übereinstimmungsnachweisen nicht vollständig plausibel. Von einigen Fahrzeugen fehlen auch wichtige Angaben gänzlich, zum Beispiel die Kuppellängen.

In Tab. 5 des Anhangs sind die Abmessungen aller Lang-Lkw im Feldversuch aufgeführt, soweit diese aus den Übereinstimmungsnachweisen nach LKWÜberlStVAusnV und den beiliegenden Zulassungsbescheinigungen bekannt oder ableitbar sind. Die letzte Zahl der anonymisierten Fahrzeug-ID kennzeichnet hierbei den Typ des Lang-Lkw, während die vordere Ziffer die Spedition repräsentiert. Bei mehreren Fahrzeugen einer Spedition

werden diese anhand der zweiten Ziffer unterschieden. Bei den begutachteten Fahrzeugen sind jeweils die Abmessungen aus den eigenen Messungen angewandt worden. Für die Angaben der Lage des Führungspunktes am Fahrerhaus wurden ebenfalls die Maße aus den Fahrzeugbegutachtungen je nach Hersteller der ziehenden Einheit verwendet. In den Fahrzeugbegutachtungen konnten die Maße von den 3 üblichsten Fahrerhäusern aufgenommen werden. Diese Maße dienten auch als Berechnungsgrundlage für nicht begutachtete Fahrzeuge. Bei unbekanntem Fahrerhäusern wurden Erfahrungswerte zugrunde gelegt.

Die Gesamtlänge des Zugfahrzeugs ( $l_{Zges}$ ) ist bei Sattelzugmaschinen nicht angegeben, weil das Ausschermaß einer Sattelzugmaschine gegenüber dem Sattelanhänger vernachlässigbar ist. Wo Angaben fehlen, ist dieses entsprechend gekennzeichnet. Mit einem Bindestrich sind nicht benötigte, beziehungsweise nicht vorhandene Maße gekennzeichnet. Achsen, die zusätzlich zur 1. Achse gelenkt sind oder laut Gutachten für die Kreisfahrt angehoben werden, sind grau hinterlegt. Die Kennzeichnung bezieht sich hierbei stets auf die letztere Achse eines Achsabstandsfeldes. Für den Lang-Lkw vom Typ 4 wurden das Zwischenmaß  $l_{EGz}$  und das Kuppelmaß  $l_{EGb}$  aus dem Herstellerdatenblatt des ersten Sattelanhängers (D-TEC 2010) entnommen.

In Tab. 3 sind die Angaben zur Kreisringbreite und zum Ausschermaß aus den Gutachten den berechneten Werten aus der Simulation gegenübergestellt. Der Simulation liegen die Parameter entsprechend Tab. 5 des Anhangs zugrunde.

In den Ergebnissen der Berechnung sind jeweils beide relevante Ausschermaße angegeben. Das erste Maß beschreibt das Ausschermaß des vorderen Sattelanhängers (bei den Typen 2 und 4) bzw. der Lkw-Zugmaschine (Typ 3 und Typ 5). Das zweite Ausschermaß beschreibt den hinteren Anhänger (Typ 2 und Typ 5) oder Sattelanhänger (Typ 3 und Typ 4). Die Berechnung der überstrichenen Kreisringbreite erfolgt für eine Fahrt der vorderen Außenkante von exakt 360°, ohne Berücksichtigung der Kreisausfahrt. In den meisten Fällen werden die Angaben aus den Gutachten durch die Berechnung bestätigt. Da in den Abnahmen der Fahrzeuge reale Fahrversuche durchgeführt wurden, gelten hier die gleichen Einflüsse, wie für die Fahrversuche zur Validierung der Simulation. Je nach Versuchsdurchführung sind gewisse Abweichungen zur Simulation demnach unvermeidbar.

Fahrzeug	Gutachten		Berechnung		Fahrversuch		Anmerkungen, Annahmen
	Kreisringbreite [m]	Ausschermaß [m]	Kreisringbreite [m]	Ausschermaß [m]	Kreisringbreite [m]	Ausschermaß [m]	
3-1-3	7,10	0,60	7,11	0,19 / 0,31	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,0
3-2-3	7,10	0,45	7,09	0,18 / 0,29	7,10	0,15 / 0,10	Kögel -Dolly, gelenkt, angenommene Lenkübersetzung: 1 / 2,6
3-3-1	7,00	0,55	7,33	0,42	-	-	OptiLoad-System am Sattelanhänger (dynamische Radstandsveränderung)
3-4-3	7,10	0,60	7,12	0,19 / 0,28	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,3
12-1-3	7,20	0,10	7,28	0,15 / 0,19	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 4,0
12-2-3	7,20	0,10	7,28	0,15 / 0,19	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 4,0
12-3-3	6,90	0,10	7,35	0,15 / 0,18	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 4,0
11-1-2	7,20	0,64	7,72	0,39 / 0,34	-	-	Angabe Achsabstand A2-A3 im Gutachten evtl. zu lang, A5 geliftet bei $v < 30$ km/h
10-1-4	7,20	0,20	7,17	0,45 / 0,24	-	-	A4 gelenkt, A5 geliftet bei $v < 30$ km/h
10-2-4	7,15	0,20	7,24	0,43 / 0,27	-	-	1. Sanh gleich wie bei 10-1-4, nur andere Zgm. und anderer 2. Sanh
6-1-2	6,40	0,50	6,43	0,72 / 0,52	6,10	0,65 / 0,45	Achsabstand 5-6 im Gutachten zu lang angeben, System zur dynamischen Radstandsveränderung am Starrdeichselanhänger
6-2-2	6,40	0,50	6,43	0,72 / 0,52	6,10	0,65 / 0,45	
14-1-3	7,20	0,20	7,13	0,23 / 0,21	7,00	0,25 / 0,25	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,6
14-2-3	7,20	0,20	7,13	0,23 / 0,21	7,00	0,25 / 0,25	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,6
5-1-2	7,00	0,50	6,43	0,42 / 0,73	-	-	Angabe Achsabstand A5-A6 im Gutachten evtl. zu kurz, A5 geliftet bei $v < 30$ km/h
16-1-3	6,60	0,50	6,56	0,33 / 0,42	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,0
8-1-3	7,20	0,30	7,18	0,20 / 0,22	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,6
18-1-3	7,00	0,40	6,89	0,21 / 0,35	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,0
13-1-2	7,10	0,20	6,72	0,38 / 0,28	-	-	Kuppelmaß des Sattelanhänger: $l_{EGb} = 11,42$ m
20-1-3	7,00	0,30	7,12	0,36 / 0,23	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,6
9-1-3	7,15	0,78	7,14	0,21 / 0,62	-	-	starres, ungelenktes Doller Sattelanhänger, angenommene Lenkübersetzung 1 / 4,4 (9-1-3), bzw. 1 / 3,0 (9-2-3)
9-2-3	7,17	0,77	7,18	0,29 / 0,69	-	-	
7-1-5	6,20	0,40	6,21	0,54 / 0,28	6,20	0,60 / 0,30	3. Achse des Zugfahrzeugs zwangsgelenkt
7-2-5	6,20	0,40	6,21	0,54 / 0,28	6,20	0,60 / 0,30	3. Achse des Zugfahrzeugs zwangsgelenkt
7-3-5	6,20	0,40	6,21	0,54 / 0,28	6,20	0,60 / 0,30	3. Achse des Zugfahrzeugs zwangsgelenkt
19-1-3	7,20	0,20	7,02	0,23 / 0,26	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,6
19-2-3	7,20	0,20	7,02	0,23 / 0,26	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,6
4-1-3	7,20	0,45	-	-	-	-	starres Dolly, keine Berechnung möglich wg. zwei gelenkten Vorderachsen
4-2-3	7,20	0,50	7,11	0,25 / 0,53	-	-	starres Dolly
4-3-3	7,20	0,50	7,26	0,26 / 0,42	-	-	starres Dolly
2-1-3	7,20	k,A,	7,09	0,21 / 0,23	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,6
2-2-3	7,20	k,A,	7,09	0,21 / 0,23	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,6
2-3-3	6,90	0,50	7,22	0,35 / 0,46	-	-	starres Dolly mit Nachlaufenkachse, insges. 1+3 Lenkachsen
15-1-3	7,20	0,00	7,10	0,18 / 0,30	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,0
1-1-3	7,00	0,38	6,99	0,34 / 0,25	-	-	Schmitz -Dolly, gelenkt, angenommene Lenkübersetzung: 1 / 2,6
1-2-3	7,00	0,00	7,00	0,31 / 0,24	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,3
1-3-3	7,00	0,00	7,00	0,31 / 0,24	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,3
17-1-3	7,20	0,10	7,12	0,21 / 0,24	-	-	Krone-Dolly, gelenkt, Lenkübersetzung 1 / 3,6

Tab. 3 Vergleich der charakteristischen Werte nach § 32d StVZO für die Lang-Lkw im Feldversuch

Speziell die Berechnungsergebnisse zu den vorderen Ausschermaßen der Fahrzeuge nach Typ 3 sind hier teilweise zu hinterfragen, weil die Angaben zur Gesamtlänge des Zugfahrzeugs  $l_{Zges}$  aus den Zulassungsbescheinigungen, bei den durchweg eingesetzten Wechselbrückenfahrgeräten, in

der Regel nicht der tatsächlichen Gesamtlänge mit Aufbau entspricht.

In den Angaben zu den überstrichenen Kreisringbreiten ist in den vorliegenden Gutachten meist auf einen dezimetergenauen Wert gerundet worden, was nach den Erfahrungen aus den eigenen Fahr-

versuchen sinnvoll und zulässig ist. Größere Abweichungen zwischen Gutachten und Berechnung in den Kreisringbreiten sind vermutlich auf fehlerhafte Maßangaben zurückzuführen. So stellte sich beispielsweise bei der Begutachtung der Lang-Lkw Typ 2 6-1-2 bzw. 6-2-2 heraus, dass in den Gutachten der Achsabstand A5-A6 mit 7,55 m um 0,38 m zu groß angegeben war. Eine solche Abweichung führt zu einem Fehler in der Simulation der Kreisringbreite in ca. der gleichen Größenordnung, wie in Sensitivitätsanalysen festgestellt wurde.

Speziell die Kuppelmaße der Lkw-Motorwagen, die aus den Zulassungsbescheinigungen entnommen wurden, sind in diesem Sinne stellenweise zu hinterfragen. Hier wurde beispielsweise bei der Begutachtung des Typ-3-Lang-Lkw 3-2-3 eine Abweichung von 0,37 m zur Angabe in der Zulassungsbescheinigung Teil 1 von 9,75 m gemessen.

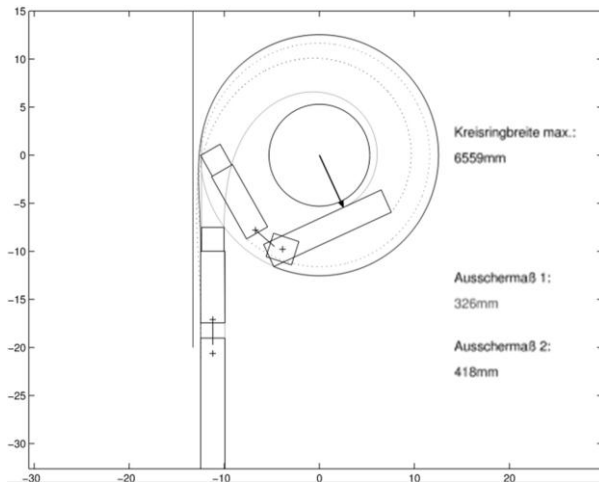
In diesem Kontext erscheinen einige Maßangaben, sowohl in den Gutachten zu den Fahrzeugen, als auch in den Zulassungsbescheinigungen zweifelhaft. So resultiert die sehr große überstrichene Kreisringbreite aus der Simulation des Fahrzeugs 11-1-2 aus einem unüblich langen angegebenen Achsabstand A2-A3 von 6,02 m, wo das vergleichbare Fahrzeug 5-1-2 einen Abstand von 5,78 m aufweist. Dieses Fahrzeug hat aber wiederum einen auffällig kurzen Achsabstand A5-A6, wozu dann das relativ lange zugehörige Kuppelmaß des hinteren Anhängers nicht passt. Diese wohl fehlerhaft angegebenen Längenverhältnisse führen in diesem Fall dazu, dass das Berechnungsergebnis für die Kreisringbreite zu gering ausfällt, während das hintere Ausschermmaß zu groß berechnet wird. Dieses Fahrzeug befindet sich aber laut Betreiber nicht mehr im Einsatz, sodass die Maße nicht überprüft werden können. Auch das verlängerte Containerchassis des Fahrzeugs 3-3-1 befindet sich nicht mehr im Einsatz als Lang-Lkw. Die Abweichung der Werte aus der Simulation von den Angaben im Gutachten ist in diesem Fall auf eine dynamische Radlastverlagerung zurückzuführen, mit der das Fahrzeug nach Aussage des Betreibers ausgestattet war, und womit dann auch der Grenzwert zur Kreisringbreite entsprechend eingehalten wird. Dieses, je nach Fahrzeughersteller als DWC (Dynamic Wheel Base Control (FAHRZEUGWERK BERNARD KRONE GMBH 2009; FAHRZEUGWERK BERNARD KRONE GMBH 2013), LoadSpread oder OptiLoad bezeichnete System kann bei einer Teilbeladung eines luftgefederten Mehrfachachsaggregates durch gezieltes Entlüften der Luftfederbälge der hinteren Achse die Lastverteilung innerhalb des Achsaggregates hin zur vorderen Achse verschieben. Auf diese Weise verkürzt sich der Ersatzradstand eines entsprechend ausgerüsteten Starrdeichsel- oder Sattelan-

hängers um einige Zentimeter, je nach Ausladung des Anhängers. Da diese Systeme die jeweiligen maximalen Achslasten berücksichtigen, ist deren tatsächliche Auswirkung stark vom gegebenen Beladungszustand abhängig und im Rahmen der verwendeten Simulation nicht quantifizierbar.

Hierzu ist auch anzumerken, dass ein Simulationswert für die überstrichene Kreisringbreite bis 7,35 m noch unkritisch ist, weil für die Bestimmung der charakteristischen Maße Toleranzen gewährt werden. Generell erlaubt der Toleranzkatalog zu § 30 der StVZO (KRAFTFAHRZEUG-ÜBERWACHUNGSORGANISATION FREIBERUFLICHER KFZ-SACHVERSTÄNDIGER E.V. 2004) eine zulässige Messwertabweichung von  $\pm 150$  mm vom Normwert der überstrichenen Kreisringbreite.

In den Anmerkungen in Tab. 3 sind eventuelle Besonderheiten der Fahrzeugkombinationen sowie teilweise zusätzliche Maßangaben angefügt. Insbesondere bei Lang-Lkw vom Typ 3 ist die Art des verwendeten Dolly relevant. Bei Fahrzeugkombinationen mit gelenktem Dolly ist jeweils der Wert der Lenkübersetzung angegeben, welcher der Simulation zugrunde liegt. Hierbei wurde meist von der Standardeinstellung von  $1 / 3,6$  für die Übersetzung vom Deichselschwenkwinkel auf den Lenkwinkel der Vorderachse bei den selbstlenkenden Dolly von Krone ausgegangen. Bei den Fahrzeugen 12-1-3 bis 12-3-3, wo dies aufgrund ungünstiger Längenverhältnisse ungünstig erschien, wurde mit dem Maximalwert von  $1 / 4,0$  gerechnet.

Demgegenüber wurde bei Fahrzeugkombinationen mit hochgekuppeltem Dolly, z. B. 3-1-3, 16-1-3, 18-1-3 und 15-1-3 mit dem Minimalwert der Lenkübersetzung von  $1 / 3,0$  simuliert, weil hier aufgrund der günstigeren Längenverhältnisse keine so starke Lenkwirkung des Dolly notwendig ist, um den Maximalwert der Kreisringbreite von 7,20 m einzuhalten. Wird in einem solchen Fall der Motorwagen darüber hinaus mit einer gelenkten Nachlaufachse ausgestattet, wird durch das gelenkte Dolly der Kurvenradius des Sattelanhängers weit vergrößert. Dadurch kann es passieren, dass der Sattelanhängers mit der vorderen, äußeren Ecke über den Außenradius des „BO-Kraftkreis“ hinausragt. Ein solcher Grenzfall ist in der Simulation des Fahrzeugs 16-1-3 in Bild 19 dargestellt. Hier läuft die vordere, äußere Ecke des Sattelanhängers genau auf dem Außenkreis. Die sich, in diesem Fall, ergebende überstrichene Kreisringbreite von 6,56 m stellt somit das Minimum dessen dar, was mit einem Standard-3-Achs-Sattelanhängers, ohne Lenk- oder Liftachse, erreicht werden kann. Würde der Sattelanhängers noch weiter hinauslaufen, müsste, nach den Erläuterungen zum § 32d StVZO (BRAUN u. KONITZER 2012), in diesem Fall das Fahrzeug mit der betreffenden Ecke des Sattelan-



**Bild 19** Simulation der Kreisfahrt nach § 32d StVZO für das Fahrzeug 16-1-3

hängers auf dem Außenkreis geführt werden, was aber fahrerisch kaum durchzuführen ist. In diesem Fall wäre es dann besser die hintere Lenkachse am Motorwagen zu sperren, wie es allem Anschein nach bei der Abnahme des Fahrzeugs 18-1-3 der Fall war.

Generell nutzen die Fahrzeuge mit Untersetzachse und Sattelanhänger (Typ 3), wo die Untersetzachse mit einer langen Deichsel tief gekuppelt ist, die maximal zulässige Kreisringbreite am weitesten aus. Fahrzeuge mit einem hoch gekuppelten Dolly sind hier in der Regel weniger kritisch, weil sich hier ein größerer Hecküberhang der Anhängerkupplung des Zugfahrzeugs günstig auf den sich ergebenden Kurvenradius des Dolly auswirkt.

Einige Fahrzeuge müssen, zur Einhaltung der maximal zulässigen Kreisringbreite von 7,20 m, zumindest eine Achse anheben. Dies ist beispielsweise bei den beiden Typ-2-Fahrzeugen 11-1-2 und 5-1-2 der Fall, bei denen laut Gutachten bei Geschwindigkeiten von unter 30 km/h die hintere Achse des Sattelanhängers angehoben wird, um den entsprechenden Ersatzradstand zu verkürzen. Da dadurch die Sattelkupplung in geringem Maße entlastet wird, ist dies aus Traktionsgründen jedoch kritisch zu sehen. Die Alternative hierzu wäre eine Lenkachse an gleicher Stelle, wie sie beispielsweise im Typ 2 Fahrzeug 13-1-2 verwendet wird.

Ein weiterer Spezialfall ist der Sattelzug mit einem weiteren Sattelanhänger (Typ 4) in den Kombinationen 10-1-4 und 10-2-4. Um die Kurvenlaufvorschriften einzuhalten, muss bei diesem Fahrzeug die 2. Achse des vorderen Sattelanhängers gelenkt werden und zugleich die 3. Achse des vorderen Sattelanhängers angehoben werden, was bei Geschwindigkeit unter 30 km/h automatisch geschieht. Da aber die Stützlast des 2. Sattelanhän-

gers zwischen diesen beiden Achsen einwirkt, ergibt sich in diesem Fall auch eine vergleichsweise ungünstige Gewichtsverteilung.

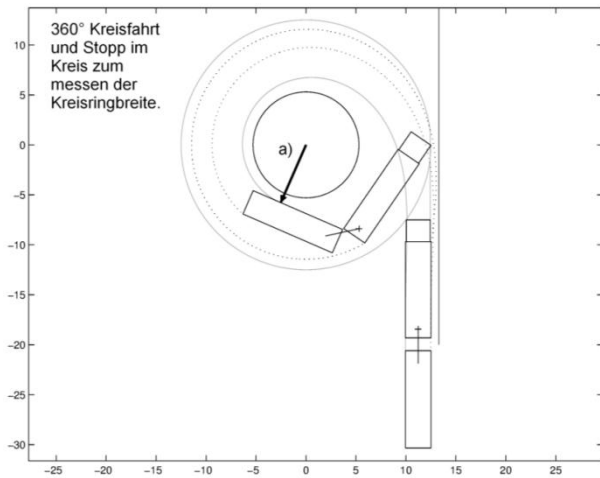
Für einen Lang-Lkw Typ 2, einen Sattelzug mit Zentralachsanhänger, erscheint eine gelenkte oder angehobene hintere Achse des Sattelanhängers obligatorisch zur Einhaltung der Kurvenlaufvorschriften. Je nach Position des Achsaggregates des Sattelanhängers und der Ersatzdeichsellänge des hinteren Zentralachsanhängers, sind hiermit dann aber sehr geringe überstrichene Kreisringbreiten möglich, wie die Kombination 6-1-2 beweist. Bei sehr ungünstigen Ersatzdeichsellängen kann es jedoch passieren, dass das Anheben oder Lenken einer Achse hier nicht ausreicht um den „BO-Kraftkreis“ zu schaffen, wie die Simulation mit den bereitgestellten Abmessungen des Fahrzeugs 11-1-2 zeigt.

Allerdings stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, in wie weit der Einsatz einer Liftachse zur Einhaltung der Kurvenlaufvorschriften zulässig ist. Die StVZO selbst, sowie die Erläuterungen dazu, enthalten hierzu keine Hinweise. In der EU-Verordnung Nr. 1230/2012 wird nur der Fall explizit behandelt, dass sich das Kurvenlaufverhalten durch angehobene Achsen verschlechtert. Dort wird verlangt, dass die Vorschriften zum Kurvenlaufverhalten auch gelten, „wenn die Hubachse(n) angehoben und die Lastverlagerungsachse(n) im Einsatz ist (sind)“ (Anhang 1 Teil C 6.2). Ob dies auch dann angewendet wird, wenn sich dadurch das Kurvenlaufverhalten verbessert, bleibt offen. Nur bei der Berechnung des Bezugsradstandes für einen Sattelanhänger wird dieser Fall explizit berücksichtigt, indem gefordert wird: „Enthält eine oder mehrere der un gelenkten Achsen eine Hubeinrichtung, so wird entweder der mit angehobener oder der mit abgesenkter Achse jeweils längere Radabstand berücksichtigt.“ (Anhang 1 Teil D 3.3). Allerdings spielt das hierbei geltende Vergleichsmaß für Sattelanhänger für die Bewertung von kompletten Fahrzeugkombinationen keine Rolle.

### 3.4.2 Auswirkungen verschiedener Varianten zur Bestimmung der überstrichenen Kreisringbreite

Für die Ermittlung der überstrichenen Kreisringbreite gibt es, je nach Veröffentlichung, unterschiedliche Vorgehensweisen. Die Gesetzestexte fordern hier lediglich eine „Kreisfahrt von 360°“ (StVZO, nach BRAUN u. KONITZER 2012) bzw. eine „vollständige Kreisfahrt von 360°“ (EU-Verordnung Nr.1230/2012 bzw. Richtlinie 97/27/EG). Aus diesen Formulierungen ergeben sich Interpretationsmöglichkeiten zur Wahl der Fahrlinie sowie dem Ort der Messung der Kreis-



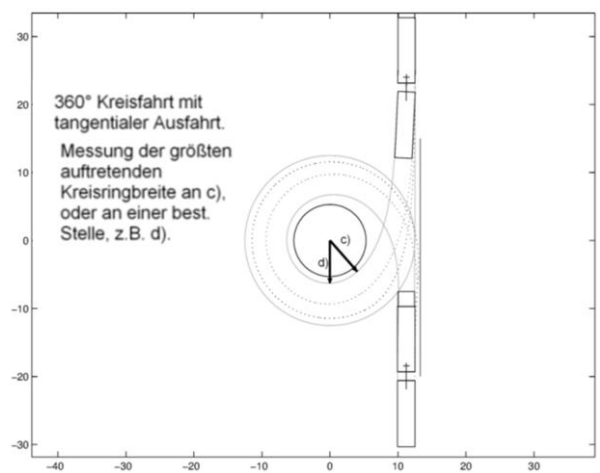


**Bild 20** Bestimmung der überstrichenen Kreisringbreite aus einer Kreisfahrt von 360°

ringbreite. So kann die überstrichene Kreisringbreite zum einen an der Position des Zugfahrzeugs gemessen werden, an der die vorderste, äußerste Begrenzung 360° überstrichen hat, ohne eventuelle Einflüsse aus der Ausfahrt aus dem Kreis zu berücksichtigen. Diese Methode wird in Bild 20 als Möglichkeit a) dargestellt.

In einer stichprobenartigen Umfrage unter den Sachverständigen von TÜV und Dekra, die die Gutachten für die Lang-Lkw durchführten, wurde übereinstimmend angegeben, die Kreisringbreite in der Fahrzeugposition zu bestimmen, bei der der Führungspunkt exakt 360° überstrichen hat, was obigem Fall a) entspricht.

Alternativ kann aber auch eine tangentiale Ausfahrt nach 360° mit berücksichtigt werden und hierbei die maximal auftretende Kreisringbreite ermittelt werden. Dies ist insofern relevant, weil sich aus vergleichenden Simulationen unterschiedliche Werte für die Kreisringbreite aus den verschiede-



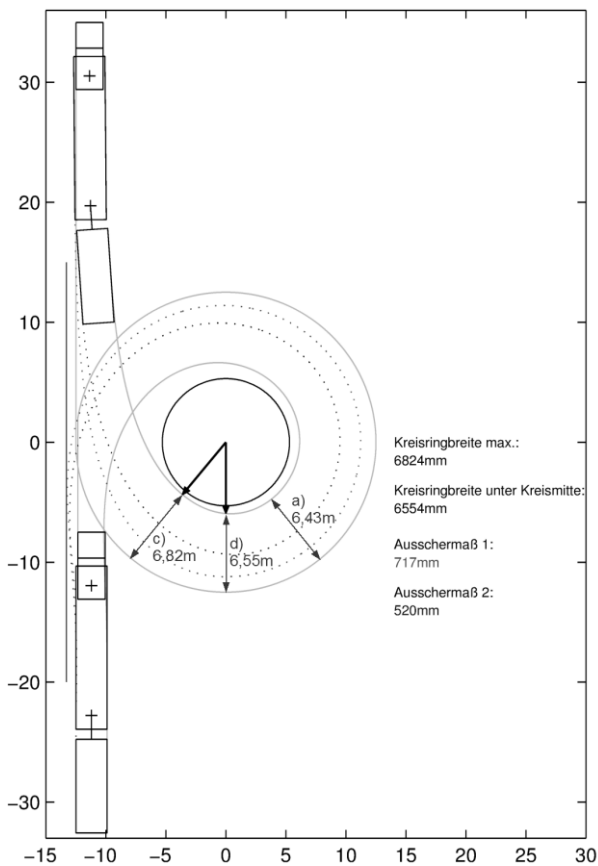
**Bild 21** Bestimmung der Kreisringbreite aus einer Kreisfahrt von 360° mit tangentialer Ausfahrt

nen Testmethoden ergeben. Die Größe der Abweichung hängt hierbei stark von der gewählten Konfiguration der Fahrzeugkombination ab. Für einen Sattelzug betragen die Unterschiede beispielsweise nur wenige Zentimeter. Für einige Arten der Lang-Lkw, speziell für Sattelzüge mit einem Zentralachsanhänger (Typ 2), können sich hier aber größere Abweichungen zwischen den Messmethoden ergeben, die bis zu 40 cm betragen können.

Explizit wird in den Erläuterungen zur StVZO von Braun und Konitzer (BRAUN u. KONITZER 2012) angeführt, „wenn der am weitesten außen liegenden, vorderste Teil [...] 360° durchfahren hat, fährt das Fz bzw. der Zug wieder aus dem Kreis heraus“. Da hierbei aber die Art und Weise der Ausfahrt aus dem Kreis nicht spezifiziert wird, kann hieraus kaum eine entsprechende Prüfvorschrift abgeleitet werden. In früheren Versuchen mit Lang-Lkw durch die BASt, beispielsweise in (GLAESER 2008), wurde dies so interpretiert, dass der Kreis nach 360° entlang der Einfahrttangente wieder verlassen wurde. Allerdings wurde in diesem Fall, nach Interpretation der entsprechenden Darstellung in (GLAESER 2008), nicht die maximal auftretende Kreisringbreite ermittelt, sondern an einer festen Position die senkrechte Höhe des Kreisrings, parallel zur Ein- beziehungsweise Ausfahrttangente, ermittelt. In Bild 21 wird dieses Maß mit Variante d) bezeichnet, während c) die maximal auftretende Kreisringbreite beschreibt, deren Position von der speziellen Fahrzeugkonfiguration abhängig ist.

In den Simulationen mit Lang-Lkw zeigt sich außerdem, dass nach einer Kreisfahrt von 360° der letzte Anhänger oftmals noch keinen stationären Kreisfahrtzustand erreicht hat. Die errechnete, benötigte Kreisringbreite nach einer 360°-Kreisfahrt ist somit kleiner als für den stationären Zustand. Der Wert der überstrichenen Kreisringfläche bei stationärer Kreisfahrt hierzu kann über die trigonometrischen Beziehungen der einzelnen Fahrzeugteile zueinander berechnet werden, wie es beispielsweise in (HOEPKE 2010, S. 154) dargestellt ist. Zur Unterscheidung von der 360°-Variante a) wird dieses Maß hier mit Methode b) gekennzeichnet.

Inwiefern sich die so generierten Ergebnisse unterscheiden hängt sehr stark von der Konfiguration der betrachteten Fahrzeugkombination ab. Wie in ausführlichen Validierungsversuchen mit dem Standardsattelzug herausgefunden wurde, sind für diese Fahrzeuge die Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten der Kreisfahrt vernachlässigbar klein. Dies ist wohl auch der Grund, weshalb es in den bisherigen Betrachtungen hierzu keine Unterscheidungen gab. In der Simulation der verschiedenen Typen von Lang-Lkw zeigte sich je-



**Bild 22** Unterschiede der Kreisringbreite je nach Variante der Bestimmung am Lang-Lkw vom Typ 2

doch, dass bei einigen Fahrzeugen die maximale, überstrichene Kreisringbreite bei einer tangentialen Ausfahrt aus dem Kreis nach  $360^\circ$  deutlich größer ist, als der Wert, der direkt an der  $360^\circ$ -Position ohne Ausfahrt ermittelt wird. Dieser Effekt tritt vor allem bei Fahrzeugen auf, die über einen langen Überhang des Kupplungspunktes verfügen. Somit sind in diesem Zusammenhang vor allem die Lang-Lkw-Typen 2 und 5 von besonderem Interesse, was im folgenden an folgenden Beispielfahrzeugen erläutert wird.

### Betrachtungen am Lang-Lkw Typ 2

Die Simulation einer Kreisfahrt von  $360^\circ$  für die Fahrzeugkombination 6-1-2 ergibt eine maximale überstrichene Kreisringbreite von 6,43 m nach Variante a). Für die Betrachtung einer stationären Kreisfahrt ergibt sich nur ein geringfügig höherer Wert für die Kreisringbreite von 6,46 m. Fährt diese Fahrzeugkombination allerdings nach einer Kreisfahrt von  $360^\circ$  entlang der Einfahrttangente aus dem Kreis heraus, ergibt sich ein deutlich höherer Maximalwert der überstrichenen Kreisringbreite nach Fall c) von 6,82 m, wie in Bild 22 dargestellt ist. Auch das senkrechte Maß der Kreisringbreite nach Fall d) liegt mit 6,55 m noch 0,12 m über dem  $360^\circ$ -Wert nach Fall a).

### Betrachtungen am Lang-Lkw Typ 5

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Betrachtung des verlängerten Lastzuges nach Lang-Lkw Typ 5. Die Simulation einer  $360^\circ$ -Kreisfahrt der Fahrzeugkombination 7-1-5 ergibt eine überstrichene Kreisringbreite nach Fall a) von 6,25 m. Die Berechnung der stationären Kreisfahrt ergibt einen Vergleichswert von 6,27 m für den Fall b). Betrachtet man nun auch hier eine tangentiale Ausfahrt nach  $360^\circ$  ergibt sich eine maximale überstrichene Kreisringbreite von 6,48 m nach Fall c). Der mittlere Wert für den Fall d) liegt in diesem Fall mit 6,29 m nahe am stationären Fall.

### Betrachtungen am Lang-Lkw Typ 3

Es gibt aber auch unter den Lang-Lkw Kombinationen, bei denen die überstrichene Kreisringbreite annähernd unabhängig von der Variante der Ermittlung ist. Dies gilt vor allem für Lang-Lkw mit einem selbstlenkenden Dolly als Untersetzachse. Zum Vergleich wird hier ein typischer Vertreter eines Lang-Lkw Typ 3 mit selbstlenkendem Krone-Dolly betrachtet. Für die Fahrzeugkombination 8-1-3 ergibt sich für die Variante a) eine simulierte Kreisringbreite von 7,18 m, wie in Tab. 3 aufgeführt ist. Werden nun hier die Varianten c) und d) berechnet, zeigt sich nur eine sehr geringe Vergrößerung der überstrichenen Kreisringbreite von 7,21 m bzw. 7,23 m. Trotz der um ca. 2 m größeren Gesamtlänge gegenüber dem vorher betrachteten Lang-Lkw Typ 5, unterscheiden sich bei Lang-Lkw vom Typ 3 die Varianten der Ermittlung der Kreisringbreite kaum in ihrem Ergebnis.

Auch wenn bei den hier vorgestellten Beispielen das maximal zulässige Maß von 7,20 m nicht, oder nur im Bereich der Messungenauigkeit überschritten wird, so kann es durchaus Fahrzeugkombinationen geben, die die Vorgaben zur überstrichenen Kreisringbreite bei einer Ermittlung des Maximalwertes nach Variante a) noch einhalten, aber bei einer Berücksichtigung der tangentialen Ausfahrt nach Variante c) den Innenkreis geringfügig überfahren. Da die entsprechenden gesetzlichen Vorgaben nicht eindeutig sind, sollte spätestens bis zu einer eventuellen, flächendeckenden Einführung der Lang-Lkw die genaue Messmethode durch den Gesetzgeber spezifiziert werden.

## 4 AP 3 - Analyse der Bremsverzögerung und des Bremsansprechverhaltens

### 4.1 Problemstellung und Zielsetzung

Gemäß der globalen Zielsetzung des Forschungsprojekts die Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Fahrzeugsicherheit zu untersuchen, werden in AP 3 mit der Bremsverzögerung und dem Bremsansprechverhalten zentrale sicherheitsrelevante Fahrzeugeigenschaften analysiert.

Der gesellschaftliche Diskurs zum Lang-Lkw-Feldversuch ist geprägt von Bedenken, ob ein erhöhtes Gefahrenpotenzial in Folge veränderter Fahrzeugdimensionen besteht. Dies wird durch zahlreiche Kampagnen und Initiativen (APS E.V.) bestärkt, obwohl dabei zumeist auf längere Lkw-Kombinationen mit 60 t zulässigem Gesamtgewicht Bezug genommen wird und keine ausreichende Abgrenzung zur 40 t-Variante des Feldversuchs stattfindet.

Ziel dieses AP ist es, durch Untersuchung der tatsächlichen Bremsverzögerungen und des Bremsansprechverhaltens der einzelnen Module der Fahrzeugkombinationen die Sicherheit der am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeuge zu objektivieren. Durch vergleichende Messungen mit konventionellen Fahrzeugkombinationen (Sattel- und Lastzüge) kann eine Gegenüberstellung erfolgen und die ingenieurmäßige Abschätzung über ein ggf. erhöhtes Gefahrenpotenzial getätigt werden.

### 4.2 Stand der Wissenschaft und Technik

In Bezug auf das Bremssystem verfügen alle am Lang-Lkw-Feldversuch teilnehmenden Fahrzeuge über eine dem Stand der Technik entsprechende Ausstattung, wie dies die LKWÜberlStVAusnV in § 5 als technische Anforderungen vorschreibt. Alle vorliegenden Übereinstimmungsnachweise für § 7 der LKWÜberlStVAusnV bescheinigen, dass die Fahrzeuge über ein elektronisch gesteuertes Bremssystem (EBS) und Scheibenbremsen verfügen. Über die LKWÜberlStVAusnV hinaus gehört ein automatischer Blockierverhinderer (ABV, ABS) nach § 41b der StVZO zur Pflichtausrüstung für alle Lkw mit einem zGG über 3,5 t.

Das ABS-System verhindert ein Blockieren der Räder durch Regelung des Radschlupfes, wodurch eine optimale Ausnutzung der Brems- und Seiten-

führungskräfte zwischen Reifen und Fahrbahn gewährleistet wird.

Beim EBS werden pneumatische Bremsleitungen im Fahrzeug, soweit möglich, durch elektrische ersetzt, wodurch der Anteil kompressibler Luft im Bremssystem reduziert wird. Die weiterhin konventionell druckluftbetätigten Radbremsen werden beim EBS über Elektro-Pneumatikventile angesteuert. Dadurch können die Bremsleistungen leichter an variable Beladungszustände angepasst und die Ansprechzeiten reduziert werden, woraus ein verkürzter Bremsweg resultiert.

Der Gesetzgeber legt für die Bremsansprechzeit und die halbe Schwellzeit bis zum Aufbau der vollen Bremsleistung eine Höchstdauer von 0,54 Sekunden fest, verbunden mit einem maximalen Bremsweg von 36,7 Meter aus einer Geschwindigkeit von 60 km/h. Daraus ergibt sich eine vorgeschriebene Mindestverzögerung für die Vollverzögerungsphase von  $5 \text{ m/s}^2$  (HOEPKE 2010).

### 4.3 Methodisches Vorgehen

Zur Ermittlung des Bremsweges wurde eine Fahrzeugkombination eines Lang-Lkw nach Typ 3 aufgebaut. Mit einer Beladung von etwa 17 t ergibt sich eine Gesamtmasse von ca. 40 t. Bei den Gewichten handelt es sich um Testgewichte aus Beton (Bild 23).

Als Referenzfahrzeug dient der Sattelzug des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik, welcher mit einer Beladung von ca. 25,5 t ebenfalls eine Gesamtmasse von ca. 40 t aufweist. (Bild 24).

Die Versuchsanordnung entspricht einem „Worst Case“-Szenario für den Bremsweg, wo beide Fahrzeuge ihr maximal zulässiges Gesamtgewicht ausschöpfen. Daher wurde bewusst keine Versuchsanordnung mit volumetrischer Vollbeladung

Lang-LKW Typ 3

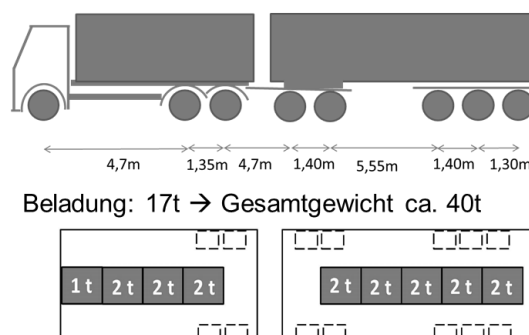
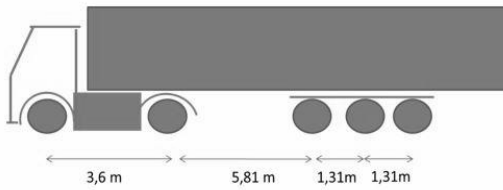


Bild 23 Beladungsplan Lang-Lkw

## Sattelzug



Beladung: 25,5 t → Gesamtgewicht ca. 40t

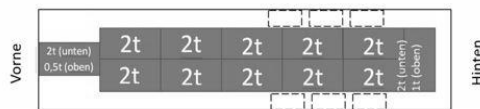


Bild 24 Beladungsplan Sattelzug

bei gleicher Dichte der Ladung gewählt. Setzt man eine gleichzeitige Ausnutzung der Nutzlast und des Nutzvolumens des Lang-Lkw an, beträgt die Dichte der Ladung rund  $120 \text{ kg/m}^3$ . Würde man den Sattelzug mit einem Ladegut dieser Dichte beladen, käme er auf ein Gesamtgewicht von etwa 25 t, wodurch der Bremsweg geringer ausfallen würde.

Die Bremsanlagen beider Versuchsfahrzeuge entsprechen dem Stand der Technik und sind zusätzlich mit einem EBS-System ausgestattet (gemäß § 5 der LKWÜberStVAusV).

Als Testgelände dient der Taxiway des stillgelegten Flughafens Leipheim. Dieser bietet eine ebene Fahrbahn mit konstanter Oberflächenbeschaffenheit. Der Bremsversuch des Sattelzuges wurde am 08.03.2013, der des Lang-Lkw am 15.04.2013 durchgeführt. An beiden Versuchstagen waren die Wetterbedingungen vergleichbar. Es war trocken und windstill.

Vor Beginn der Bremsungen wird die Strecke präpariert. Es werden der Startpunkt der Bremsung kenntlich gemacht sowie die Videoeinheiten zur Überwachung des Versuchs installiert. Die Reifen des Testfahrzeuges werden vor der Bremsung einige Minuten warmgefahren. Zunächst erfolgt eine Probeprobefahrt. Dazu wird das Versuchsfahrzeug auf etwa die Hälfte der Zielgeschwindigkeit beschleunigt und im Anschluss zum Stillstand gebracht. Ist die Funktionalität aller Systeme gewährleistet, werden die Bremsversuche aus 80 km/h durchgeführt.

Der Fahrer fährt mit einer definierten Geschwindigkeit von 80 km/h auf den markierten Punkt zu. Dort betätigt er das Bremspedal, sodass das Fahrzeug mit maximaler Verzögerung gebremst wird bis der Lkw vollständig zum Stillstand kommt. Die Entfernung von Startpunkt bis Endpunkt wird mit-

hilfe eines Maßbandes ermittelt. Aufgrund der Verfügbarkeit eines EBS-Systems wird das Ansprechverhalten nicht explizit betrachtet.

Zur Verifizierung des Bremsvorgangs wird der gesamte Versuch videoüberwacht. Die gemessenen Werte werden durch eine Videoanalyse plausibilisiert. Die Bremsungen wurden mehrfach wiederholt, sodass die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse innerhalb der geforderten Toleranzbereiche bestätigt werden kann.

#### 4.4 Ergebnisse

Der gemessene Bremsweg des Lang-Lkw liegt mehrfach reproduziert bei 36 m (Bremspedalbetätigung bis Stillstand des Fahrzeugs). Der des Referenzfahrzeuges bei 44 m. In Bild 25 werden die Bremswege der Fahrzeuge grafisch gegenübergestellt. Die ermittelten Wege sind kürzer als die vom Gesetzgeber geforderten 61 m für eine Bremsung aus 80 km/h nach UN/ECE R13.

Während der Bremsphase gab es bei keinem der Fahrzeug Unregelmäßigkeiten und beide blieben bis zum Stillstand gestreckt und gerade ohne Ausbrechen eines Fahrzeugteils. Die ordnungsgemäße Funktion der Spurhaltung wird seitens des NRW Modellversuchs bestätigt: „Der Modellversuch ergab im Ergebnis, dass die Spurhaltung der Fahrzeugkombinationen bei Geradeausfahrt und Bremsungen einwandfrei war.“ (WANGRIN et al. 2009)

Der kürzere Bremsweg des Lang-Lkw lässt sich anhand der höheren Anzahl gebremster Räder begründen. Bei gleicher Masse stehen dem Lang-Lkw Typ 3 drei Achsen mehr zur Verfügung, um die Bremskraft auf die Straße zu übertragen. Dies bestätigen auch die Studien des VDA: „Der Bremsweg eines Lang-Lkw ist nicht länger als bei einem herkömmlichen Lkw. Da das zulässige Gesamtgewicht nicht steigt, muss auch nicht mehr Tonnage abgebremst werden. Im Gegenteil: Ein Lang-Lkw

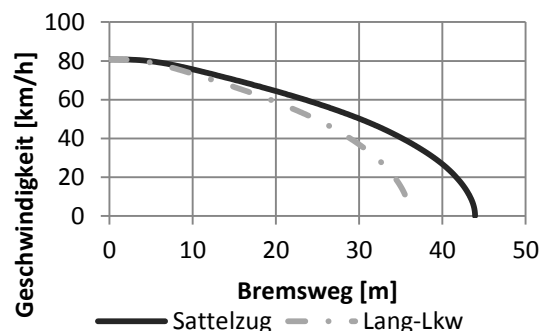


Bild 25 Vergleich der Bremswege

---

*hat mehr Achsen, an denen Bremskraft mobilisiert wird. Das Bremsverhalten wird bei den verlängerten Fahrzeugen dadurch unter Umständen sogar noch besser. Auch auf nasser und winterlicher Fahrbahn bremsen Lang-Lkw mindestens genauso gut wie herkömmliche Lkw mit 40 Tonnen“ (VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE 2008).*

## 5 AP 4 - Analytische Untersuchung von Windstabilität und mögliche Sogwirkung auf Zweiräder

### 5.1 Problemstellung und Zielsetzung

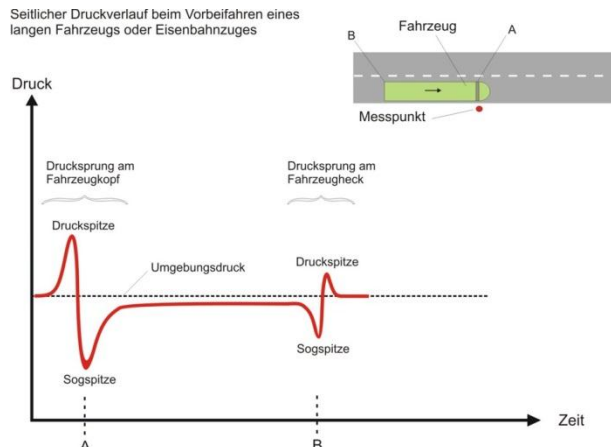
Für Lang-Lkw ist nach § 9 Absatz 1 der LKWÜberlStVAusnV im Allgemeinen ein Überholverbot vorgesehen. Absatz 2 sieht hierfür jedoch die Ausnahme vor bei „Fahrzeugen und Zügen, die nicht schneller als 25 km/h fahren können oder dürfen“. Dies schränkt die Bauarten der an einem Überholvorgang beteiligten Fahrzeuge ein und betrifft somit vorwiegend schweres, landwirtschaftliches Gerät oder leichte Zweiräder wie Fahrräder und Mopeds. Zweiräder sind hierbei von einer möglicherweise erhöhten Sogwirkung besonders betroffen, die zu einer Destabilisierung und somit zu schweren Unfällen folgen könnten. Hieraus ergibt sich das Szenario eines auf einer Landstraße fahrenden, von einem Lkw überholten Zweirads, das im Folgenden betrachtet werden soll.

Die an Fahrzeugen wirksamen Luftangriffskräfte und -momente hängen im Wesentlichen von der Fahrzeuggeometrie und -größe ab. Bei schweren Nutzfahrzeugen liegt der Fokus hauptsächlich auf dem Luftwiderstand, weil dieser an einen hohen Anteil am Kraftstoffverbrauch verursacht. Die Empfindlichkeit gegen Seitenwind steigt jedoch mit zunehmender Fahrzeuglänge und abnehmendem Fahrzeuggesamtgewicht. Lang-Lkw weisen im Gegensatz zu Lkw herkömmlicher Bauart (beispielsweise Lastzug) aufgrund ihrer höheren Gesamtlänge bei 25 m eine rund 35 % größere Seitenfläche auf. Bei Seitenwind bewirkt diese Windangriffsfläche ein Kippmoment, die die Fahrzeugkombination möglicherweise destabilisiert. Dieses Szenario ist besonders bei Leerfahrten zu beachten, bei denen die Lang-Lkw Fahrzeugkombinationen mit ihrem Eigengewicht, das rund 50 % über dem herkömmlicher Lkw liegt, dem Kippmoment am wenigsten Rückstellmoment entgegenbringen können.

### 5.2 Stand der Wissenschaft und Technik

#### 5.2.1 Sogwirkung auf Zweiräder

Zur oben genannten Problemstellung wurden bisher noch keine Untersuchungen durchgeführt. Jedoch existieren diverse Analysen zur seitlichen



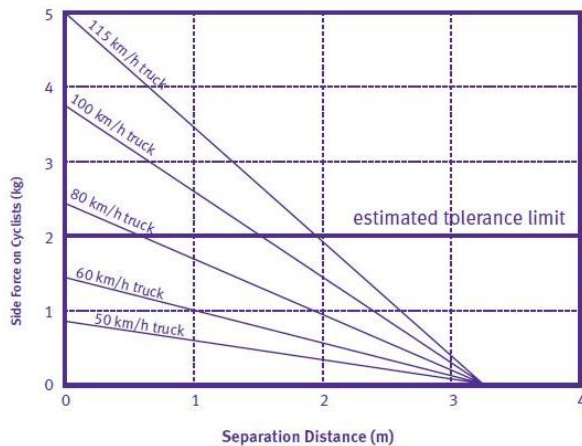
**Bild 26** Qualitative Darstellung der Druckverhältnisse um einen fahrenden Lkw (RUCK 2013)

Druckverteilung vorbeifahrender Fahrzeuge, sowie der daraus resultierenden Kräfteinwirkung.

Eine Studie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) führte zu diesem Zweck Simulationen unter Verwendung verschiedener Fahrzeugtypen durch (RUCK 2013). Untersucht wurden Lkw mit geringer Länge, sowie Pkw und die durch sie verursachten seitlichen Druckverteilungen.

Bild 26 zeigt den qualitativen Verlauf des statischen Drucks an der Flanke eines untersuchten Lkw, wobei eine stationäre Berechnung zugrunde gelegt wurde. Das Szenario entspricht einem festen Messpunkt, an dem das Fahrzeug vorbeigefahren wird und an dem in gleichmäßigen Abständen Werte der vollständig entwickelten Strömung entnommen werden können. Zu erkennen sind Druck- und Sogspitzen an der Front und am Heck des Lkw, wobei die Ausprägungen an der Fahrzeugfront stärker ausfallen als jene am Ende des Lkw. Dies ist bedingt durch das Druckpolster, das sich aufgrund der Anstauung der Luft im Anströmungsbereich des Fahrzeugs ausbildet. Das Abströmen der Luft entlang der Flanken des Führerhauses sorgt für ein Absinken des Druckes unter den Wert des Referenzdrucks, wodurch es zur Ausbildung einer Sogspitze kommt. Diese Druckfluktuationen verursachen Seitenkräfte, welche bei Überholvorgängen zu einem Versatz der Fahrspur des überholten Zweirad führen können. Dies muss durch teilweise starke Lenkbewegungen ausgeglichen werden, welche den Abstand zum Überholenden weiter verringern und somit einen Sturz des Zweiradfahrers nach sich ziehen könnte.

Eine weitere Untersuchung des Verkehrsministeriums des australischen Bundesstaates Queensland, Queensland Transport, liefert eine Aufstellung der Zusammenhänge zwischen Fahrtgeschwindigkeit, Überholabstand und der resultierenden Seitenkraft (QUEENSLAND TRANSPORT



**Bild 27** Zusammenhang der seitlichen Krafteinwirkung mit Überholabstand und Geschwindigkeit des Lkw

2006). Bild 27 aus dieser Veröffentlichung zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen seitlichen Kräften auf Fahrradfahrer und den Überholabstand. Es wird aus den zur Verfügung stehenden Unterlagen nicht ersichtlich, in welcher Weise diese Daten erhoben wurden. Daher sollte kritisch bewertet werden, welche Aussagekraft diese Studie besitzt und ob die angegebenen Werte lediglich auf Abschätzungen beruhen. Da der potenzielle Gehalt einer derartig ausführlichen Auswertung sehr groß ist, ist fraglich, inwiefern tatsächliche praktische oder numerische Untersuchungen angestrengt wurden.

### 5.2.2 Seitenwindstabilität

Die Analyse der Seitenwindstabilität bedarf einer gesonderten Simulation, welche ein komplexeres Setup aufweist. Diese Effekte können anhand einer stationären Berechnung der Strömung nicht betrachtet werden. Daher wäre es nötig, eine Simulation durchzuführen, welche die transienten Strömungszustände zu erfassen vermag und deren zeitliche Entwicklung festhält. Berechnungen dieser Art sind sehr komplex, sowie zeit- und rechenaufwändig.

## 5.3 Methodisches Vorgehen

### 5.3.1 Sogwirkung auf Zweiräder

Die mögliche Sogwirkung auf Zweiräder wird mit Hilfe von CFD-Methoden untersucht. In Ermangelung von Referenzwerten für konventionelle Lkw-Kombinationen und deren Auswirkungen auf andere Verkehrsteilnehmer während eines Überholvorgangs ist es nötig, einen direkten Vergleich zwischen Lkw herkömmlicher Bauart und Lang-Lkw

anzustreben. Zu diesem Zweck erfolgt analog zu (RUCK 2013) (Bild 26) eine Gegenüberstellung der seitlichen Druckverhältnisse eines Lastzuges mit einer zulässigen Maximallänge von 18,75 m und eines Lang-Lkw vom Typ 3 mit einer Gesamtlänge 25,25 m. Die Auswahl gründet sich auf dem Wissen, dass die gewählte Kombination des Lang-Lkw in dieser Variante am häufigsten auftritt und somit mit größerer Wahrscheinlichkeit an Überholvorgängen beteiligt sein wird. Die Variante des Lastzugs als Referenzfahrzeug bietet hierbei die beste Vergleichbarkeit mit der Lang-Lkw-Kombination, weil es sich um sehr ähnliche Bauformen handelt und sich beide Fahrzeuge hauptsächlich durch die Länge des letzten Anhängers unterscheiden. Die vorliegende Untersuchung hat die Aufgabe den Einfluss der vergrößerten Länge von Lkw auf den umgebenden Verkehr zu analysieren, weshalb hinsichtlich der jeweiligen Längsabmessungen die zulässigen Maximalwerte gewählt wurden, um somit die am kritischsten zu betrachtenden Fälle zu prüfen.

Zur Auswertung der Druckverteilungen im Bereich der Fahrzeuggeometrie bestehen diverse Möglichkeiten zur Visualisierung der Ergebnisse (vgl. Bild 26). Um den zu erarbeitenden Plots möglichst aussagekräftige Variablenwerte zugrunde zu legen, bieten sich an dieser Stelle der statische Druck und dessen Gradient an, sowie eine dimensionslose Kenngröße, der sogenannte Druckbeiwert. Dieser stellt das Verhältnis des statischen Drucks an einem beliebigen Feldpunkt und dem Staudruck der Strömung dar und weist somit einen Wertebereich von -1 bis 0, beziehungsweise 0 bis 1 auf. Negative Werte beschreiben hierbei ein Unterdruckgebiet, positive Werte Bereiche erhöhten Drucks. Aufgrund der Normierung auf den Staudruck des Strömungsfeldes ändert sich die Verteilung des Druckbeiwerts nicht, wenn Parameter der Anströmung, wie beispielsweise die Geschwindigkeit oder die Dichte des Fluids geändert werden. Dies beruht auf der Definition des Staudrucks, welcher sich mittels Dichte und Geschwindigkeit berechnen lässt. Eigentlich besitzt der Druckbeiwert nur in reibungsfreien und inkompressiblen Strömungen korrekte Aussagekraft, doch lässt er sich erfahrungsgemäß sehr gut auch in vorliegender Berechnung anwenden. Zudem ist aufgrund einer ausreichend kleinen Mach-Zahl eine Inkompressibilität der vorliegenden Untersuchung anzunehmen.

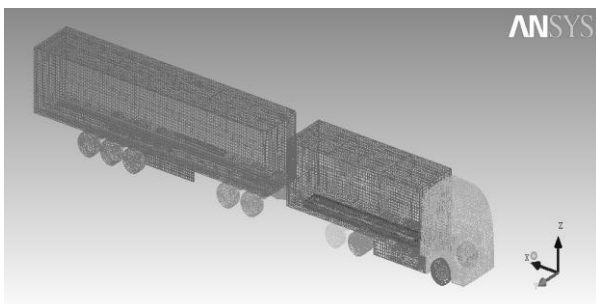
Für die Analyse der aerodynamischen Einflüsse auf andere Verkehrsteilnehmer ist der Abstand zwischen den an einem Überholvorgang beteiligten Fahrzeugen von großer Bedeutung. Zusätzlich muss sich nach § 5 der StVO der einzuhaltende Abstand während eines Überholmanövers nach den daran beteiligten Fahrzeugen richten. Bei

Fahrrädern wird im Allgemeinen ein Mindestabstand von 1,5 m empfohlen (ALLGEMEINER DEUTSCHER FAHRRAD-CLUB E. V. 2013). Dieser wird auch in folgenden Berechnungen als Grundlage gesetzt.

Zusätzlich werden die Druckverhältnisse in verschiedenen Abständen zur Lkw-Seite untersucht, um somit die Auswirkungen eines zu geringen Seitenabstandes einschätzen und gegebenenfalls eine geeignete Empfehlung abgeben zu können.

Die gesetzliche Beschränkung der Geschwindigkeit für Lkw auf Landstraßen beträgt 60 km/h, was als Grundlage für die Simulation des Überholvorgangs herangezogen wird. Um mögliche Geschwindigkeitsüberschreitungen zu berücksichtigen, wird diese Geschwindigkeit mit einer Toleranz von 5 km/h beaufschlagt und ergibt somit die Simulationsgeschwindigkeit von 65 km/h.

Voraussetzung für eine aussagekräftige CFD-Simulation ist die Konstruktion geometrischer Modelle. In diesem Fall umfasst dieser Konstruktionsvorgang die Modellierung eines konventionellen Lastzugs, sowie eines Lang-Lkw vom Typ 3 (Bild 28). Hierbei ist zu beachten, eine Detaillierungstiefe zu wählen, die die korrekte Wiedergabe der zu betrachtenden physikalischen Größen gewährleistet, einen unnötig hohen Aufwand in Vernetzung und Rechnung jedoch vermeidet. Ziel dieser Untersuchung ist der Vergleich der seitlichen Krafteinwirkung auf Zweiräder an den Flanken der modellierten Lkw-Kombinationen, wozu eine niedrige bis mittlere Auflösung für eine qualitativ richtige Wiedergabe der Druckverhältnisse als ausreichend angesehen wird. Hierzu bedarf es der korrekten Konstruktion der Hauptabmessungen, die die Länge des Motorwagens und des Anhängers oder Aufliegers, die Höhe und Breite des Lkw, sowie die Achsabstände umfassen. Detailreichere Gebiete wie der Unterboden der Fahrzeuge werden somit nicht aufgelöst und es erfolgt eine Beschränkung auf größere Strukturen im Strömungsgebiet, zu denen, zusätzlich zu den bereits aufgezählten Fahrzeugkomponenten wie Motorwagen und Anhänger, auch Reifen und Achsen zählen.



**Bild 28** Geometrie des simulierten Lang-Lkw

Die Vernetzung erfolgte unter Verwendung von Icem CFD aus der ANSYS-Produktfamilie in Form eines unstrukturierten Netzes, das die Aufgabe der Diskretisierung der Modellgeometrie erfüllt. Der erste Schritt bestand in der Konstruktion eines Strömungsgebiets von ausreichender Größe, um eine vollständige Entwicklung der physikalischen Größen zu gewährleisten. Um eine angemessene Auflösung der Druckverhältnisse in der Nähe der Lkw zu erreichen, wurden zwei Regionen mit erhöhter Netzdichte angelegt, die mit zunehmender Nähe zum Lkw eine feinere Auflösung der Strömung ermöglichen. Die höhere Auflösung in diesen Gebieten gewährleistet die korrekte Wiedergabe des Druckfeldes in der Nähe der Lkw, sowie eine verbesserte Auflösung der Strömung an deren Oberfläche.

Um die korrekte Ausbildung der Druckverhältnisse zu erreichen, bedarf es der Definition geeigneter Randbedingungen. Zu diesem Zweck wird das rechteckige Strömungsgebiet in einzelne Teile aufgespalten, die mit den jeweils passenden Konditionen belegt werden. Im Einzelnen wurden die folgenden Teile des Strömungsgebiets definiert.

- Einlass
- Auslass
- Seitliche Begrenzungen links/rechts
- Fahrbahn
- Oberer Abschluss

Für den Einlass wurde eine Geschwindigkeitsrandbedingung gewählt, die für den Beginn des Strömungsgebiets eine Geschwindigkeit von 65 km/h aufprägt. Die seitlichen Begrenzungen, sowie der obere Abschluss des Strömungsgebiets unterliegen einer Druckrandbedingung. Diese gibt den umgebenden Referenzdruck von einer Atmosphäre vor, beschränkt jedoch keine weiteren physikalischen Größen des Strömungsgebiets und erlaubt diesen somit eine freie Entwicklung. Der Auslass wird mit einer Auslassrandbedingung belegt, die ebenso wie Druckrandbedingungen den Referenzdruck außerhalb des Strömungsgebiets vorgibt. Der untere Abschluss des Strömungsgebiets wird als Fahrbahn festgelegt und eine Randbedingung für Wände definiert, die der Strömung eine Haftbedingung an dieser Oberfläche vorschreibt und somit die Geschwindigkeit direkt auf dieser Fläche gleich null setzt.

Zur qualitativen Kontrolle der erhaltenen Ergebnisse kann auf (RUCK 2013) zurückgegriffen werden. Die hier angegebenen Ergebnisse wurden ebenfalls durch eine stationäre Rechnung ermittelt, was einem festen Messpunkt an der Lkw-Flanke entspricht. An diesem Messpunkt können Druckwerte einer vollständig ausgebildeten Strömung ent-



nommen und ausgewertet werden. Hierzu werden Messlinien definiert, die sich in unterschiedlichen Abständen zum Lkw an der Fahrzeugseite erstrecken. Anschließend können in gleichmäßigen Abständen, oder in durch die Netzdichte gesteuerten Intervallen einzelne, zur jeweiligen Messlinie gehörige Punkte untersucht werden. Somit werden über die gesamte Fahrzeuglänge Messwerte ermittelt, die die bereits dargestellten Druck- und Sogspitzen an Front und Heck des Fahrzeugs ergeben, sowie das leichte Unterdruckgebiet an der Seite des Lkw aufweisen.

Ein wichtiges Kriterium zur Überwachung der Simulation und der Bewertung der Richtigkeit der Ergebnisse ist die Konvergenz der Residuen der Grundgleichungen wie Masse- und Impulserhaltung, sowie die Konvergenz einzelner physikalischer Größen. Zu diesem Zweck wurden Messpunkte im Anströmungsgebiet und Nachlauf der Lkw, sowie an den Flanken der Modelle definiert, die die Konvergenz des Drucks an diesen Stellen überwachen. Nachdem sich in allen zu betrachtenden Größen ein stationärer Zustand eingestellt, erfolgt die Auswertung der erhaltenen Ergebnisse.

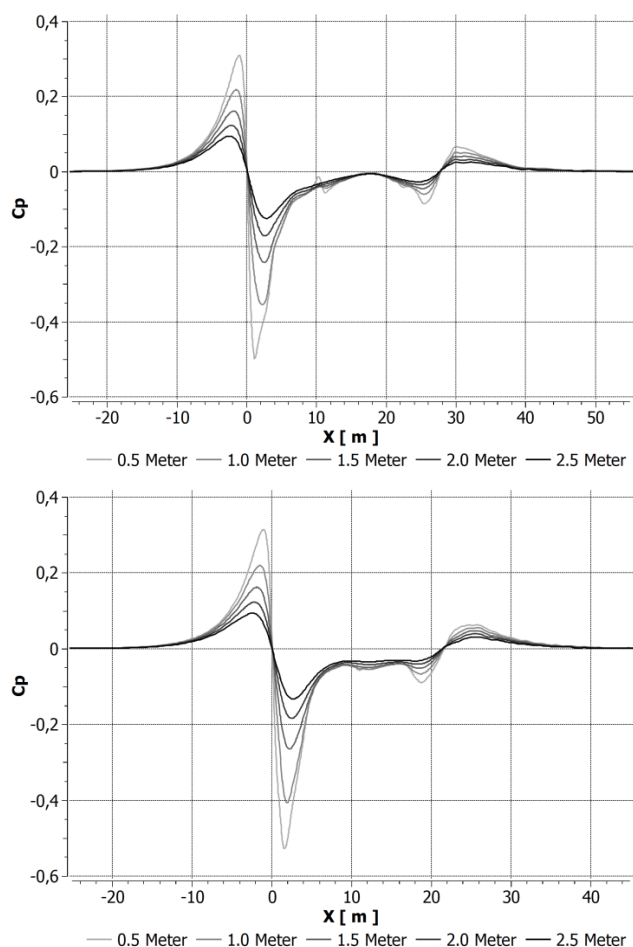
### 5.3.2 Seitenwindstabilität

Die Windstabilität von Lang-Lkw wurde im Gegensatz zur möglichen Sogwirkung auf Zweiräder im Rahmen dieser Studie nicht über CFD-Methoden untersucht werden, weil Aufwand und Komplexität der Simulationen ungleich höher wären. Daher wurde auf Fahrerbefragungen, die Teil der Fahrzeugbegutachtungen waren, zurückgegriffen.

## 5.4 Ergebnisse

### 5.4.1 Sogwirkung auf Zweiräder

Bild 29 zeigt die Druckbeiwerte entlang des Lang-Lkw (oben) und des Lastzuges (unten) für verschiedene Überholabstände. Im Nullpunkt der Abszissen befindet sich jeweils die Fahrzeugfront. Negative Werte der Abszissen kennzeichnen die Druckgebiete vor den Lkw. Positive Werte der Abszissen bilden die Druckbeiwerte entlang der Lkw sowie in deren Nachlauf ab. Die Resultate der Simulation zeigen eine Druckspitze an der Front der Lkw, welche hervorgerufen wird durch das vo-



**Bild 29** Abhängigkeit der Druckbeiwerte vom seitlichen Abstand des überholenden Lang-Lkw (oben) bzw. Lastzug (unten)

ausgehende Druckpolster. Auf Druck- folgt eine Sogspitze, welche an den Flanken des Fahrerhauses lokalisiert ist und durch das seitliche Abströmen der Luft hervorgerufen wird. Die Differenz zwischen Druck- und Sogspitze an der Fahrzeugfront entspricht dem größten Druckgradienten des Strömungsfeldes, daher ist dort mit den stärksten seitlichen Krafteinwirkungen auf den Überholten zu rechnen. Des Weiteren ist eine Abhängigkeit der Größe des Druckgradienten vom seitlichen Abstand zum Lkw zu erkennen, wobei die Ausprägung dieser Schwankungen mit zunehmendem Abstand geringer ausfällt. Daraus wird ersichtlich, dass ein ausreichender Sicherheitsabstand während eines Überholvorganges von großer Bedeutung ist.

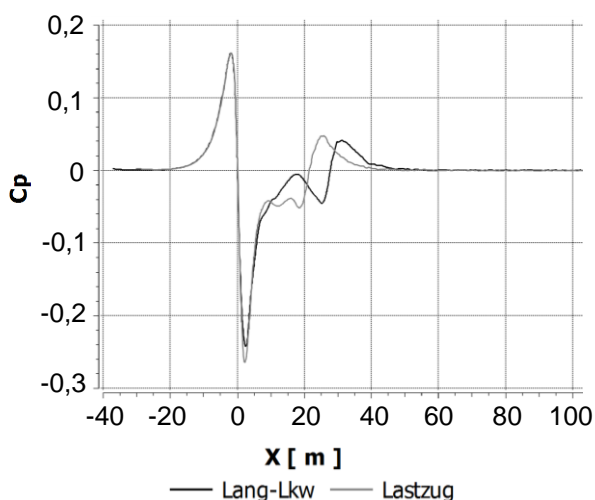
Um die Vergleichbarkeit der Verhältnisse der beiden Lkw-Kombinationen herzustellen, erfolgt eine direkte Gegenüberstellung der Druckbeiwerte für Lastzug und Lang-Lkw bei einem Überholabstand von 1,5 m (Bild 30). Anhand dieses Vergleichs wird ersichtlich, inwiefern eine erhöhte Gefährdung durch eine größere Länge des überholenden Fahrzeugs gegeben sein könnte. Basierend auf diesen Ergebnissen lässt sich eine Einschätzung treffen, ob hinsichtlich der dauerhaften Einführung von Lang-Lkw in Deutschland gegebenenfalls gesonderte Regelungen für Sicherheitsabstände beim Überholen von Zweirädern für diese Fahrzeugkombinationen erforderlich sind. In diesem Vergleich sind bei beiden Fahrzeug-Kombinationen Druck- und Sogspitzen an der Front des Lkw zu erkennen. Diese sind nahezu identisch ausgeprägt, was darauf hinweist, dass die auftretenden seitlichen Druckkräfte in beiden Fällen ebenfalls die gleiche Größe aufweisen. Desgleichen lassen die am Heck der Lkw zu erkennenden Druckschwankungen sehr ähnliche Ausprägungen erkennen, wodurch auch in diesen Bereichen annähernd gleiche Krafteinwirkungen zu erwarten sind. Einzig die unterschiedliche Länge der Fahrzeugkombinationen führt zu einem Versatz der zu erkennenden Sprünge in den Kennlinien. Zudem ist bei beiden Verläufen des Druckbeiwerts gemein, dass sie über die gesamte Länge des Fahrzeugs einen leichten Unterdruck erkennen lassen, der überholte Zweiradfahrer an den Lkw heranzieht, jedoch wie in den zuvor diskutierten Merkmalen in beiden Untersuchungen nahezu gleich ausfällt.

Angesichts dieser Ergebnisse ist zu vermerken, dass eine gesonderte Regelung für Lang-Lkw hinsichtlich eines Mindestabstands bei Überholvorgängen aus aerodynamischer Sicht nicht notwendig ist. Zwar ist eine starke Abhängigkeit der Dru-

ckentwicklung und der daraus resultierenden Krafteinflüsse vom seitlichen Abstand des überholenden Lkw zu erkennen, doch unterscheidet sich diese nicht von Kennlinien herkömmlicher Lkw. Somit ist ein erhöhtes Gefahrenpotenzial aufgrund einer größeren Länge des Fahrzeugs nicht festzustellen.

#### 5.4.2 Seitenwindstabilität

Im Rahmen der Fahrzeugbegutachtungen konnten mit 16 Fahrern kurze Interviews durchgeführt werden. Explizit wurde nach kritischen Situationen bei schlechten Witterungsbedingungen sowie starken Winden gefragt. Dabei ergab sich ein eindeutiges Stimmungsbild über alle Fahrer hinweg, dass auch bei Leerfahrten bisher keine kritischen Situationen durch starke Seitenwinde, beispielsweise auf Brücken, hervorgerufen wurden. Die Fahrzeugkombinationen erschienen den Fahrern nicht anfälliger für Seitenwinde als entsprechende Sattel- oder Lastzüge.



**Bild 30** Vergleich der Druckbeiwerte von Lang-Lkw und Lastzug mit einem seitlichen Überholabstand von 1,5 m

## 6 AP 5 - Analytische Untersuchung der Fahrdynamik bei ausgewählten Manövern

### 6.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die im Rahmen des Feldversuchs auf ausgewählten Strecken verkehrenden Lang-Lkw weisen eine erweiterte Sicherheitsausstattung auf, die die gesetzlichen Anforderungen für konventionelle Lastkraftwagen übertreffen. Allerdings ist noch nicht hinreichend bekannt, inwieweit sich die zusätzliche Länge der Lastzüge negativ auf die fahrdynamischen Eigenschaften derselben auswirkt. Im Rahmen nachfolgenden Arbeitspaketes soll mithilfe eines Mehrkörpersimulationstools die fahrdynamische Stabilität ausgewählter Lang-Lkw-Konfigurationen nach § 3 LKWÜberlStVAusnV untersucht werden. Es werden generische Simulationsmodellen erstellt, die der Forderung nach Allgemeingültigkeit genügen. Anhand ausgewählter Fahrmanöver wird die Stabilität der Fahrzeugkonfigurationen analysiert und mithilfe generierter Kennwerte quantifiziert. So können abschließend Aussagen über die fahrdynamische Stabilität und erste Empfehlungen für die Beladungsverteilung und weitergehende technische Vorschriften getroffen werden.

### 6.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die FAT-Schriftenreihe Nummer 220 (FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V. 2008) und die von der TU Eindhoven im Rahmen einer Master's Thesis durchgeführten Untersuchungen „Simulation of complex articulated commercial vehicles for different driving manoeuvres“ (ISIKLAR 2007) dienen als wesentliche Literaturreferenz. In den in FAT220 beschriebenen Untersuchungen wurde eine simulative fahrdynamische Analyse des Fahrverhaltens von Lang-Lkw vollzogen, allerdings in Gewichtsklassen von 48 bzw. 60 t. Die modellierten Fahrzeugtypen, die § 3 LKWÜberlStVAusnV zuzuordnen sind, sind:

- Typ 2 (4x2 Sattelzugmaschine mit Sattel- und Zentralachsanhänger, 48 t)
- Typ 3 (6x4 Motorwagen mit Sattelaufleger auf Dolly, 60 t)

Weiterhin wurden Referenzfahrzeuge modelliert, die den heute üblichen, auf den Straßen vorzufindenden Fahrzeugkombinationen entsprechen:

- 6x2 Motorwagen mit Zweiachsanhänger (klassischer Gliederzug, 40 t)
- 4x2 Zugmaschine mit einem Sattelaufleger und starren Dreiachsaggregat (klassischer Sattelzug, 40 t)

Die Autoren verwenden zur fahrdynamischen Analyse die in den ISO-Normen 14791, 14792 und 14793 beschriebenen Fahrmanöver Einfacher Spurwechsel, Sinuslenken und Stationäre Kreisfahrt, die für Nutzfahrzeuge ausgelegt sind.

Die gewonnenen Aussagen für die Stationäre Kreisfahrt sind:

- Für den Typ 2 (4x2 Sattelzugmaschine mit Sattel- und Zentralachsanhänger, 48 t):
  - Neutraler bis leicht untersteuernder Eigenlenkgradient bis zu hohen Querbeschleunigungen
  - Ähnlicher Wankwinkel wie 4x2 Sattelzugmaschine mit Sattelaufleger
  - Linearer Anstieg des Schwimmwinkels mit größerem Gradienten als 4x2 Sattelzugmaschine mit Sattelaufleger aufgrund der dritten gelenkten Achse.
  - Der Zentralachsanhänger erreicht ebenfalls gleiche Wankwinkel und einen linearen Anstieg des Schwimmwinkels wie der Sattelaufleger
- Für den Typ 3 (6x4 Motorwagen mit Sattelaufleger auf Dolly, 60 t):
  - Leicht erhöhter Eigenlenkgradient gegenüber Referenz-Gliederzug
  - Zunehmend progressiver Anstieg des Lenkradwinkels bei hohen Querbeschleunigungen
  - Deutlich höherer Schwimmwinkel des Sattelauflegers und progressiver Anstieg im Grenzbereich aufgrund der dritten gelenkten Achse
  - Maximaler Wankwinkel: 3° bis 4°

Die gewonnenen Aussagen für das Sinuslenken sind:

- Für den Typ 2 (4x2 Sattelzugmaschine mit Sattel- und Zentralachsanhänger, 48 t):
  - Die Querbeschleunigungsamplitude des Sattelauflegers ist ähnlich dem des Standard-Sattelzuges,

- aber ein Einbruch bei 0,5 Hz ist zu erkennen
- Die Giereigenfrequenz des Sattelauflegers liegt bei etwa 0,35 Hz, geringere Dämpfung als beim Standard-Sattelzug
- Giereigenfrequenz des Zentralachsanhängers bei 0,35 Hz, deutliche Amplitudenüberhöhung
- Für den Typ 3 (6x4 Motorwagen mit Sattelaufleger auf Dolly, 60 t)
  - Übertragungsfunktion der Querschleunigung fällt gleichmäßig ohne Überhöhung ab. Das Verhalten ist ähnlich dem der Referenzzüge
  - Die Giereigenfrequenz liegt bei etwa 0,3 Hz
  - Die Amplitudenverläufe haben keine nennenswerte Überhöhungen

Die gewonnenen Aussagen für den einfachen Fahrspurwechsel sind:

- Für den Typ 2 (4x2 Sattelzugmaschine mit Sattel- und Zentralachsanhänger, 48 t)
  - Bei niederfrequenter Anregung ist das Systemverhalten des Sattelauflegers sehr ähnlich dem Verhalten der 4x2 Sattelzugmaschine mit Standard-Sattelaufleger
  - Bei höheren Frequenzen zeigt sich die Rückwirkung des Zentralachsanhängers auf das Verhalten des Sattelauflegers
  - Ein deutliche Schwingungsneigung des Gesamtsystems vornehmlich des Zentralachsanhängers ist zu erkennen
  - Der Zentralachsanhänger zeigt ein deutliches Aufschwingen bei höheren Frequenzen (siehe auch Sinus-Lenken)
  - Gegenüber dem 6x4 Motorwagen mit Sattelaufleger auf Dolly ist eine wesentlich geringere Dämpfung des Systems zu erkennen.
- Typ 3 (6x4 Motorwagen mit Sattelaufleger auf Dolly, 60 t)
  - Die stärksten Reaktionen zeigt der Sattelaufleger beim Ausweichmanöver mit 0,3 Hz (siehe Frequenz-

gang, Giereigenfrequenz bei ca. 0,36 Hz)

- Die Gierbewegung des Sattelauflegers ist aber deutlich bedämpft.

Die größeren Reaktionen lassen sich durch die geänderten Radstände und Massen gegenüber dem Referenz-Gliederzug erklären. Das System ist aber ausreichend gedämpft, sodass sich kein instabiler bzw. eingeschwungener Zustand entwickelt.

Neben den Simulationen im beladenen Zustand wurde eine Variation der Beladungszustände durchgeführt. Hierfür wurden jeweils die Lastzüge in drei Bereiche eingeteilt.

Für die Sattelzugmaschine mit Sattel- und Zentralachsanhänger wird eine Unterteilung des Sattelauflegers in zwei Beladungsabschnitte vollzogen (vorne / hinten). Zusammen mit dem unabhängig beladbaren Zentralachsanhänger ergeben sich drei Beladungsbereiche.

Bei dem Motorwagen mit Sattelaufleger auf Dolly entspricht die Nutzfläche des Motorwagens dem ersten Beladungsabschnitt. Nummer zwei und drei ergeben sich analog vorheriger Ausführung durch Aufteilung des Sattelauflegers in zwei Bereiche.

Für die Fahrzeugkombinationen wurde ermittelt, dass Beladungszustände, bei denen sich Last im hinteren, jedoch keine oder wenig Last im vorderen oder mittleren Teil des Zuges befindet, als fahrdynamisch kritisch zu bewerten sind.

Im Falle des Typs 2 mit beladenem Zentralachs- und nur teil- oder ungeladenem Sattelaufleger findet durch die ungleiche Beladung und die schiebende Auswirkung des vollen Zentralachsanhängers eine Entlastung der Antriebsachse der Sattelzugmaschine statt, wodurch instabile Zustände eintreten. Zugleich tritt in dieser Konstellation eine starke Überhöhung des Verhältnisses aus Gierrate des Zentralachsanhängers zur Gierrate der Sattelzugmaschine auf.

Für Typ 3 tritt bei Entlastung des Beladungsabschnitts zwei (vorderer Teil des Sattelauflegers) analoges, kritisches Fahrverhalten ein. Durch die Entlastung des (gelenkten) Dolly-Achspaketes nehmen die Schräglaufwinkel zu, um die notwendige Seitenkraft aufzubringen, was in einer Erhöhung des Schwimmwinkels des Sattelauflegers und des Spurbreitenbedarfs des Zuges resultiert.

Fahrdynamisch als allgemein kritisch anzusehen sind Nachlauflenkachsen bei Sattelauflegern. Wirken sich diese positiv bei geringen Geschwindigkeiten aus, beispielsweise, um den BO-Kraftkreis erfüllen zu können, so vergrößern diese maßgeblich den Schwimmwinkel des Sattelauflegerachspaketes bei hochquerdynamischer Be-

anspruchung. Dies liegt darin begründet, dass die Reifen der Nachlaufachsen seitenkraftfrei oder seitenkraftvermindert abrollen und das Delta zum Achsseitenkraftbedarf von den restlichen Achsen des Achspakets kompensiert werden muss. Eine Sperrung der Lenkfunktionalität der Nachlaufachse ergibt bei identischer querdynamischer Beanspruchung einen deutlich geringeren Schwimmwinkel des Sattelauflegers.

(ISIKLAR 2007) unterzieht die Fahrzeugkombinationen Typ 2 und Typ 3 mit einer Gesamtmasse bis 60 t dem SAE-Spurwechselmanöver. Dieses weicht in Geschwindigkeit und Trajektorie von der ISO-Norm 14791 des Einfachen Fahrspurwechsels geringfügig ab. Die Autoren weisen den Typen 2 und 3 eine erhöhte Rearward Amplification der Querbeschleunigung, definiert als Quotient zwischen der auftretenden Querbeschleunigung des letzten Anhängerfahrzeugs zum manövereinleitenden Zugfahrzeug, zu. Je größer die Länge eines Fahrzeug und je kleiner der Abstand der benachbarten Achsen im betrachteten letzten Anhängerfahrzeug sind, desto intensiver stellt sich die fahrdynamische Reaktion auf Querbeschleunigungseinleitung dar. Der Typ 3 besitzt ein Dreifach-Achspaket am zweiten, hintersten Anhänger (Sattelaufleger) mit kleinen Achsabständen zwischen den einzelnen Achsen und sehr großem Abstand zur manövereinleitenden Vorderachse des Zugfahrzeugs. Zusätzlich ist die Distanz des Dreifach-Achspakets zur nächsten seitenkraftabstützenden Achse des ersten Anhängers (zweite Achse des Dollys) groß. Diese geometrische Kombination unterstützt einen querbeschleunigungsverstärkenden Effekt von Zugfahrzeug zu letztem Anhänger.

Aufgrund seiner Kinematik ist bei Typ 2 ein noch verstärkender Effekt der Querbeschleunigung des zweiten Anhängers zum Zugfahrzeug zu erwarten. Dies bestätigen die Ergebnisse aus (ISIKLAR 2007). Der Zentralachsanhänger ist durch seine Zugstange mit der Maulkupplung des Sattelauflegers gekoppelt. Die bereits auftretende Rearward Amplification des Maulkupplungspunkts relativ zum Zugfahrzeug wird über die Zugstange auf den Zentralachsanhänger verstärkt. Dies resultiert in einer im Vergleich zum Typ 3 erhöhten Rearward Amplification.

### 6.3 Methodisches Vorgehen

Aufgrund der mitunter hohen Dynamik der zu untersuchenden Fahrmanöver mit dem nicht bekannten fahrdynamischen Verhalten der realen Fahrzeugkombinationen und der daraus potenziell resultierenden Gefahr für Mensch und Versuchsfahrzeug erfolgt die Analyse des Fahrverhaltens simu-

lativ anhand eines Mehrkörpersimulationstools. Es werden sowohl für Zug- als auch Anhängerfahrzeuge generische Modelle aufgebaut. Diese Modelle basieren auf den am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeugkombinationen und sind derart gezielt abstrahiert, dass die Allgemeingültigkeit für alle entsprechenden am Feldversuch beteiligten Fahrzeugkombinationen gewährleistet ist.

Anhand gezielt ausgewählter Fahrmanöver werden die Fahrzeugkombinationen in vollem Beladungszustand mit 40 t Gesamtgewicht angeregt. Die Reaktion von Zugfahrzeug und Anhänger(n) wird anhand von ausgewählten, in der Literatur bewährten Kennwerten und den dazugehörigen Zeit- und Frequenzschieben beschrieben. Alle Untersuchungen finden mit passiven Fahrzeugen statt. Dies bedeutet, dass die Fahrzeuge kein fahrdynamisches Regelsystem ESP aufweisen, um physikalische Effekte eindeutig bewerten zu können.

#### 6.3.1 Kombinationen

Analog zu (FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V. 2008) werden generische Fahrzeugmodelle anhand eines Mehrkörpersimulationstools modelliert, um diese mit Maximalbelastung zu untersuchen. Diese werden derart parametrisiert, dass Vergleichbarkeit zu den Realfahrzeugen im Feldversuch herrscht. Es werden folgende Kombinationen erstellt:

- Verlängerter Sattelzug (Typ 1)
- 4x2 Sattelzugmaschine mit Sattelanhängern mit Nachlaufachse und Zentralachsanhänger (Typ 2): ISO-Container auf den Fahrgestellen von Sattel- und Zentralachsanhänger
- 6x2 Motorwagen mit Sattelaufleger auf Dolly (Typ 3). Zwangsgelenkte Nachlaufachse am Motorwagen und Zwangsgelenkung an der ersten Dolly-Achse. Jeweils konstantes Übersetzungsverhältnis zur Motorwagenvorderachslenkung
- 6x2 Motorwagen mit Dreiachsanhänger (Typ 5). Zwangsgelenkte Nachlaufachse am Motorwagen und Zweifach-Achspaket am Heck des Anhängers

Diese werden in analytischen Bezug zu zwei heute üblichen Referenzzügen gestellt (FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V. 2008):

- 4x2 Sattelzugmaschine mit Sattelaufleger (nachfolgend als REF 1 bezeichnet)
- 6x2 Motorwagen mit Zweiachsanhänger (nachfolgend als REF 2 bezeichnet)

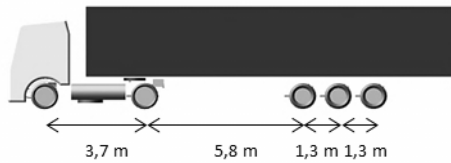


Bild 31 Referenzfahrzeug 1 (REF 1)

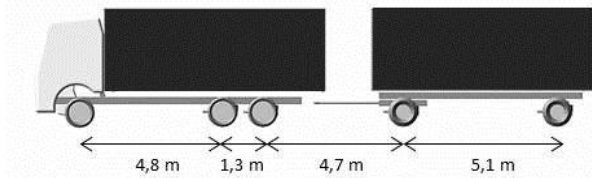


Bild 32 Referenzfahrzeug 2 (REF 2)

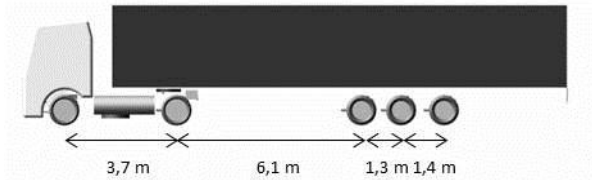


Bild 33 Fahrzeugkombination Typ 1

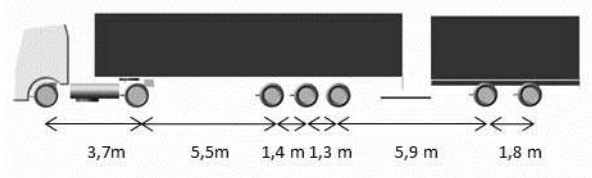


Bild 34 Fahrzeugkombination Typ 2

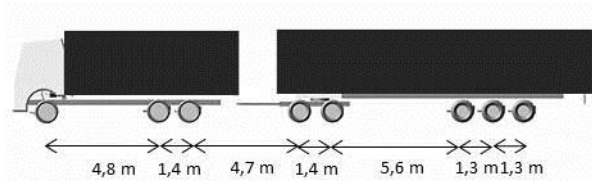


Bild 35 Fahrzeugkombination Typ 3

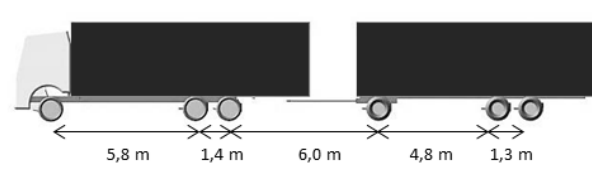


Bild 36 Fahrzeugkombination Typ 5

Der Fahrzeugkombinationstyp 4 wird nicht untersucht, weil nur ein Fahrzeug des Feldversuchs diesem Typ angehört. In folgender Literatur können Untersuchungsergebnisse bezüglich Fahrdy-

namik für diesen Kombinationstyp eingesehen werden: (FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V. 2008), (LUIJTEN 2010)

### 6.3.2 Bedutung der Fahrzeugmodelle

Die Bedutung der Fahrzeugmodelle findet anhand der bei Begutachtungen und Vermessungen der Realfahrzeuge gesammelten Daten und der in der Literatur gesammelten Parametersätze statt. Um das Fahrverhalten der Simulationsmodelle zu plausibilisieren, wurden vor Simulationsauswertung Referenzsimulationen durchgeführt, die vergleichbare Simulationsrandparameter wie veröffentlichte fahrdynamische Simulationsuntersuchungen aufweisen.

### Achsen

Als Achsen werden für sowohl Zug- als auch Anhängerfahrzeuge luftgefederte Starrachsen modelliert, welche sich an den in Standard-Sattelzügen oder -Motorwagen bzw. konventionellen Sattel-, Zweiachs-, Dreiachs- oder Zentralachsanhängern verbauten Starrachsen orientieren.

### Reifen

Da die Reifen wesentliche Übertragungsglieder zwischen Fahrzeug und Umwelt darstellen und maßgeblichen Einfluss auf das Fahrverhalten eines Kraftfahrzeugs besitzen, ist eine besonders genaue Modellierung der Reifen in der Simulation essenziell. Es wurden daher Reifenmodelle von am Markt erhältlichen Nutzfahrzeugreifen für Lenk-, Antriebs- und Trailerachsen verwendet, die anhand der semi-empirischen Magic Formula 5 (PACEJKA 2005) beschrieben sind.

Die Reifen weisen die Dimension 315/70 R 22,5 für die Vorder- und Antriebsachse auf. Für die Trailer finden Kennfelder von aktuellen Reifen der Größe 385/55 R 22,5 Anwendung. Somit ist gewährleistet, dass das Übertragungsverhalten der modellierten Reifen dem Verhalten realer Nutzfahrzeugreifen entspricht.

### Achsabstände

Die Achsabstände bestimmen, an welchen Punkten des Fahrzeugs die Krafteinleitung durch Seitenkraftabstützung bei Kurvenfahrt erfolgt und weisen daher maßgeblichen Einfluss auf das dynamische Verhalten eines Fahrzeugs bei querdynamischer Anregung auf.

Die Achsabstände der am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeugkombinationen weichen innerhalb eines jeweiligen Kombinationstyps voneinan-

der ab. Aus diesem Grund werden die arithmetischen Mittelwerte der Achsabstände aller Fahrzeuge eines jeweiligen Typs errechnet und zu dem mehrheitlich auftretenden Zahlenwert auf- oder abgerundet (Bild 31 bis Bild 36).

### Beladungszustände und Achslasten

Als Beladungszustände werden die fahrdynamisch kritischsten Zustände simuliert. Diese sind:

- A** Nur für Typ 2: Maximalbeladung des Zentralachsanhängers mit Volumenverteilung und einer Gesamtmasse von 18 t, wovon 17,5 t auf das Doppelachspaket und 0,5 t auf die Stützlast zum Sattelaufleger entfallen. Der Sattelaufleger befindet sich im Leerzustand
- B** Für alle Fahrzeugkombinationen: Maximale Beladung des Fahrzeugs mit einer Gesamtmasse von 40 t mit gleichmäßiger Massenvolumenverteilung

Beladungszustand A wurde aufgrund der als fahrdynamisch ungünstig zu bewertenden kinematischen Kette des Typs 2 und bisheriger Literaturverweise (KURAL et al. 2012), (ISIKLAR 2007) untersucht. Der Beladungszustand B bildet die Maximalbeladung aller Fahrzeuge unter Annahme op-

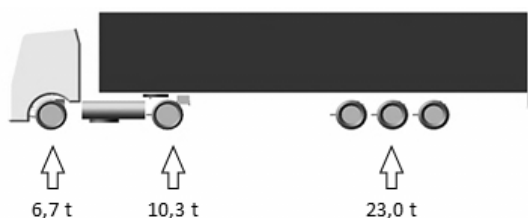


Bild 37 Referenzfahrzeug 1 (REF 1)

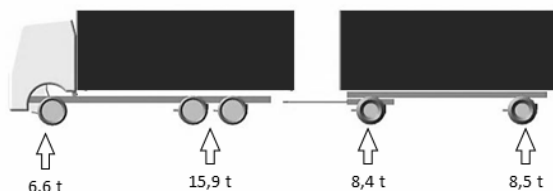


Bild 38 Referenzfahrzeug 2 (REF 2)

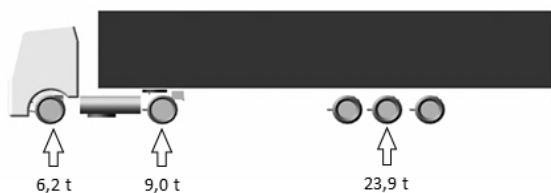


Bild 39 Fahrzeugkombination Typ 1

timaler Gewichtsverteilung ab.

Für beide Beladungszustände ergeben sich nachfolgende Achslasten aus der Summe der Leerfahrzeuge und der Volumenbeladung (Bild 37 bis Bild 43).

### 6.3.3 Fahrmanöver

Als zu untersuchende Fahrmanöver werden analog zu (FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V. 2008) die Manöver ISO 14791, ISO 14792 und ISO 14793 verwendet. Diese haben sich in der Nutzfahrzeugerprobung bewährt und bieten bei Verwendung in dieser Analyse die Möglichkeit des Vergleichs mit Erkenntnissen aus früheren Untersuchungen.

Die Simulationsergebnisse konnten im Rahmen dieses Projekts nicht anhand von Messfahrten mit den Lang-Lkw Realfahrzeugen validiert werden. Die Fahrzeugmodelle wurden indes, wie im Rah-

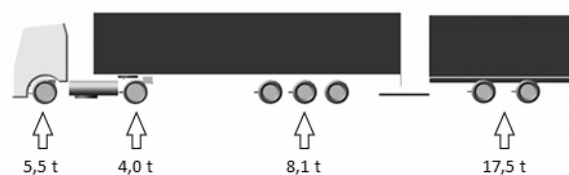


Bild 40 Fahrzeugkombination Typ 2 A

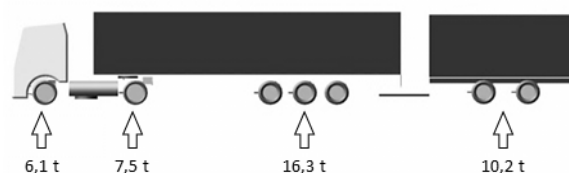


Bild 41 Fahrzeugkombination Typ 2 B

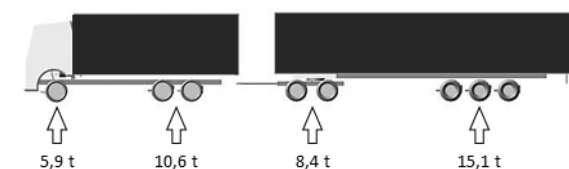


Bild 42 Fahrzeugkombination Typ 3

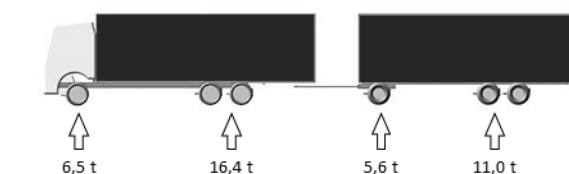


Bild 43 Fahrzeugkombination Typ 5

men des Projektumfangs möglich, durch Literaturwerte und vorliegende Realfahrzeugdaten qualitativ bedatet. Das Verhalten der Simulationsmodelle wurde mit veröffentlichten Werten verglichen und abgesichert. Es sind daher aussagengültige Erkenntnisse zu erwarten. Eine umfangreiche Modellvalidierung sei jedoch empfohlen.

## 6.4 Ergebnisse

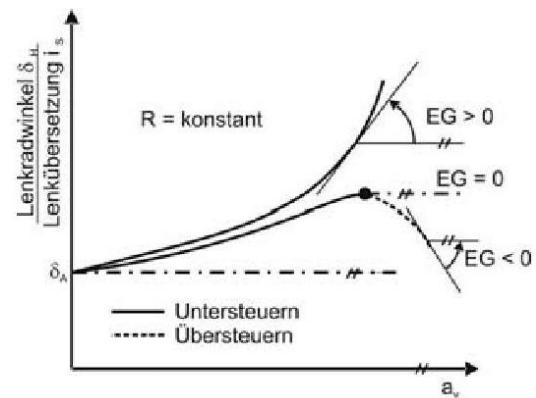
### 6.4.1 Stationäre Kreisfahrt (ISO 14792)

Die Stationäre Kreisfahrt dient allgemein zur Beurteilung des Eigenlenkverhaltens eines Kraftfahrzeugs. Der Lastzug wird nach Norm bei iterativ zu variierender Geschwindigkeit auf einer Kreisbahn mit  $R = 100$  m bewegt. Jede Längsgeschwindigkeit mit der korrespondierenden Querbewegung wird mehrere Sekunden konstant gehalten, bis sich das System eingeschwungen hat und sich ein stationärer Zustand der Schräglaufwinkel bzw. des Schwimmwinkels einstellt. Dieses Verfahren wird in möglichst kleinen Stufen bis zur maximalen Querbewegung wiederholt.

Problematisch stellen sich die durch die in der Norm geforderte schrittweise Aufzeichnung der Querbewegungsstufen bedingten Rundungsfehler dar, welche sich beim Erstellen des Eigenlenkgradienten durch die Interpolation zwischen den einzelnen Messpunkten der Querbewegungsstufen ergeben. Aus diesem Grund wird die Simulation mit langsam steigender Querbewegung durchgeführt, sodass sich ein quasi-stationärer Zustand einstellt. Dies birgt zudem den Vorteil, dass die Übergänge zwischen dem linearen und nichtlinearen Fahrbereich der Lastzugkombinationen abgebildet werden. Wichtig ist zu beachten, dass die Längsbewegung über der Simulationsdauer möglichst gering ist, um die Annahme der Quasi-Stationarität zu rechtfertigen.

Wesentliche Beschreibungsgröße des Fahrzeugverhaltens stellt der Eigenlenkgradient dar. Dieser beschreibt das Eigenlenkverhalten des Fahrzeugs, indem der Lenkwinkel als Quotient aus Lenkwinkel  $\delta_h$  und Lenkübersetzung  $i_s$  über der Querbewegung  $a_y$  aufgetragen wird. Ein progressiver Anstieg des Lenkwinkels charakterisiert eine überproportionale Zunahme des Lenkwinkelbedarfs zur Erhöhung der Querbewegung. Dies ist kennzeichnend für ein untersteuerndes Fahrzeugverhalten. Ein übersteuerndes Verhalten wird bei negativen Gradienten erreicht: für eine weitere Erhöhung der Querbewegung muss der Lenkwinkel zurückgenommen werden.

Bild 44 zeigt die Definition des Eigenlenkgradienten nach (HEIßING 2011). Ein untersteuerndes



**Bild 44** Definition des Eigenlenkgradienten nach (HEIßING 2011)

Fahrverhalten wird mit einem positiven Eigenlenkgradienten EG charakterisiert. Ein übersteuerndes Fahrverhalten weist einen negativen Eigenlenkgradienten EG auf.

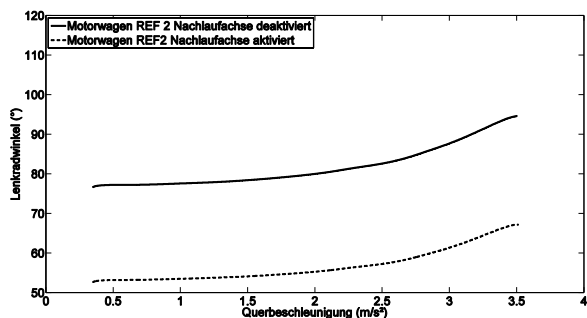
Ein Fahrzeug sollte stets ein untersteuerndes Fahrverhalten aufweisen, weil der Mensch in kritischen Fahrsituationen bei mehr Querbewegungsbedarf intuitiv das Lenkrad weiter zustellt. Ein untersteuerndes Fahrzeug ist für einen Normalfahrer demnach bei kritischen Fahrsituationen leichter zu stabilisieren.

Die Fahrzeugkombination Typ 2 besitzt an dritter Stelle des Dreifach-Achspaketes des Sattelauflegers eine Nachlaufachse. Die Fahrzeugkombinationen REF 2, Typ 3 und Typ 5 weisen eine zwangsgelenkte Nachlaufachse am Motorwagen auf, die sich hinter der zweiten, angetriebenen Achse befindet. Typ 3 hat zudem eine zwangsgelenkte erste Dolly-Achse.

Alle Arten zusatzgelenkter Achsen dienen der Einhaltung des BO-Kraftkreises oder zur besseren Rangierbarkeit des Lastzugs. Zwangsgelenkte Achsen werden von einem mechanischen, elektromechanischen, hydraulischen oder pneumatischen Aktor angesteuert. Bis auf die mechanische Variante werden die lenkbaren Achsen beim Überschreiten einer vom Hersteller definierten Grenzwinkelgeschwindigkeit zwischen  $v = 40$  km/h und  $v = 60$  km/h automatisch deaktiviert. So rollen die zwangsgelenkten Achsen bei höheren Geschwindigkeiten nicht seitenkraftreduziert ab. Das Gesamtfahrzeug gewinnt so bei höherdynamischen Manövern durch mehr Summenseitenkraftpotenzial der Achsen an Fahrsicherheit.

Eine selbstlenkende Nachlaufachse wie diejenige des Typs 2 stellt bei Seitenkrafteinwirkung selbstständig einen Lenkwinkel ein und rollt so rollwiderstandsreduziert ab. Bei Sattelauflegern erhöhen sie so die Rangierbarkeit, verringern jedoch die übertragbare maximale Seitenkraftabstützung des





**Bild 45** Verlauf des Eigenlenkgradienten für das Referenzfahrzeug REF 2 mit aktivierter und deaktivierter Nachlaufachse

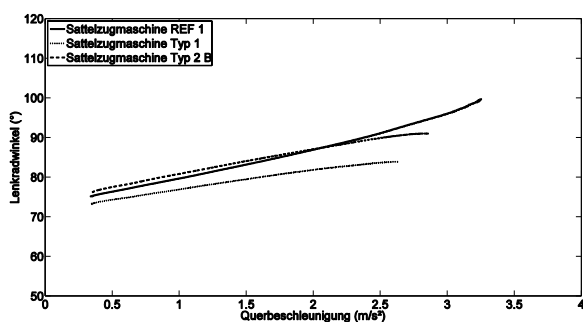
Achspaketes. Die Nachlaufachse am Sattelaufleger des Typs 2 ist bei nachfolgenden Untersuchungen aller drei Manöver stets deaktiviert, da das Fahrzeug bei aktiver Nachlaufachse bei allen Fahrmanövern ein instabiles Fahrverhalten aufweist. Es sei eine Realvalidierung dieses Kombinationstyps dringend empfohlen.

## Ergebnisse

Zuerst soll am Referenzfahrzeug REF 2 untersucht werden, welchen Effekt aktivierte/deaktivierte Zusatzlenkungen auf das Eigenlenkverhalten aufweisen.

Bild 45 zeigt den Verlauf des Eigenlenkgradienten für das Referenzfahrzeug REF 2 für die aktivierte und deaktiverte zwangsgelenkte Nachlaufachse. Es besitzt erwartungsgemäß bei niedrigen Querbeschleunigungen im Rangierbereich mit offener, das heißt aktivierter Nachlaufachse, einen geringeren Lenkwinkelbedarf als mit geschlossener, deaktivierter Nachlaufachse.

Bei Erhöhung der Querbeschleunigung tritt widererwarten kein Zusatzlenkwinkelbedarf aufgrund der verminderten Summenseitenkraft der Nachlaufachse auf, welcher sich in einem größeren Eigenlenkgradienten widerspiegelt. Stattdessen ver-



**Bild 46** Verlauf des Eigenlenkgradienten für die Typen REF 1, Typ 1 und Typ 2 B

laufen beide Lenkwinkelverläufe nahezu parallel mit einem Offset von ca. 20° Lenkwinkel. Es ist keine signifikante Beeinflussung des Eigenlenkverhaltens durch die aktive Zwangslenkung ersichtlich. Folgende Untersuchungen werden für alle Kombinationstypen mit Motorwagen mit Zwangslenkungen und mit Sattelaufleger nicht Nachlaufachsen im gesperrten Zustand durchgeführt.

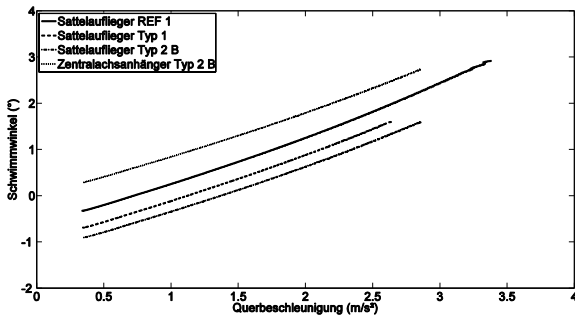
Die zusammenfassende Bezeichnung der Fahrzeuge REF1, Typ 1 und Typ 2 wird zu *Fahrzeuggruppe 1* festgelegt. Analog findet für die Fahrzeuge REF 2, Typ 3 und Typ 5 die Bezeichnung *Fahrzeuggruppe 2* Anwendung.

## Fahrzeuggruppe 1

Bild 46 zeigt den Verlauf des Eigenlenkgradienten für die Fahrzeuggruppe 1. Das Referenzfahrzeug weist ein untersteuerndes Eigenlenkverhalten auf. Typ 1 benötigt bei niedrigen Querbeschleunigungen einen geringeren Lenkwinkelbedarf und verringert seine Untersteuertendenz ab ca. 2,5 m/s<sup>2</sup> mit einem geringeren positiven Eigenlenkgradienten. Es wird die Vermutung angestellt, dass das Fahrzeugmodell das Realverhalten in diesem Fall nicht korrekt wieder gibt. Aufgrund des verlängerten Radstands, gleicher Achsanzahl und identischer Masse sind ein größerer Lenkwinkel und ein steigender Eigenlenkgradient in Realität zu erwarten. Eine Validierung am Realfahrzeug wird empfohlen.

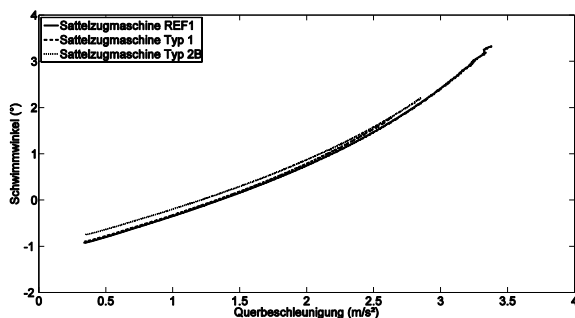
Typ 2 mit gleichmäßiger Beladung B hingegen benötigt bei niedrigeren Querbeschleunigungen geringfügig mehr Lenkwinkelbedarf aufgrund des zusätzlich abrollenden Zentralachsanhängers. Bei größeren Querbeschleunigungen sinkt der Eigenlenkgradient etwas ab und weist nicht die starke Progression des Referenzfahrzeugs REF 1 auf. Auch dies ist auf den zusätzlichen Zentralachsanhänger zurückzuführen, der den Spurverlauf des Sattelauflegers und des Zugfahrzeugs beeinflusst.

Bild 47 zeigt den Verlauf des Schwimmwinkels der Anhänger der Fahrzeuggruppe 1 bei stationärer Kreisfahrt. Der Zentralachsanhänger (Typ 2 B) besitzt den größten Schwimmwinkel, der ihn ziehenden Sattelaufleger den geringsten. Typ 1 und REF 1 liegen dazwischen. Insgesamt äußern sich diese Schwimmwinkeldifferenzen der Anhänger nicht in signifikanten Schwimmwinkeldifferenzen der Zugfahrzeuge, wie Bild 48 zeigt.

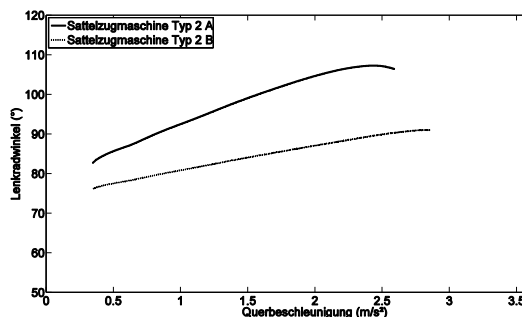


**Bild 47** Verlauf des Schwimmwinkels für die Anhänger der Typen REF 1, Typ 1 und Typ 2 B bei Stationärer Kreisfahrt

Der Vergleich der Eigenlenkgradienten des Typs 2 für die Beladungszustände A und B ist in Bild 49 ersichtlich. Der maximal beladene Zentralachsanhänger führt bereits bei niedriger Querbeschleunigung bei  $a_y = 0,5 \text{ m/s}^2$  zu einem erhöhten Lenkradwinkel. Der Eigenlenkgradient verläuft über der Querbeschleunigung steiler, knickt jedoch bei ca.  $a_y = 2,5 \text{ m/s}^2$  zu neutralem Eigenlenkverhalten ab und geht bei weiterer Erhöhung der Querbeschleunigung in Richtung Übersteuern. Der Zentralachsanhänger beeinflusst in diesem Beladungszustand das Zugfahrzeug stark in seinem Eigen-



**Bild 48** Verlauf des Schwimmwinkels für die Sattelzugmaschinen der Typen REF 1, Typ 1 und Typ 2 bei Stationärer Kreisfahrt



**Bild 49** Verlauf des Eigenlenkgradienten für Typ 2 A und Typ 2 B

lenkverhalten.

Aufgrund der Maximalmasse des Zentralachsanhängers müssen die Reifen eine sehr hohe Seitenkraft abstützen, wodurch große Schräglaufwinkel resultieren. Der Zentralachsanhänger baut einen großen Schwimmwinkel auf und beeinflusst hiermit den Sattelaufleger wie auch das Zugfahrzeug, die nur geringe Achslasten und demnach ein deutlich geringeres Seitenführungspotenzial der Reifen aufweisen.

Eine gleichmäßige Beladung B über beide Anhängerfahrzeuge bewirkt einen geringeren Lenkradwinkelanstieg und führt nicht zum Übersteuern des Fahrzeugs. Ein noch besseres Fahrverhalten ist bei primärer Beladung des Sattelauflegers bis zur Gewichts- oder Volumengrenze und sekundärer Beladung des Zentralachsanhängers zu erwarten. Der Beladungszustand A ist für ein sicheres Eigenlenkverhalten strikt zu vermeiden.

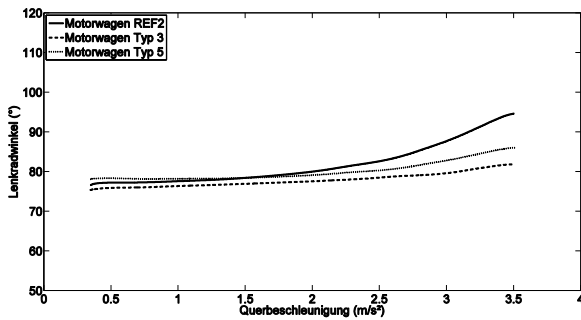
## Fahrzeuggruppe 2

Bild 50 zeigt vergleichend das Eigenlenkverhalten der Fahrzeuge REF 2, Typ 3 und Typ 5. Das Referenzfahrzeug REF 2 weist ein untersteuerndes Fahrverhalten auf mit deutlicher Progression.

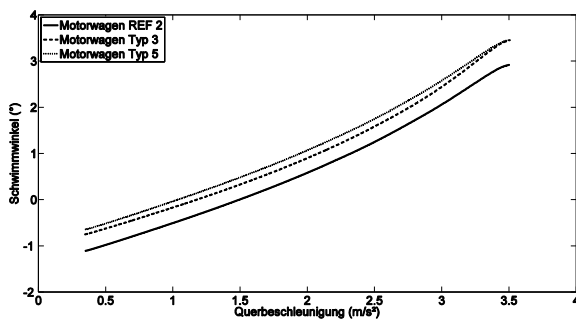
Typ 5 weist bei geringen Querbeschleunigungen aufgrund der Zusatzlänge von 5,25 m gegenüber dem Referenzfahrzeug REF 2 einen gering höheren Lenkwinkelbedarf auf. Der Eigenlenkgradient ist indes über dem Querbeschleunigungsbereich geringer als beim Referenzfahrzeug REF 2 und schneidet dessen Verlauf bei ca.  $a_y = 1,5 \text{ m/s}^2$ . Der Verlauf des Eigenlenkgradienten des Typs 3 verläuft über dem ganzen Querbeschleunigungsbereich unterhalb der beiden anderen Verläufe. Er ist nur sehr schwach progressiv und besitzt ein nahezu neutrales Eigenlenkverhalten. Der Fahrer muss nur sehr wenig zusätzlichen Lenkradwinkel aufprägen, um bei steigender Querbeschleunigung das Fahrzeug auf der Kreisbahn zu halten. Eine stärkere Untersteuertendenz wäre indes in Schreckmomenten für den Fahrer intuitiver beherrschbar.

Der Verlauf der Schwimmwinkel für die Motorwagen der Typen REF 2, Typ 3 und Typ 5 ist in Bild 51 ersichtlich. Die Lang-Lkw Kombinationen weisen ein positives Offset gegenüber dem Referenzfahrzeug auf. Typ 3 weist zudem eine gering höhere Schwimmwinkelprogression bei steigender Querbeschleunigung auf.

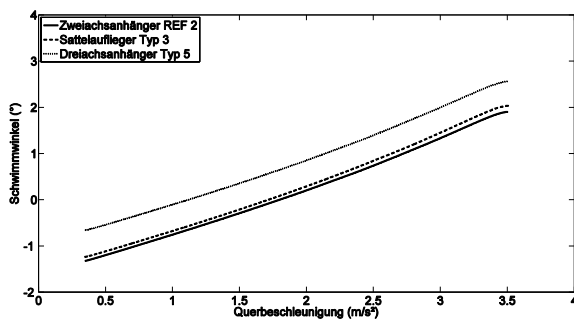
Das Offset zwischen Typ 5 und REF 1 ist geometrisch durch die größeren Achsabstände bedingt, demnach besteht bei reiner Abrollbedingung und geringen Querbeschleunigungen ein größerer Schwimmwinkel. Bei steigender Querbeschleunigung verhalten sich die Fahrzeuge jedoch gleich-



**Bild 50** Verlauf des Eigenlenkgradienten für die Typen REF 2, Typ 3 und Typ 5 bei Stationärer Kreisfahrt



**Bild 51** Verlauf des Schwimmwinkels der Motorwagen der Typen REF 2, Typ 3 und Typ 5 bei Stationärer Kreisfahrt



**Bild 52** Verlauf des Schwimmwinkels für die Anhänger der Typen REF 2, Typ 3 und Typ 5 bei Stationärer Kreisfahrt (ohne Dolly)

wertig und bauen aufgrund nahezu identischem Verhältnis zwischen Zuwachs des Radstandes und einhergehender Schwerpunktverschiebung nach hinten den gleichen Schwimmwinkelgradienten auf. Der Typ 5 ist demnach beim Aufbau höherer Querbeschleunigung für den Fahrer bezüglich Eigenlenkverhalten gleich gut beherrschbar.

Typ 3 liegt zwischen dem Referenzfahrzeug und Typ 5. Es ist zu erkennen, dass der Sattelaufleger auf Dolly einen größeren Einfluss auf den Schwimmwinkel des mit dem Fahrzeug REF 2 identischen Motorwagens besitzt als der Zweiachsanhänger. Es resultiert ein positives Offset. Grund hierfür ist, dass der Sattelaufleger auf Dolly

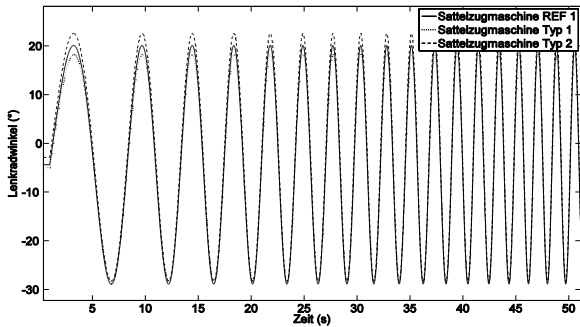
geometrisch anders abrollt, was auf die größeren Achsabstände, die höhere Zahl an Achsen und die Zwangslenkung an der ersten Dolly-Achse zurückzuführen ist.

Bild 52 zeigt den Schwimmwinkelverlauf der Anhänger der Fahrzeuggruppe 2. Die Reihung ist identisch zu denen der Motorwagen: Der Dreiachsanhänger des Typs 5 besitzt den größten Schwimmwinkel, der Zweiachsanhänger des Referenzfahrzeugs REF 2 den geringsten. Der Sattelaufleger von Typ 3 liegt dazwischen.

Sowohl das Eigenlenkverhalten als auch der Schwimmwinkelverlauf für die Fahrzeugkombinationen Typ 3 und Typ 5 fallen unkritisch aus. Der geringfügig höhere Schwimmwinkelaufbau der Motorwagen und der Anhänger macht sich in einer geringeren Progression des Eigenlenkgradienten bemerkbar. Da die Schwimmwinkelverläufe jedoch nicht stark progressiv sind, ist mit einer guten Kontrollierbarkeit der Gesamtfahrzeuge zu rechnen. Es wird jedoch empfohlen, insbesondere den geringen Eigenlenkgradienten vom Typ 3 im Realfahrversuch zu überprüfen.

#### 6.4.2 Sinuslenken (ISO 14793)

Die Darstellung des Fahrzeugverhaltens im Frequenzbereich dient der Beschreibung resonanter Fahrzeugreaktionen über variierten Lenkradwinkelregungen. Hierfür eignen sich mehrere Manöver: pseudo-zufällige Lenkeingabe mit konstanter Amplitude (ISO/TR 8726), Lenkradwinkelsprung mit variierten Lenkradwinkelgradienten (ISO 14973) oder das Sinuslenken mit konstanter Amplitude und iterativer Frequenzsteigerung (ISO 14973). In der Fahrzeugerprobung hat sich für Simulation und Realversuch das Sinuslenken bewährt, um die Fahrzeugantwort frequenzabhängig zu erfassen. Dieses wird nachfolgend verwendet. Zwei Punkte veranlassen jedoch zur alternativen Durchführung des Sinuslenkens: Bei der iterativen Frequenzanhebung sind sehr viele Manöverdurchführungen pro Kombinationstyp notwendig, um den Frequenzbereich abzubilden. Weiterhin sind Ungenauigkeiten im Bode-Diagramm, das zur Darstellung von Amplitude und Phase im Frequenzbereich dient, bei iterativer Simulationsdurchführung aufgrund linearer Interpolation zwischen den Frequenzstufen zu verzeichnen. Alternativ wird daher anstatt iterativer Frequenzsteigerung ein Gleitsinus verwendet (FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V. 2008), bei dem die Lenkwinkelgeschwindigkeit langsam und linear über der Manöverdurchführungszeit erhöht wird. Zur Auswertung wird nicht das Bode-Diagramm verwendet, sondern der Zeitschrieb der Gieramplitude der Fahrzeuge ausgewertet.



**Bild 53** Aufgeprägte Lenkradwinkelamplituden des Sinus Sweeps für die Fahrzeugkombinationsgruppe 1 beim Sinus Sweep (Ausschnitt)

Diese Darstellungsart ermöglicht eine intuitive Interpretation der Gierreaktion der Anhängerfahrzeuge bei Anregung des Zugfahrzeugs. Da der Gradient der linearen Frequenzsteigerung ab  $f = 0,1 \text{ Hz}$  zu  $\Delta f = 0,9 \text{ Hz} / 100 \text{ s}$  bekannt ist, ist auch die einfache grafische Identifikation der Resonanzfrequenzen möglich. Die Berechnungsvorschrift lautet demnach:

$$f(t) = 0,1 \text{ Hz} + t * 0,009 \text{ Hz/s}$$

mit  $t$  als Manöverdurchführungszeitpunkt in Sekunden.

Aufgrund der hohen Masse und der resultierend hohen Massenträgheiten von Nutzfahrzeugen treten nach (FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V. 2008) bei Anregungen oberhalb von  $f = 1,0 \text{ Hz}$  keine signifikanten Fahrzeugreaktionen mehr auf. Der analysierte Frequenzbereich wird zu  $f = 0,1 \text{ Hz}$  bis  $1,0 \text{ Hz}$  festgelegt.

## Ergebnisse

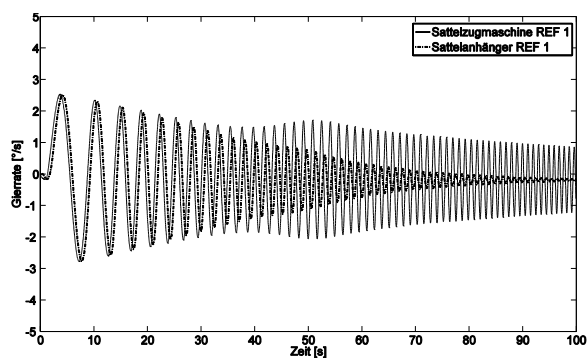
Den Lang-Lkw Kombinationstypen wird bei  $v = 65 \text{ km/h}$  ein sinusförmiger Lenkradwinkel aufgeprägt, der kontinuierlich von  $f = 0,1 \text{ Hz}$  bis  $1,0 \text{ Hz}$  gesteigert wird. Als Lenkamplitude wird über alle Frequenzbereiche diejenige verwendet, die zuvor bei stationärer Kreisfahrt für  $a_y = 1 \text{ m/s}^2$  und  $v =$

$65 \text{ km/h}$  ermittelt wurde. Nachfolgend wird nicht die Darstellung der Systemantworten im Bode-Diagramm gewählt, sondern die Gierratenreaktionen von Zugfahrzeug, erstem und potenziellem zweiten Anhänger über der Zeit abgebildet.

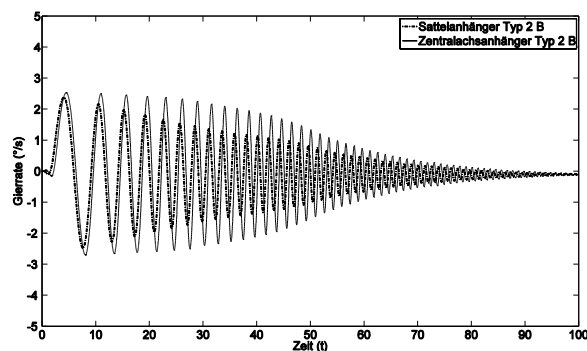
Bild 53 zeigt einen Ausschnitt des aufgeprägten Sinus Sweeps von  $f = 0,1 \text{ Hz}$  bis  $1,0 \text{ Hz}$  exemplarisch für drei ausgewählte Fahrzeuge. Die Abweichung der Lenkradwinkelamplituden ergibt sich aus der Forderung, in stationärer Kreisfahrt bei  $v = 65 \text{ km/h}$  den Querbeschleunigungswert von  $a_y = 1 \text{ m/s}^2$  zu erreichen.

## Fahrzeuggruppe 1

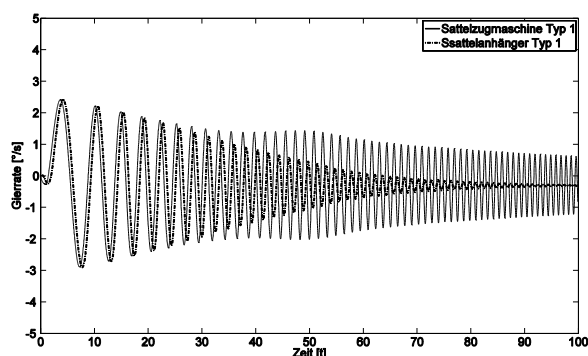
Bild 54 zeigt die Gierreaktionen der Sattelzugmaschine und des Sattelauflegers des Typs REF 1. Die Sattelzugmaschine bildet bei  $f = 0,56 \text{ Hz}$  eine leichte Gierresonanz von  $\dot{\psi} = 1,69 \text{ }^\circ/\text{s}$  aus, ersichtlich an der leichten Amplitudenerhöhung bei  $t = 50 \text{ s}$ , die zu höheren Frequenzen abklingt. Der Sattelaufleger weist einen konstanten Amplitudenabfall ohne Resonanzausbildung auf, der auf eine starke Dämpfung zurückzuführen ist. Eine Anregung des Sattelauflegers durch die Sattelzugmaschine findet beim Sinus Sweep nicht erkennbar statt. Die Dämpfung der Gierreaktion des Sattelauflegers von Typ 1 (Bild 55) ist stärker ausgeprägt als diejenige von REF 1, sodass die Amplitude schneller abfällt und keine Resonanz ersichtlich ist. Dies ist auf die größere Gierträgheit aufgrund des Längenzuwachses um  $1,30 \text{ m}$  zurückzuführen. Die höhere Dämpfung des verlängerten Sattelauflegers leistet zudem dämpfende Wirkung auf die Sattelzugmaschine von Typ 1, die im Vergleich zu REF 1 eine geringere Resonanzüberhöhung aufweist. Die Resonanz der Sattelzugmaschine von Typ 1 nimmt nur den geringen Wert  $\dot{\psi} = 1,41 \text{ }^\circ/\text{s}$  an. Typ 1 erweist sich demnach über dem Frequenzbereich als gedämpfter und für den Fahrer kontrollierbarer als das Referenzfahrzeug REF 1.



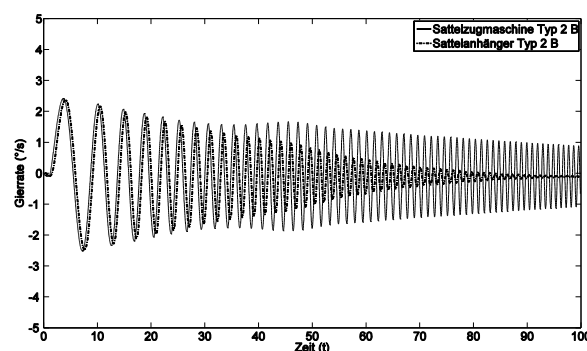
**Bild 54** Gierratenverlauf für Sattelzugmaschine und Sattelaufliieger des Referenzfahrzeugs REF 1 beim Sinus Sweep



**Bild 56** Gierratenverlauf für Sattelaufliieger und Zentralachsanhänger des Typs 2 B beim Sinus Sweep



**Bild 55** Gierratenverlauf für Sattelzugmaschine und Sattelanhänger des Typs 1 beim Sinus Sweep



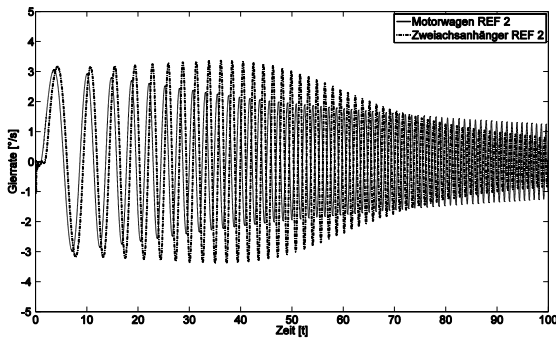
**Bild 57** Gierratenverlauf für Sattelzugmaschine und Sattelaufliieger des Typs 2 B beim Sinus Sweep

Bild 56 zeigt die Gierreaktionen von Sattelaufliieger und Zentralachsanhänger des Typs 2 für den gleichmäßigen Beladungszustand B. Es ist ersichtlich, dass der an den Sattelaufliieger gekuppelte Zentralachsanhänger eine höhere Gierrate bis zu einem Betrag von  $\dot{\psi} = 2,7 \text{ °/s}$  entwickelt als der Sattelaufliieger. Eine ausgeprägte Resonanz ist indes nicht ersichtlich. Die Dämpfung ist schwach. Erst bei  $f = 1,00 \text{ Hz}$  erreicht der Zentralachsanhänger die Gierratenamplitude des Sattelaufliegers. Letzterer besitzt wie im Falle von REF 1 und Typ 1 eine hohe Dämpfung und kein resonantes Verhalten, wie Bild 57 zeigt. Die Gierrate der Sattelzugmaschine bei Giereigenfrequenz ist im Vergleich zum Referenzfahrzeug REF 1 minimal auf  $\dot{\psi} = 1,64 \text{ °/s}$  gesunken, bei einer ebenfalls leicht gesunkenen Resonanzfrequenz von  $f = 0,51 \text{ Hz}$ . Bei gleichmäßiger Beladung findet demnach keine signifikante Beeinflussung der Reaktion von Zugfahrzeug und Sattelaufliieger durch den Zentralachsanhänger statt.

Kritisch stellt sich die Reaktion des Typs 2 mit ungleichmäßiger Beladung A dar (Bild 58). Die Kombination von stark beladenem Zentralachsanhänger und gering beladenem Sattelaufliieger stellt mitunter aufgrund der komplexen Fahrzeugkinematik die instabilste Lang-Lkw Konfiguration dar.

Der Zentralachsanhänger baut bereits zu Beginn bei  $f = 0,1 \text{ Hz}$  eine Gierratenamplitude von  $\dot{\psi} = 3,19 \text{ °/s}$  auf, die sich ab  $f = 0,31 \text{ Hz}$  zum Resonanzfall aufschwingt. Die starke Anregung durch den Zentralachsanhänger überträgt sich über den Sattelaufliieger zudem auf das Zugfahrzeug. Die Sattelzugmaschine erfährt bis  $f = 0,35 \text{ Hz}$  eine erhöhte Gierdämpfung, schwingt sich dann jedoch ab dieser Frequenz bis zum Überschlagsfall auf und zieht die Anhänger mit sich. Diese Fahrzeugreaktion tritt aufgrund des sehr ungünstigen Beladungsverhältnisses A und der Kinematik des Gespanns auf. Der sehr stark beladene Zentralachsanhänger wird in seiner Gierbewegung gegenüber dem Sattelaufliieger nur gering durch Reibung im Kupplungspunkt zum Sattelaufliieger gedämpft. Der große Abstand von 18,7 m des Achspakets des Zentralachsanhängers von der anregungseinleitenden Vorderachse des Zugfahrzeugs begünstigen eine große Phasendifferenz zwischen der Gieranregung der Sattelzugmaschine und des Zentralachsanhängers, welche durch Interferenz die Gieranregung des Zentralachsanhängers verstärken kann. Zum anderen begünstigt dies die Eigendynamik des Zentralachsanhängers ähnlich dem Peitscheneffekt.

Da die Kombination Sattelaufliieger auf Sattelzugmaschine wie gezeigt ein sehr sicheres Fahrver-

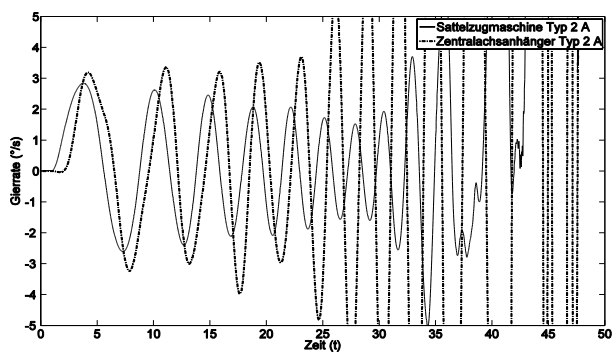


**Bild 59** Gierratenverlauf für Motorwagen und Zweiachsanhänger des Referenzfahrzeugs REF 2 beim Sinus Sweep

halten über der Anregungsfrequenz aufweist, ist es zu empfehlen, immer eine primäre Beladung des Sattelauflegers bis zur Gewicht- oder Volumengrenze anzustreben und nur sekundär den Zentralachsanhänger zu beladen.

Es ist festzustellen, dass die Gierreaktionen der Fahrzeugkombinationstypen REF 1 und Typ 1 bei Aufprägung des Sinus Sweep Lenkradwinkels gering ausfallen. Die Subsysteme Sattelzugmaschine und Sattelaufleger besitzen nur einen gemeinsamen Drehfreiheitsgrad um die Hochachse, um die eine Relativverdrehung der zwei Fahrzeuge zueinander möglich ist. Der Sattelaufleger weist weiterhin aufgrund seiner geometrisch großen Abmaße eine hohe Gierträgeit auf. Das Systemverhalten ist daher stark gedämpft, ersichtlich an der schnell abklingenden Amplitude und keiner signifikanten Amplitudenüberhöhung.

Typ 2 stellt kinematisch einen Sonderfall dar. Bei gleichmäßiger Beladung weist der Zentralachsanhänger keine kritischen Gierratenamplituden auf. Lediglich der langsame Amplitudenabfall aufgrund geringer Dämpfung ist charakterisierend. Bei ungünstiger, sehr hoher Beladung des Zentralachsanhängers mit 17,5 t Summenachslast und keiner Beladung des Sattelauflegers entwickelt dieser jedoch eine als kritisch zu bewertende Giereigendy-



**Bild 58** Gierratenverlauf für Sattelzugmaschine und Zentralachsanhänger des Typs 2 A beim Sinus Sweep

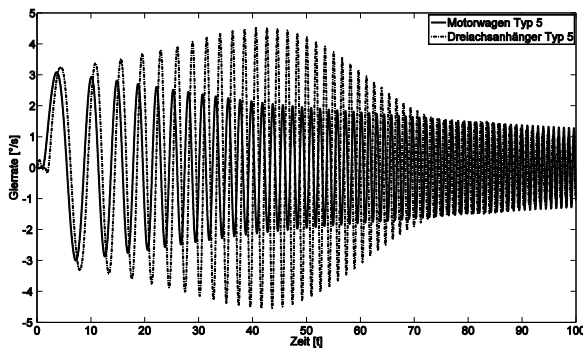
namik, die das Gesamtfahrzeug aufschwingen und umkippen lässt. Eine Primärbeladung des Sattelauflegers bzw. mindestens eine gleichmäßige Beladung über die Gesamtladefläche wie im Fall B sind daher zu empfehlen.

## Fahrzeuggruppe 2

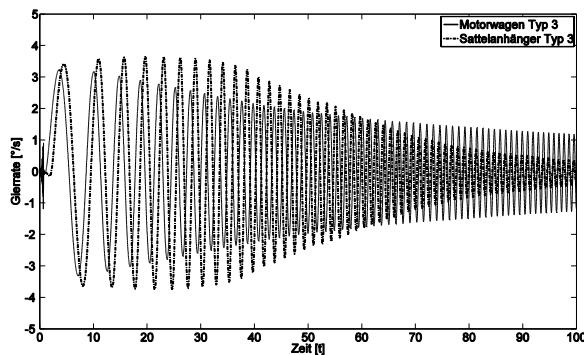
Bild 59 zeigt den Sinus Sweep für das Referenzfahrzeug 2. Der Zweiachsanhänger besitzt bei  $f = 0,43$  Hz das Gierratenmaximum von  $\dot{\psi} = 3,3$  %/s. Danach fällt die Amplitude stark ab und erreicht bei  $f = 0,75$  Hz die Amplitude des Motorwagens. Ähnliches Verhalten ist bei Typ 5 ersichtlich (Bild 60), jedoch mit einer stärkeren Amplitudenüberhöhung. Es baut sich eine Gierrate bis  $\dot{\psi} = 4,5$  %/s bei  $f = 0,48$  Hz auf, die zu höheren Frequenzen stark abfällt und bei  $f = 0,77$  Hz den Wert des Motorwagens erreicht.

Bild 61 zeigt den Verlauf für den Typ 3. Dieser baut qualitativ einen ähnlichen Amplitudenverlauf auf wie der Zweiachsanhänger des Referenzfahrzeugs REF 2. Die Resonanzfrequenz liegt bei einem etwas geringeren Wert von ca.  $f = 0,29$  Hz und ist mit einem Betrag von  $\dot{\psi} = 3,7$  %/s im Vergleich leicht höher. Der Amplitudenabfall zu höheren Frequenzen ist indes stärker. Ab  $f = 0,65$  Hz fällt der Betrag unter den des Motorwagens.

Die Fahrzeugkombinationstypen REF 2, Typ 3 und Typ 5 basieren jeweils auf einem dreiaxigen Motorwagen als Zugfahrzeug und einem gekuppelten Anhängerfahrzeug, welches als Zweiachs- Dreiachsanhänger oder als Sattelaufleger auf Dolly ausgeführt ist. REF 2 und Typ 5 besitzen Anhänger mit einer Drehschemellenkung an der ersten Achse, welche eine Rotation des Anhängergestells um die über eine Zugstange mit dem Motorwagen gekuppelte erste Achse ermöglicht. Der Sattelaufleger des Typs 3 ist auf der Sattelplatte des Dollys ebenfalls drehbar gelagert. Die erste Achse des Dollys wird abhängig vom Knickwinkel der Dollyzugstange im Kupplungsmaul des Motorwagens ausgelenkt. Es besteht demnach Vergleichbarkeit der Kinematik der drei Anhängerfahrzeuge und somit auch aller drei Fahrzeugtypen. Die Ergebnisse aus der Sinus Sweep Anregung weisen darin begründet Ähnlichkeit auf. Im Vergleich zu den Typen REF 1 und Typ 1 treten jedoch größere Gierverstärkungen der Anhängerfahrzeuge auf. Die geringe Reibung im Kupplungspunkt zwischen Motorwagen und Anhängerfahrzeug und der zweite Rotationsfreiheitsgrad begünstigen die Ausprägung einer Giereigendynamik der Anhängerfahrzeuge. Typ 5 weist die größte Gierverstärkung und Resonanzüberhöhung auf. Der große Achsabstand zwischen den Achsen drei und vier und die im Vergleich zu REF 2 geringere Achslast



**Bild 60** Gierratenverlauf für Motorwagen und Dreiachsanhänger des Typs 5 beim Sinus Sweep



**Bild 61** Gierratenverlauf für Motorwagen und Sattelaufleger auf Dolly des Typs 3 beim Sinus Sweep

der ersten Anhängerachse begünstigen die Giereindynamik des Dreiachsanhängers des Typs 5.

### 6.4.3 Einfacher Spurwechsel (ISO 14791)

Bei diesem Manöver wird ein Spurwechsel simuliert, wie er bei einem sehr dynamischen Ausschere- bzw. Überholmanöver auf der Autobahn auftritt. Der Fahrerregler des Simulationstools folgt der in der ISO 14791 vorgegebenen Trajektorie, die in Bild 62 ersichtlich ist. Die Einfahrtgeschwindigkeit der Fahrzeugkombination in die Fahrgasse wird so bemessen, dass das Zugfahrzeug beim Befahren des Linklenkabschnitt eine Querbeschleunigung von ca.  $2,0 \text{ m/s}^2$  erfährt und die Lenkradwinkelfrequenz zwischen  $f = 0,2$  und  $0,5 \text{ Hz}$  liegt.

Die Querabweichung in  $y$ -Richtung errechnet sich anhand folgender Formel:

$$y = \frac{a_y}{(2\pi f)^2} \left[ 2\pi f \frac{x}{v} - \sin\left(2\pi f \frac{x}{v}\right) \right] [m]$$

wobei  $v$  die Fahrgeschwindigkeit,  $a_y$  die Querbeschleunigung,  $f$  die Lenkradwinkelfrequenz und  $x$  die Strecke in Fahrzeuginnenrichtung darstellen.

Nachfolgende Untersuchungen werden mit  $v = 85 \text{ km/h}$  durchgeführt, um ein reales Spurwechselmanöver auf Autobahnen zu simulieren. Die Lenkradwinkelfrequenz wird mit  $f = 0,3 \text{ Hz}$  festgesetzt, weil dies nach (FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V. 2008) die kritischste Anregungsfrequenz darstellt.

Als Kennwerte dieses Manövers werden erfasst:

- Zusätzlicher Spurbreitenbedarf: maximal auftretende Abweichung des hinteren linken Fahrzeugecks in Fahrbahnquerrichtung bezogen auf die Solltrajektorie aus Bild 62, welcher das Zugfahrzeug folgt. Hiermit wird untersucht, ob bei dem Spurwechselmanöver kritische Ausschere- und Nachschwingbewegungen des letzten Anhängerfahrzeugs über die eigene Fahrspur hinaus auftreten, sodass zum einen eine Gefährdung anderer links- oder rechtsfahrender Verkehrsteilnehmer oder zum anderen eine für den Fahrer nur sehr schwer beherrschbare Eigendynamik des Fahrzeugs auftritt.
- Rearward Amplification: Die Quantifizierung der Beherrschbarkeit der Fahrzeugkombination wird anhand des Verstärkungsfaktors aus dem Maxima der Gierratenreaktion des hintersten Anhängers zur Gierratenreaktion des Zugfahrzeugs erzielt. Die Berechnung erfolgt nach folgender Vorschrift:

$$RA_{\dot{\psi}} = \frac{\dot{\psi}_{max,Trailer,h}}{\dot{\psi}_{max,Zugfahrzeug}} [-]$$

Kleine Werte der Rearward Amplification schreiben dem Fahrzeug eine gedämpfte und für den Fahrer tendenziell einfacher beherrschbare Fahrzeugreaktion zu.

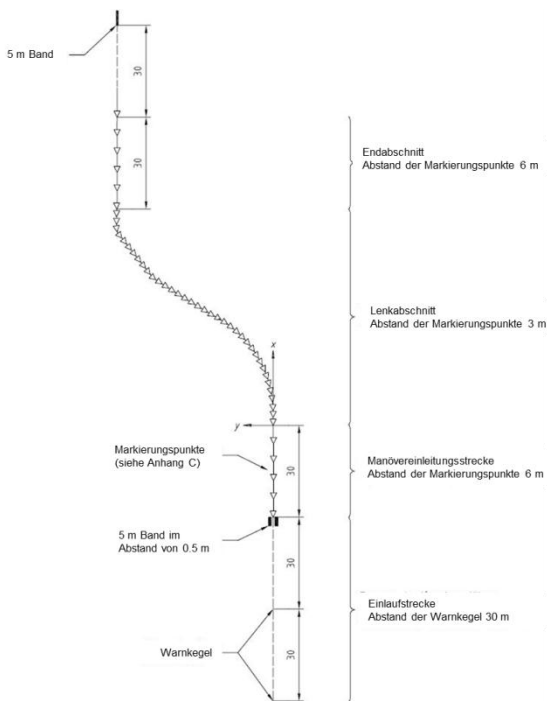


Bild 62 Spurwechseltrajektorie nach ISO 14791

## Ergebnisse

### Fahrzeuggruppe 1

Bild 63 zeigt den Spurversatz der hinteren linken Fahrzeugecke des letzten Anhängerfahrzeugs für die Fahrzeuge REF 1, Typ 1 und Typ 2 B.

Bei Einfahrt in die Fahrgasse befindet sich die linke hintere Fahrzeugecke bei 0 m Spurversatz. Am Ende des Spurwechselmanövers und vollständigem Überfahren einer Fahrspur nach ca. 200 m Fahrweg befindet sich der Messpunkt aller Fahrzeuge bei 3,50 m Spurversatz. Es wurde demnach ein Spurwechsel über eine Fahrbreite von 3,50 m simuliert, basierend auf dem kleinsten auf-

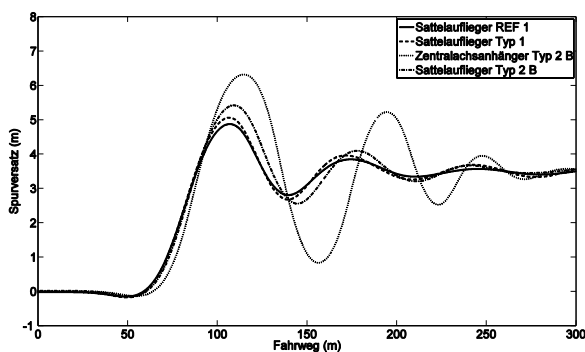


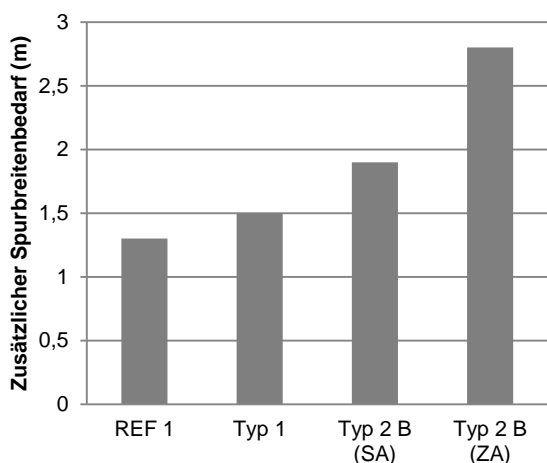
Bild 63 Spurversatz der linken hinteren Fahrzeugecke der Fahrzeuge REF 1, Typ 1 und Typ 2 B beim Einfachen Fahrspurwechsel

tretenden Regelquerschnitt für deutsche Autobahnen mit zwei Fahrspuren pro Fahrtrichtung.

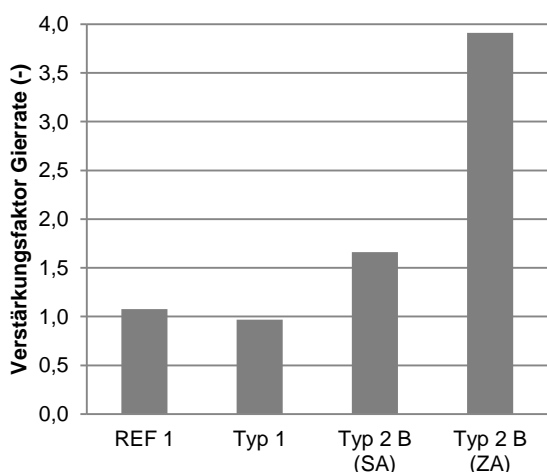
Das Referenzfahrzeug REF 1 schert bei der als für ein Nutzfahrzeug hochdynamisch anzusehenden Querbeschleunigung von  $a_y = 2,0 \text{ m/s}^2$  bei  $v = 85 \text{ km/h}$  bis zu einem Maximalwert des Spurversatzes von 4,80 m aus, weist demnach einen maximalen zusätzlichen Spurbreitenbedarf von 1,30 m auf, der im Wertebereich des in der Literatur veröffentlichten Spurversatzes für das Referenzfahrzeug REF 2 liegt (FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V. 2008). Typ 1 weicht nur gering vom Spurversatzverlauf des Referenzfahrzeugs REF 1 ab und benötigt maximal 0,20 m mehr Raumbedarf. Größere Abweichungen ergeben sich für die Anhänger des Kombinationstyps 2 mit gleichmäßiger Beladung B. Erhöht sich der Raumbedarf in lateraler Richtung des Sattelauflegers von Typ 2 B gegenüber REF 1 um 0,60 m auf 5,40 m, schwingt der Zentralachsenanhänger weiter aus: Es wird eine Maximalamplitude des Spurversatzes von 6,30 m erreicht, welche einem zusätzlichen Spurbreitenbedarf von 2,80 m entspricht. Die Dämpfung der Gierdynamik des Zentralachsenanhängers ist ebenfalls sehr schwach. Bild 64 fasst die zusätzlichen Spurbreitenbedarfe der Fahrzeuggruppe 1 grafisch zusammen.

Die Rearward Amplification der Gierrate der Fahrzeuge REF 1, Typ 1 und Typ 2 B zeigt Bild 65. Das Verhältnis zwischen maximal auftretender Gierrate des Anhängers und Zugfahrzeug liegt für REF 1 und Typ 1 mit 1,08 bzw. 0,97 jeweils nahe des Werts 1, welcher keiner Gierverstärkung von Zugfahrzeug auf den Anhänger entspricht. In diesem Fall verhalten sich demnach sowohl Zugfahrzeug als auch Anhänger gierdynamisch vergleichbar. Typ 2 B besitzt hingegen für beide Anhänger eine größere Rearward Amplification der Gierrate. Für den Sattelaufleger beträgt sie 1,66, für den Zentralachsenanhänger 3,91. Der Zentralachsenanhänger wird, wie dies schon beim Spurversatz ersichtlich ist, stark querdynamisch angeregt.





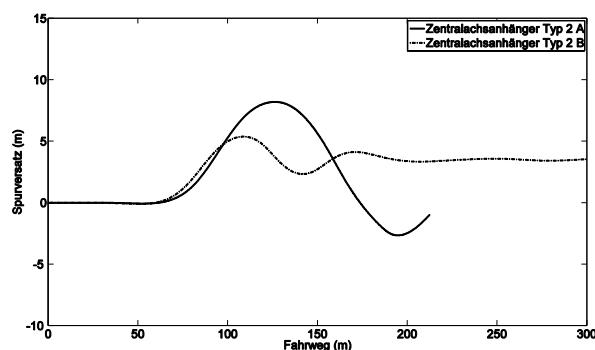
**Bild 64** Maximal auftretender zusätzlicher Spurbreitenbedarf der Fahrzeuge REF 1, Typ 1 und Typ 2 B beim Einfachen Fahrspurwechsel



**Bild 65** Rearward Amplification der Gierrate der Fahrzeuge REF 1, Typ 1 und Typ 2 B beim Einfachen Fahrspurwechsel

Eine Durchführung des Fahrmanövers Einfacher Fahrspurwechsel für den Typ 2 A ergibt ein starkes Aufschwingen des Zentralachsanhängers mit einer großen Amplitude bis 8,20 m. Die starke Pendelbewegung des Zentralachsanhängers führt schließlich zum Umkippen des ganzen Fahrzeugs. Bild 66 zeigt den Vergleich des Spurversatzes für die verschiedenen Beladungszustände A und B des Typs 2.

Eine gleichmäßige Beladung des Typs 2 zeigt sich auch hier als sehr wichtig für ein stabiles Fahrverhalten.



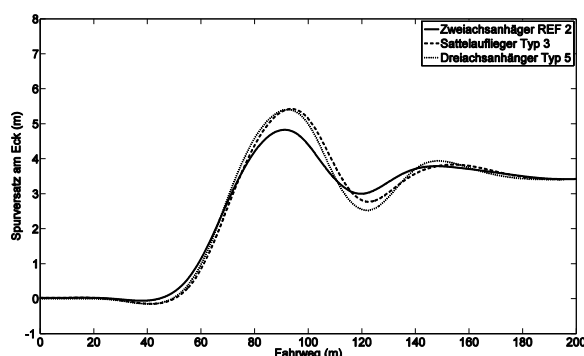
**Bild 66** Spurversatz der linken hinteren Fahrzeugecke der Fahrzeuge Typ 2 A und Typ 2 B

### Fahrzeuggruppe 2

Bild 67 zeigt den Spurversatz für die Typen REF 2, Typ 3 und Typ 5. Es sind für die Lang-Lkw Kombinationen Typ 3 und Typ 5 größere Schwingungsamplituden und eine geringere Dämpfung ersichtlich als für das kürzere Referenzfahrzeug REF 2.

Das hintere linke Fahrzeugeck von REF 2 weist einen maximalen Spurversatz von 4,80 m auf, wodurch sich ein zusätzlicher Raumbedarf von 1,30 m ergibt. Sowohl Typ 3 als Typ 5 besitzen mit 5,40 m einen ca. 0,60 m größeren Spurversatz als das Referenzfahrzeug, sodass in Summe ein maximaler zusätzlicher Spurbreitenbedarf von 1,90 m benötigt werden. Dieser Wert liegt signifikant unter dem in (FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V. 2008) genannten Wert des Typs 3 mit 60 t zu 2,8 m. Eine Reduktion der Fahrzeugmasse wirkt sich hier demnach stark stabilisierend aus.

Die Gegenschwingbewegung der Typen 3 und 5 ist im Vergleich zu REF 2 stärker ausgeprägt. Der Messpunkt des Typs 5 schwingt bis zu einem

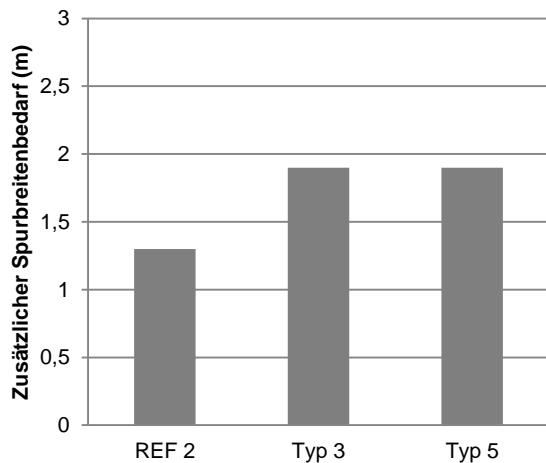


**Bild 67** Spurversatz der linken hinteren Fahrzeugecke der Fahrzeuge REF 2, Typ 3 und Typ 5 beim Einfachen Fahrspurwechsel

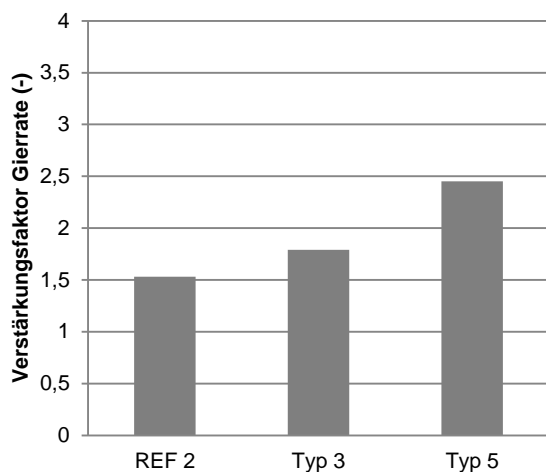
Spurversatz von 2,50 m zurück, bevor der Sollwert

nach dem Spurwechsel von 3,50 m erreicht ist. Bild 68 zeigt zusammenfassend den zusätzlichen Spurbreitenbedarf der Typen REF 2, Typ 3 und Typ 5.

Die Rearward Amplification der Gierrate der Fahrzeuggruppe 2 zeigt Bild 69. Bereits das Referenzfahrzeug REF 2 weist im Vergleich zu REF 1 eine höhere Gierratenverstärkung mit 1,53 auf. Der Sattelaufleger auf Dolly wird durch das Fahrspurwechselmanöver in seiner Gierrate nur geringfügig stärker angeregt als der Zweichsanhänger des Fahrzeugs REF 2, ist mit 1,79 jedoch deutlich gierdynamischer als der Sattelaufleger des Referenzfahrzeugs REF 1 (1,08). Typ 5 besitzt in der Fahrzeuggruppe 2 die größte Gierratenverstärkung mit 2,45.



**Bild 68** Maximal auftretender zusätzlicher Spurbreitenbedarf der Fahrzeuge REF 2, Typ 3 und Typ 5 beim Einfachen Fahrspurwechsel



**Bild 69** Rearward Amplification der Gierrate der Fahrzeuge REF 2, Typ 3 und Typ 5 beim Einfachen Fahrspurwechsel

#### 6.4.4 Fazit

Die durchgeführte simulative fahrdynamische Analyse der Lang-Lkw Konfigurationen ergibt die in den Unterkapiteln 6.4.1, 6.4.2 und 6.4.3 erläuterten Erkenntnisse, die jedoch nicht für eine globale Stabilitätsbewertung eines jeweiligen Typs dienen können. Die Stabilität der untersuchten Fahrzeuge ist stark abhängig vom jeweiligen Beladungszustand und vom aufgeprägten Fahrmanöver, so dass keine Pauschalbewertung möglich ist.

Tendenziell ist festzustellen, dass Sattelauflegerkombinationen stabiler als Gliederzugkombinationen sind. Eine Ausnahme stellt jedoch Typ 2 dar, dessen zusätzlicher Zentralachsanhänger insbesondere bei falscher Beladung (A) signifikante Störwirkung auf das Zugfahrzeug und den Sattelaufleger ausüben kann. Die Gliederzugkombinationen sind aufgrund ihrer geringen Dämpfung zwischen Motorwagen und Drehschemelanhänger bei höherdynamischerer Anregung schwerer zu stabilisieren.

Die im vorliegenden Bericht genannten technischen Empfehlungen können indes das Fahrverhalten der Fahrzeugkombinationen verbessern. Weiterhin lassen die Realfahrzeuge, die mit ESP ausgestattet sind, ein deutlich sichereres Fahrverhalten erwarten als die passiven Simulationfahrzeuge. Es werden Realfahrversuche mit den Lang-LKW-Kombinationstypen empfohlen, um die Ergebnisse abzusichern und die Erkenntnisse zu erweitern.

## 7 AP 6 - Wirksamkeit der hinteren Kennzeichnung der Fahrzeuge und Sichtbeschränkung anderer Verkehrsteilnehmer

### 7.1 Problemstellung und Zielsetzung

Verkehrsteilnehmer sind auf Fernstraßen mit einer Vielzahl an rückwärtigen Lkw-Markierungen und Aufschriften konfrontiert. Die LKWÜberStVAusV § 5.13 schreibt hier eine rückwärtige Kenntlichmachung aus einem retroreflektierenden Material mit der Aufschrift „Lang-Lkw“ mit einer Schrifthöhe von 130 mm vor (Bild 70).

So stellt sich die Frage, wie Verkehrsteilnehmer den vor sich fahrenden Lang-Lkw auf Basis dessen Beschilderung einschätzen. Ziel dieses Arbeitspakets ist es daher, die Wirksamkeit der nach LKWÜberStVAusV § 5.13 geforderten rückwärtigen Kenntlichmachung vor dem Hintergrund der tatsächlichen Umsetzung im Feldversuch zu untersuchen und gegebenenfalls Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Durch die größere Länge der im Feldversuch teilnehmenden Fahrzeugkombinationen könnte das Sichtfeld anderer Verkehrsteilnehmer zusätzlich eingeschränkt sein, was ebenfalls mithilfe einer Probandenstudie untersucht wird.

### 7.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Nach DIN EN ISO 15008 (NORMUNGS-AUSSCHUSS AUTOMOBILTECHNIK 2011) wird für die Bestimmung der Zeichenhöhe eines betrachteten Objekts der Betrachtungsabstand mit einem Faktor multipliziert. Es wird empfohlen, dass dieser Faktor größer  $5,815 \cdot 10^{-3}$  ist.

Fährt ein Pkw mit 80 km/h hinter einem Lkw, so sollte der Pkw-Fahrer einen Mindestabstand von 40 m einhalten. Um einen Überholvorgang einschätzen zu können, sollte der Pkw-Fahrer aus dieser Entfernung erkennen können, ob es sich bei dem vorausfahrenden Fahrzeug um einen Lang-Lkw handelt. Unter dieser Annahme ergibt sich für



**Bild 70** Rückwärtige Kenntlichmachung aus einem retroreflektierenden Material mit der Aufschrift „Lang-Lkw“

ein rückwärtig montiertes Schild an einem Lkw nach ISO 15008 eine Schildgröße von mindestens 233 mm.

Weiterhin ist der Norm zu entnehmen, dass eine Symbol-Hintergrundfarbkombination von Schwarz/Weiß oder Schwarz/Gelb zu bevorzugen ist.

Die Wirksamkeit alternativer grafischer Darstellungsformen gilt es zu untersuchen. Bild 71 zeigt die Kennzeichnung langer Fahrzeuge in den Niederlanden, Australien und Skandinavien.

### 7.3 Methodisches Vorgehen

Aus AP 1 stehen durch die Auswertung der zur Verfügung gestellten Unterlagen, durch Sichtung von veröffentlichtem Bildmaterial sowie durch die Fahrzeugbegutachtungen Informationen über die Art und Anbringung der rückwärtigen Kenntlichmachung zur Verfügung. Ausgehend von diesen Daten wird in einer Probandenstudie nach dem Auswahlverfahren der willkürlichen Stichprobe mit 50 Verkehrsteilnehmern die Wirksamkeit der rückwärtigen Kenntlichmachung untersucht.

Ein australischer „Road Train“ ist üblicherweise länger als 50 m. Daher wird diese Darstellungsform nicht weiter untersucht.

Neben der deutschen Varianten des Niederländischen Schildes („Achtung: 25 Meter lang“) und der Variante „Lang-Lkw“ wurde mittels Fragebögen untersucht, ob eine schriftliche oder eine bildliche Darstellungsform wirksamer ist.

Die 50 Probanden wurden gefragt,

- wie lang ein Lkw-Zug ihrer Einschätzung nach ist.
- ob sie ein Schild oder ein Piktogramm zur Kennzeichnung eines Lang-Lkw für ein-



**Bild 71** Gängige Kennzeichnung in den Niederlanden (oben), Australien (mittig) und Skandinavien (unten)

deutiger halten.

Darüber hinaus wurden den Probanden vier verschiedene Beschilderungen angeboten, um das für sie jeweils eindeutigste auszuwählen (Bild 72).

Um Hinweise auf mögliche Sichtbehinderungen durch Lang-Lkw zu bekommen, wurden die Probanden auch nach Situationen befragt, in denen Lkw ihre Sicht einschränkten.

## 7.4 Ergebnisse

Die in AP 1 durchgeführten Fahrzeugbegutachtungen ergaben, dass bei allen 14 Lang-Lkw ein Schild mit dem Aufdruck „Lang-Lkw“ (Bild 70) vorhanden ist. Nur eines dieser Schilder entspricht nicht exakt den Anforderungen nach LKWÜberlStVAusnV § 5 Absatz 13, weil es nicht retroreflektierend ist.

Die Befragung der 50 Probanden ergab eine durchschnittlich geschätzte Länge eines Lkw-Zuges (individuelle Vorstellung davon) von 16,29 m mit einer Standardabweichung von 7,84 m. Ein Großteil der Befragten schätzt also korrekt oder überschätzt die Länge, sodass eine ausreichende Sensitivität für die überlange Einschätzung eines gekennzeichneten Lang-Lkw angenommen werden kann.

Die Ermittlung einer gut lesbaren Schildgröße nach DIN EN ISO 15008 (NORMUNGSAUSSCHUSS AUTOMOBILTECHNIK 2011) unter Annahme eines typischen Sicherheitsabstands von 40 m ergibt eine Mindestgröße von 233 mm. Ob die Einschätzung der Überlänge aufgrund der Schildgröße auch frühzeitig, d. h. vor Beginn eines geplanten Überholmanövers, getroffen werden kann, muss Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Ein Piktogramm wird von 74% der Befragten ggü. einem Schriftzug präferiert und für eindeutiger gehalten (Bild 72). Die Erarbeitung eines einheitlichen bildlichen Warnhinweises zur Kennzeichnung

längerer Fahrzeugkombinationen wird somit empfohlen.

Nach Erfahrung der Befragten treten Sichteinschränkungen durch Lkw hauptsächlich bei Überholvorgängen auf Landstraßen auf und es wird auf die Gefahr einer Verdeckung von Straßenbeschilderungen hingewiesen. Weiterer Untersuchungsbedarf besteht in einer systematischen Erfassung hierfür relevanter Verkehrssituationen. Die Analyse ihrer Signifikanz für die Verkehrssicherheit kann z. B. mithilfe von Fahrsimulator-Studien ermittelt werden.

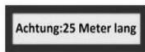
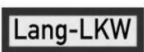


	A	B	C
			
	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>80%</b> (bevorzugen das Schild aus Spalte A)	<b>78%</b> (bevorzugen das Schild aus Spalte A)
	<input type="checkbox"/>	<b>76%</b> (bevorzugen das Schild aus Spalte A)	<b>69%</b> (bevorzugen das Schild aus Spalte A)

Bild 72 Gegenüberstellung der gezeigten Schilder

## 8 AP 7 – Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen

### 8.1 Problemstellung und Zielsetzung

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Beurteilung der möglichen CO<sub>2</sub>-Reduktion durch am Feldversuch teilnehmende Lang-Lkw. Diese kann auf mehreren Ebenen erfolgen. Ausgehend von Betrachtungen der Transporteffizienz einzelner Fahrzeuge bis hin zu Auswirkungen auf komplexe Logistiksysteme unter Berücksichtigung eingesparter Fahrten oder umverteilter Ladung. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wird auf erstere eingegangen. Hierzu werden Kraftstoffverbräuche bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen von Lang-Lkw mit jenen von Lkw herkömmlicher Bauart verglichen und der jeweiligen Transportaufgabe gegenübergestellt.

Um die Transporteffizienz von schweren Nutzfahrzeugen zu bewerten, muss der Kraftstoffverbrauch jeweils dem Nutzen der Fahrt, d. h. der Zuladung, gegenübergestellt werden. Übliche Kennzahlen sind hier Liter je Tonne Zuladung und gefahrenem Kilometer bzw. Liter je Kubikmeter Zuladung und gefahrenem Kilometer.

### 8.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Untersuchungen zu Kraftstoffverbräuchen von im Feldversuch laufenden Fahrzeugkombinationen mit Überlänge unter Beibehaltung des zulässigen Gesamtgewichts von 40 t bzw. 44 t wurden bislang nicht durchgeführt.

Es wurden jedoch anhand von einzelnen Realversuchen in Niedersachsen und Baden-Württemberg die Kraftstoffverbräuche von Fahrzeugen mit Überlänge mit einer zulässigen Gesamtmasse von 60 t analysiert (BENDEL et al. 2009), (FRIEDRICH et al. 2007). Die untersuchten Fahrzeugkombinationen entsprachen von ihrer Konfiguration her jenen des Typs 2 und 3 der LKWÜberlStVAusnV. Die Ergebnisse lassen sich aufgrund unterschiedlicher Gesamtmassen nicht direkt auf Lang-Lkw übertragen. Es kann aus (BENDEL et al. 2009) jedoch aus dem Vergleich eines Lastzuges mit 40 t Einsatzgewicht zu einer Fahrzeugkombination analog Typ 3 mit einem Einsatzgewicht von 60 t ein Gradient des Kraftstoffverbrauchs über die Masse abgeleitet werden. Dieser beträgt 0,6...0,7 l/100km je Tonne Einsatzgewicht.

In (KNIGHT et al. 2010) wurden simulativ die Kraftstoffverbräuche und Transporteffizienzen von

längeren Sattelzügen bis zu einer Länge von 18,55 m in Großbritannien ermittelt. Der Kraftstoffverbrauch von längeren Sattelzügen unterscheidet sich aufgrund geänderter Aerodynamik nur geringfügig von herkömmlichen Varianten. Durch eine lineare Regression von Kraftstoffverbräuchen über unterschiedliche Einsatzgewichte der Fahrzeuge wurde ebenfalls ein Gradient von 0,6 l/100km je Tonne Mehrgewicht abgeleitet.

Dieser Gradient bestätigt sich auch in weiteren Untersuchungen mit Gewichtsvariation anhand von Sattelzügen mit drei- und zweiachsigen Aufliegern (DENIMAL et al. 2012).

Oben genannte Studien deuten somit darauf hin, dass sich etwaige höhere Kraftstoffverbräuche von Lang-Lkw hauptsächlich durch höhere Einsatzgewichte einstellen. Effekte durch schlechtere Aerodynamik, begründet in möglichen zusätzlichen Zwischenräumen zwischen Fahrzeugteilen, oder höherem Rollwiderstand, begründet in höherer Anzahl an Achsen, scheinen eine untergeordnete Rolle zu spielen. Die in den zitierten Studien untersuchten Fahrzeuge werden in Fernverkehrsszenarien mit hohen Autobahnanteilen eingesetzt. Die Fahrzeuge selbst sind als Standardfahrzeuge mit herkömmlichen Aufbauten (Koffer) und Sattelaufliegern (Koffer oder Seitenplane) einzustufen.

Kraftstoffverbräuche bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen hängen bei schweren Nutzfahrzeugen neben fahrzeugseitigen Einflüssen von einer Vielzahl an Parametern ab, welche in obigen Studien kontrolliert wurden, oder im jeweiligen Vergleich zu herkömmlichen Lkw gegenseitig aufgewogen wurden. Beispielhafte Einflüsse sind Straßentopografie, Geschwindigkeitsprofil und Fahrweise, Wetterbedingungen oder auch Verkehrseinflüsse.

### 8.3 Methodisches Vorgehen

Im Feldversuch eingesetzte Lang-Lkw fahren teilweise regelmäßig gleiche Routen mit sich wiederholenden Ladungsbedingungen ab. Dies begünstigt die Analyse von Kraftstoffverbräuchen, weil genannte Einflussparameter wie Wetter und Verkehrseinflüsse durch die Betrachtung längerer Zeiträume statistisch gemittelt werden. Der Einfluss der Fahrweise kann über Fahrerbewertungen in Telematiksysteme kontrolliert werden.

Die Analyse der Kraftstoffverbräuche und Transporteffizienzen erfolgt im Rahmen dieser Studie auf Basis von Flottentelematikdaten, welche unter anderem auch Informationen zu Einsatzgewichten oder auch Durchschnittsgeschwindigkeiten enthalten. Voraussetzung für diese Analyse bilden folgende Punkte:

	Sattelzug (Volumen)	Lang-Lkw Typ 3 (Volumen)
Zulässiges Gesamtgewicht	36 t	40 t
Achsen	4	8
Motor	450 PS, Euro 6	
Bewertete Fahrstrecke	10.700 km	8.900 km
Mittleres Einsatzgewicht	20,7 t	33,9 t
Leergewicht	13,5 t	22,5 t
Nutzlast, Auslastung	7,2 t   32%	11,4 t   65%
Volumen, Auslastung	100 m <sup>3</sup>   100%	155 m <sup>3</sup>   100%
Dichte der Ladung	72 kg/m <sup>3</sup>	
Mittlerer Kraftstoffverbrauch	24,1 l/100km	32,0 l/100km
Transporteffizienz	3,37 l/100tkm (Referenz)	2,86 l/100tkm (-15 %)
	0,24 l/100m <sup>3</sup> km (Referenz)	0,21 l/100m <sup>3</sup> km (-14 %)

Tab. 4 Berechnung der Transporteffizienzen von Sattelzug und Lang-Lkw vom Typ 3

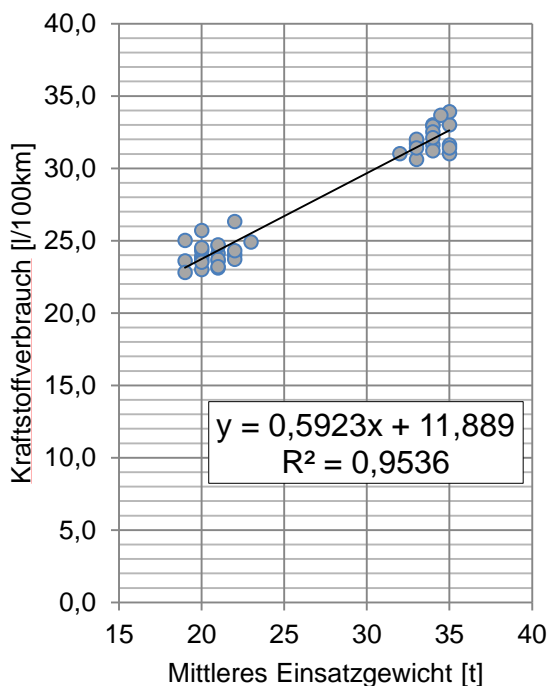


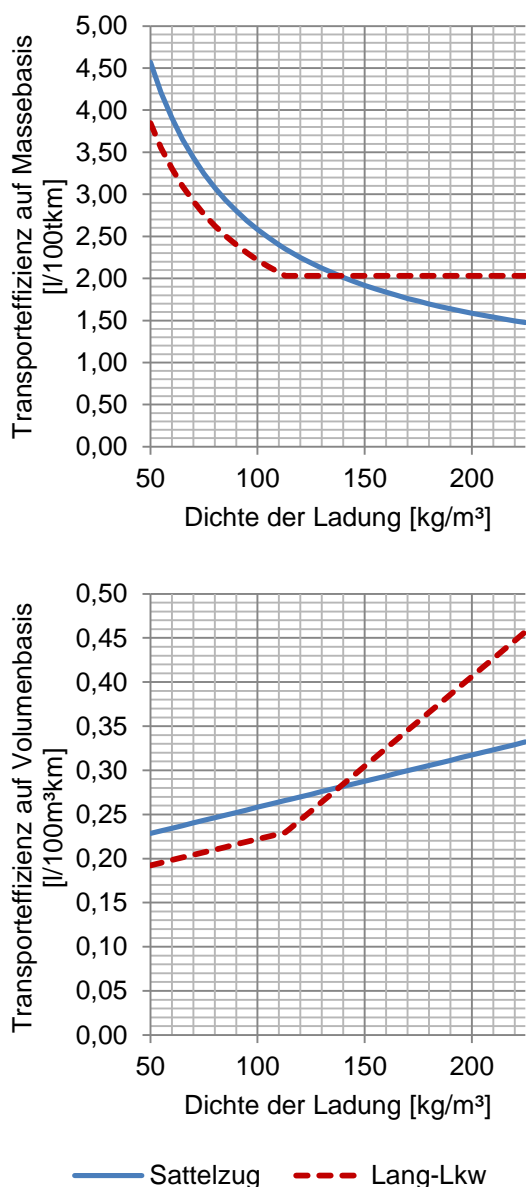
Bild 73 Kraftstoffverbräuche von Sattelzug und Lang-Lkw vom Typ 3 aufgeschlüsselt über das Einsatzgewicht

- Es muss eine Route vorhanden sein, die regelmäßig von Lang-Lkw und Lkw herkömmlicher Bauart abgefahren wird oder wurde.

- Für die Vergleichbarkeit ist eine gleichbleibende mittlere Dichte der Ladung erforderlich. Das bedeutet, dass beim Vergleich der von zwei Lkw-Konfigurationen nur die Quantität, jedoch nicht die Dichte der Ladung variieren darf.
- Die Fahrerbewertung muss auf einem möglichst hohen Niveau sein, um die Streuung der Kraftstoffverbräuche durch Fahrereinflüsse gering zu halten.
- Die Durchschnittsgeschwindigkeiten der einzelnen Fahrten dürfen sich nicht wesentlich unterscheiden. Geringere Geschwindigkeiten deuten auf außergewöhnliche Verkehrssituationen wie Stau hin.
- Der Vergleich zwischen Lang-Lkw und Lkw herkömmlicher Bauart muss über hinreichend viele Fahrten erfolgen. Geringe Verkehrseinflüsse und unterschiedliche Witterungsbedingungen heben sich dadurch bei Bildung von Mittelwerten des Kraftstoffverbrauchs jeweils gegenseitig auf.
- Die betrachteten Fahrzeuge müssen über die gleiche Motorisierung verfügen und in einem allgemein gut gewarteten Zustand sein, sodass höhere Kraftstoffverbräuche beispielsweise durch zu geringe Reifendrücke oder falsche Dachspoileinstellungen ausgeschlossen werden können.

## 8.4 Ergebnisse

Im Rahmen dieser Studie konnte nur die Route einer Spedition aufgefunden werden, welche oben genannte Anforderungen erfüllt und deren Spedition über ein entsprechendes Flottentelematiksystem verfügt, das sowohl über eine Fahrerbewertung ermöglicht als auch automatische routenbezogene Kraftstoffverbrauchsauswertungen zulässt. Auf der zur Analyse herangezogenen Fernverkehrsroute wurden über zwei Monate hinweg regelmäßig leichte Güter mit einer mittleren Dichte von 72 kg/m<sup>3</sup> transportiert (Tab. 4). Die Güter wurden sowohl von einem Volumen-Sattelzug mit 36 t zulässiger Gesamtmasse und 100 m<sup>3</sup> Ladevolumen, als auch von einem Lang-Lkw vom Typ 3 mit 40 t zulässiger Gesamtmasse und 155 m<sup>3</sup> Ladevolumen transportiert. Aufgrund der geringen Dichte des Ladeguts konnten bei beiden Lkw-Konzepten stets die vollen Ladevolumina ausgeschöpft werden. Die zulässigen Gesamtmasse und Achslasten stellten auch beim betrachteten Lang-Lkw mit einer Leermasse von 22,7 t keine Einschränkung dar. Dieser könnte erst ab einer mittleren Ladungsdichte



**Bild 74** Transporteffizienzen von Sattelzug und Lang-Lkw bei unterschiedlichen Dichten der Ladung

te von  $113 \text{ kg/m}^3$  seine zulässige Gesamtmasse überschreiten.

Beide Fahrzeuge verfügen über die gleiche Motorisierung sowie das gleiche Fahrerhaus. Die Auflieger am Sattelzug sowie auf der Untersetzachse des Lang-Lkw sind Volumen-Ausführungen mit Seitenplane. Der Motorwagen des Lang-Lkw verfügt ebenfalls über einen Aufbau mit Seitenplane.

Die bewerteten Fahrstrecken belaufen sich auf  $10.700 \text{ km}$  bzw.  $8.900 \text{ km}$ . Die mittleren Kraftstoffverbräuche unterscheiden sich mit  $24,1 \text{ l/100km}$  und  $33,9 \text{ l/100km}$  deutlich. Zur Berechnung der Transporteffizienz werden sie in Bezug zur Nutzlast (je Tonne) bzw. des Nutzvolumens (je Kubikmeter) gesetzt. Hierbei ergeben sich für den Sat-

telzug eine Transporteffizienz von  $3,37 \text{ l/100tkm}$  bzw.  $0,24 \text{ l/100m}^3\text{km}$  und für den Lang-Lkw  $2,81 \text{ l/100tkm}$  bzw.  $0,21 \text{ l/100m}^3\text{km}$ . Der Lang-Lkw vom Typ 3 weist somit bezüglich der Nutzlast eine um  $15 \%$  bessere Transporteffizienz auf. Bezüglich des Nutzvolumens verbessert sich die Transporteffizienz um  $14 \%$ .

In Bild 73 wurden die Kraftstoffverbräuche der einzelnen Fahrten beider Lkw-Konzepte in einem Grafen über das mittlere Einsatzgewicht aufgetragen. Eine lineare Regression bestätigt bei anderen Untersuchungen ermittelten Gradienten von rund  $0,6 \text{ l/100km}$  je Tonne Einsatzgewicht (siehe Kapitel 8.2). Daraus kann die oben genannte These bestätigt werden, wonach im Konzeptvergleich Einflüsse durch Aerodynamik und Rollwiderstand hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs des Lang-Lkw eine untergeordnete Rolle spielen und das höhere Einsatzgewicht maßgeblich ist.

Der abgeleitete Gradient kann somit zu Überschlagskalkulationen des Kraftstoffverbrauchs herangezogen werden. Beispielhaft zu nennen ist ein angedachter Einsatz von Lang-Lkw auf einer Route, welche derzeit mit Lkw herkömmlicher Bauart abgefahren wird. Liegen hier Kraftstoffverbrauchswerte der herkömmlichen Lkw vor, kann ein zu erwartender mittlerer Kraftstoffverbrauch von Lang-Lkw über dessen höhere Zuladung und die mittlere Dichte der Güter errechnet werden. Eine Aussage, ob der Gradient auch bei sich stark unterscheidenden Fahrzeugkonzepten gilt, kann nicht getroffen werden. Beispielhaft zu nennen wären unterschiedliche Motorisierungen und Fahrerhäuser oder eine stark voneinander abhebende äußere Geometrie durch sich voneinander unterscheidende Aufbauten.

Im Folgenden wird die lineare Regression bei beiden Fahrzeugen aus obiger Analyse über eine Parametervariation der Dichte angewandt. Ziel dieser Parametervariation ist der Vergleich der Transporteffizienzen auch bei Gütern anderer Dichte. Es wird angenommen, dass beide Fahrzeugkonzepte jeweils bis zu ihrer Volumen- bzw. Gesamtmassegrenze ausgeladen werden. Einzelne Achslasten und die Verteilung der Ladung können in diesem Beispiel unberücksichtigt bleiben. Bild 74 oben zeigt den Verlauf der Transporteffizienzen beider Lkw-Konzepte auf Basis der Nutzlast in  $\text{l/100tkm}$ . Der Verlauf des Lang-Lkw weist bei  $113 \text{ kg/m}^3$  eine Unstetigkeit auf. Ab dieser Dichte ist der Lang-Lkw bei seiner zulässigen Gesamtmasse angelangt. Bei höheren Dichten der Ladung kann volumenseitig das Fahrzeug nicht mehr voll ausgelastet werden. Dieser Punkt ist beim Sattelzug erst bei  $225 \text{ kg/m}^3$  erreicht. Der um  $15 \%$  geringere Verbrauch des Lang-Lkw bezogen auf die Nutzlast bleibt bis zu der Dichte von  $113 \text{ kg/m}^3$  re-

lativ konstant und bricht dann ein. Der Vorteil des Lang-Lkw in der Transporteffizienz bezogen auf das Nutzvolumen von 14 % ist auch bis  $113 \text{ kg/m}^3$  relativ konstant und bricht dann ein (Bild 74 unten). Ab einer Dichte von  $136 \text{ kg/m}^3$  weist der Sattelzug eine bessere Transporteffizienzen auf, sowohl masse- also auch volumenbezogen.

Der diskutierte Lang-Lkw vom Typ 3, bestehend aus einem 3-achsigen Motorwagen, 2-achsiger Untersetzachse und einem 3-Achsigen verfügt über 8 Achsen. Bei einer zulässigen Gesamtmasse von 40 t reicht jedoch eine geringere Zahl an Achsen. Denkbar sind beispielsweise Lang-Lkw vom Typ 3 mit insgesamt 6 Achsen (Motorwagen 4x2, Untersetzachse mit zwei Achsen, Auflieger mit 2 Achsen). Hierdurch könnte die Nutzlast durch ein geringeres Eigengewicht gesteigert, oder bei volumenseitiger Auslastung der Kraftstoffverbrauch reduziert und die Transporteffizienz weiter erhöht werden.



## 9 Zusammenfassung

Die in der LKWÜberlStVAusnV geforderten Sicherheitsausstattungen wie Spurhalteleuchten, Retarder, Scheibenbremsen oder ESP tragen zur Verkehrssicherheit der im Feldversuch eingesetzten Lang-Lkw bei und bewirken, dass diese in erster Linie aus modernen Fahrzeugteilen zusammengesetzt werden. Diese Anforderungen wurden von allen dokumentierten Fahrzeugen umgesetzt. Die in den Übereinstimmungsnachweisen gemachten Angaben zur Ausstattung der Fahrzeuge konnten in Fahrzeugbegutachtungen bestätigt werden. Lediglich Maßangaben und Informationen zur Lenk- oder Liftbarkeit von Achsen waren in den Übereinstimmungsnachweisen zum Teil falsch angegeben.

Weiterhin zeigte sich im Feldversuch, dass der Lang-Lkw vom Typ 3 von einer großen Mehrheit bevorzugt wird. Jedoch darf nicht unerwähnt bleiben, dass Lang-Lkw vom Typ 5 auch unter anderen Ausnahmegenehmigungen als der LKWÜberlStVAusnV außerhalb des Feldversuches eingesetzt werden können.

Die in den Fahrzeugen verbauten Achslastmesssysteme ermöglichen die Ermittlung der Gesamtmasse. Der Ables- und Additionsprozess über teilweise am Fahrzeug verteilte Anzeigen ist jedoch mit einem unpraktikablen und fehleranfälligen Aufwand verbunden. Systeme, welche die Achslasten und auch Gesamtmasse im Fahrerhaus anzeigen, könnten hier zu einer Verbesserung beitragen. Die im Beispiel gemessenen Genauigkeiten erscheinen zum Transparentmachen von etwaigen Überladungszuständen hinreichend genau. Da die Messgeräte über keinerlei Spezifikation verfügen, ist es schwer, die Aussage für weitere Systeme zu verallgemeinern.

Die im Feldversuch verbauten Kamerasysteme ermöglichen je nach Anbringungsort unterschiedliche Funktionalitäten und können entweder als Rückfahrhilfe oder zur Beobachtung des rückwärtigen Verkehrs eingesetzt werden. Objekte hinter der Fahrzeugkombination können jedoch bei allen Systemen erkannt werden.

Die Tauglichkeit der Fahrzeuge, sie theoretisch im unbegleiteten Kombinierten Verkehr einsetzen zu können, wurde bis auf wenige Ausnahmen erfüllt. Jedoch kann bei der Beurteilung der KV-Tauglichkeit der eingesetzten Fahrzeuge selbst keine Rücksicht auf tatsächlich transportierte, teilweise nicht KV-taugliche Wechselsysteme genommen werden.

Bei der Beurteilung der Kurvenläufigkeit der Lang-Lkw nach § 32d der StVZO („BO-Kraftkreis“) konnte die Erfüllung in ausreichend dokumentierten Fäl-

len auch simulativ überprüft werden. Eigene Messungen bestätigten hierbei die Simulationen. Es stellte sich jedoch bei der Ermittlung des Standes der Technik heraus, dass teilweise unterschiedliche Messverfahren zum Einsatz kommen, weil die Prüfvorschriften in Gesetzestexten unzureichend formuliert sind und Nachbesserungsbedarf aufweisen. Dies spielt insbesondere bei Lang-Lkw eine Rolle, weil sich im Gegensatz zu Lkw herkömmlicher Bauart teilweise größere Unterschiede in den Ergebnissen je nach Messverfahren zeigen. Weiteren Einfluss auf die Kurvenläufigkeit haben Liftachsen und Systeme zur dynamischen Achslastverteilung während Kurvenfahrten, deren Einsatz in den Prüfvorschriften ebenfalls noch nicht vollständig geklärt ist.

Im Rahmen der Messung der Bremsverzögerung konnte gezeigt werden, dass die Fahrzeugkombination vom Typ 3 bei gleichem Einsatzgewicht einen kürzeren Bremsweg als ein Sattelzug aufweist und bei der Bremsung auch gestreckt blieb.

Auch die Untersuchung der Sogwirkung auf Zweiräder ergab, dass sich durch die größere Fahrzeuglänge keine erhöhte Gefährdung bei einem Überholvorgang ergibt. Bei der Frage nach der Windstabilität von Lang-Lkw konnte durch die Fahrerbefragungen nur ein erstes Stimmungsbild erzeugt werden. Dies deutete auf eine mindestens gleichwertige Seitenwindstabilität von Lang-Lkw im Vergleich zu herkömmlichen Lkw hin.

Die fahrdynamische Untersuchung der Lang-Lkw Konfigurationen Typ 1, Typ 2, Typ 3 und Typ 5 anhand eines Mehrkörpersimulationstools fand in AP 5 statt.

Bei der Stationären Kreisfahrt wurde ermittelt, dass eine Zwangslenkung an der Nachlaufachse des Motorwagens des Referenzfahrzeugs REF 1 über der Querschleunigung keine signifikante Änderung des Eigenlenkgradienten ergibt. Es wird dennoch empfohlen, alle deaktivierbaren Zusatzlenkachsen bereits bei geringen Fahrgeschwindigkeiten zu deaktivieren, um bei transienten Manövern das Summenseitenkraftpotenzial aller Achsen voll auszunutzen.

Weiterhin haben die Untersuchungen ergeben, dass die Typen 1 und 2 B ein neutraleres Eigenlenkverhalten aufweisen als das stärker untersteuernde Referenzfahrzeug REF 1. Die Schwimmwinkel für Motorwagen und Anhänger sind im Vergleich leicht erhöht, weisen jedoch keine starke Progression auf. Die Fahrzeuge zeigen bei stationärer Kreisfahrt ein stabiles Fahrverhalten. Der Beladungszustand A hingegen führt zum Übersteuerverhalten und ist zu vermeiden.

Die Typen 3 und 5 zeigen ein ähnliches Verhalten: Leicht erhöhte Schwimmwinkel für Motorwagen

und Anhänger resultieren in einem neutralerem Eigenlenkverhalten der Gesamtfahrzeuge.

Die Analyse des Fahrmanövers Sinuslenken ergab im Vergleich zu den Referenzfahrzeugen erhöhte Gierresonanzreaktionen der Fahrzeugkombinationen Typ 2 B und Typ 5, die bei Erhöhung der Lenkradwinkelfrequenz abfallen. Der Beladungszustand A des Typs 2 führte zum starken Aufschwingen und Umkippen des Gesamtfahrzeugs. Alle anderen Kombinationen ergaben ein geringes Resonanzverhalten über der Anregungsfrequenz.

Das Fahrmanöver Einfacher Spurwechsel zeigte für den Typ 2 B großen zusätzlichen Spurbedarf und eine hohe Rearward Amplification der Gierrate. Der Beladungszustand A führte auch hier zu einem instabilen Fahrverhalten, das zum Umkippen des Fahrzeugs führte. Typ 5 weist bei gleicher benötigter zusätzlicher Spurbreite eine höhere Rearward Amplification als das kinematisch vergleichbare, Fahrzeug Typ 3 auf. Typ 1 erweist sich als besonders stabil.

Die Simulationsergebnisse bescheinigen den Lang-Lkw Fahrzeugkombinationen Typ 1 und Typ 3 gesamtheitlich ein fahrdynamisch sicheres Fahrverhalten. Typ 2 erweist sich aufgrund seiner Kinematik als instabiler, bei ungünstiger Beladung A treten bei allen Manövern kritische Fahrzeugreaktionen auf. Typ 5 antwortet aufgrund seiner Kinematik und Länge mit stärkeren Fahrzeugreaktionen bei Anregung als ein konventioneller Gliederzug.

Die hinteren Kennzeichnungen der Lang-Lkw wurden bis auf eine Ausnahme entsprechend den Vorschriften umgesetzt. Allerdings zeigte sich, dass Piktogramme einer Schrift zu bevorzugen sind. Hier sollten weitere Untersuchungen vorgenommen werden, wie diese Piktogramme am besten auszugestaltet sind. Hinsichtlich der möglichen Sichtbehinderungen durch Lang-Lkw konnten lediglich Hinweise auf mögliche Situationen ausfindig gemacht werden. Auch hier zeigte sich weiterer Untersuchungsbedarf.

In den Untersuchungen zu Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigte der Lang-Lkw vom Typ 3 eine um rund 15 % bessere Transporteffizienz als ein auf der analysierten Route untersuchten alternativ einsetzbarer Sattelzug. Die Analyse zeigt das mögliche Einsparpotenzial von Lang-Lkw beispielhaft auf, kann jedoch nicht allgemein auf alle Lang-Lkw vom Typ 3 übertragen werden. Die Transporteffizienz von Lang-Lkw kann durch Reduktion von Achsen weiter erhöht werden. Derzeit werden Lang-Lkw jedoch hauptsächlich aus bereits im Fuhrpark vorhandenen Standardkomponenten zusammengesetzt. Bei weiterer Etablierung des Lang-Lkw in Deutschland ist jedoch anzunehmen, dass die Fahrzeuge zunehmend auf ihren Einsatzzweck hin optimiert werden. So werden Lang-Lkw

zunehmend über weniger Achsen verfügen. Lang-Lkw vom Typ 1 bis 4 mit 6 oder 5 Achsen und einer zulässigen Gesamtmasse von 40 t sind im Extremfall denkbar. Die im Rahmen dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse zu Kraftstoffverbrauch, Bremsverzögerung, Kurvenlaufeigenschaften und Fahrdynamik sind besonders vor diesem Hintergrund weiter zu verfolgen.

## 10 Anhang

Fahrzeug	Abmessungen [m]														
	Achsabstände Achse X – Achse Y								Kuppelmaße			$l_{Zges}$	Führungspunkt		
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	$l_{EGa}$	$l_{EGz}$	$l_{EGb}$		$u_{Zv}$	$b_{SS}$	$l_{FP}$
3-1-3	4,70	1,35	4,70	1,40	5,55	1,41	1,31	-	9,38	3,50	12,00	9,80	1,45	2,46	0,22
3-2-3	4,73	1,35	4,78	1,34	5,60	1,41	1,31	-	9,38	3,50	12,00	9,80	1,45	2,46	0,22
3-3-1	3,70	6,10	1,31	1,41	-	-	-	-	4,55	-	13,05	-	1,45	2,46	0,22
3-4-3	4,70	1,35	4,70	1,40	5,70	1,41	1,31	-	9,38	3,50	12,00	9,80	1,45	2,46	0,22
12-1-3	5,70	5,26	1,41	5,66	1,31	1,31	-	-	8,70	4,45	12,00	10,10	1,45	2,46	0,22
12-2-3	5,70	5,26	1,41	5,66	1,31	1,31	-	-	8,70	4,45	12,00	10,15	1,45	2,46	0,22
12-3-3	5,70	5,35	1,41	5,75	1,31	1,31	-	-	8,80	4,45	12,00	10,10	1,45	2,46	0,22
11-1-2	3,50	6,03	1,31	1,31	7,55	1,31	-	-	4,40	11,37	9,48	-	1,47	2,36	0,10
10-1-4	3,60	3,73	2,07	1,78	5,32	1,32	1,42	-	4,60	7,22	11,00	-	1,44	2,36	0,14
10-2-4	3,60	3,71	2,07	1,78	3,40	3,86	1,82	-	4,50	7,22	11,30	-	1,44	2,36	0,14
6-1-2	3,54	5,19	1,31	2,10	7,17	1,41	-	-	4,55	10,82	9,80	-	1,40	2,26	0,10
6-2-2	3,54	5,19	1,31	2,10	7,17	1,41	-	-	4,55	10,82	9,80	-	1,40	2,26	0,10
14-1-3	4,90	1,36	4,78	1,40	5,67	1,31	1,31	-	8,75	4,45	12,00	10,24	1,46	2,36	0,20
14-2-3	4,90	1,36	4,78	1,40	5,67	1,31	1,31	-	8,75	4,45	12,00	10,24	1,46	2,36	0,20
5-1-2	3,70	5,78	1,31	1,31	5,94	1,31	-	-	4,40	11,28	9,52	-	1,40	2,36	0,14
16-1-3	4,80	1,35	4,90	1,40	5,63	1,31	1,31	-	9,70	3,50	12,00	10,04	1,47	2,36	0,10
8-1-3	4,80	1,35	4,50	1,40	5,63	1,31	1,31	-	8,58	4,25	12,00	9,98	1,47	2,36	0,10
18-1-3	4,50	1,35	4,95	1,40	5,60	1,31	1,31	-	9,40	3,50	12,00	9,70	1,47	2,36	0,10
13-1-2	3,70	5,52	1,41	1,31	5,95	1,81	-	-	4,54	10,53	8,19	-	1,36	2,36	0,10
20-1-3	4,80	1,35	4,80	1,40	5,52	1,41	1,31	-	8,70	4,45	12,00	10,79	1,47	2,36	0,10
9-1-3	4,80	1,35	4,65	1,31	7,15	1,81	-	-	9,78	3,50	11,84	10,04	1,47	2,36	0,10
9-2-3	4,90	1,35	4,62	1,31	7,15	1,81	-	-	8,58	4,35	11,84	9,90	1,40	2,36	0,14
7-1-5	5,80	1,41	6,02	4,78	1,35	-	-	-	11,09	-	11,89	11,99	1,40	2,36	0,14
7-2-5	5,80	1,41	6,02	4,78	1,35	-	-	-	11,09	-	11,89	11,99	1,40	2,36	0,14
7-3-5	5,80	1,41	6,02	4,78	1,35	-	-	-	11,09	-	11,89	11,99	1,40	2,36	0,14
19-1-3	4,80	1,32	4,65	1,41	5,50	1,41	1,31	-	8,95	4,15	12,00	10,10	1,47	2,36	0,10
19-2-3	4,80	1,32	4,65	1,41	5,50	1,41	1,31	-	8,95	4,15	12,00	10,10	1,47	2,36	0,10
4-1-3	1,79	3,50	1,35	3,88	1,31	5,55	1,43	1,33	8,84	3,50	10,86	9,45	1,47	2,36	0,10
4-2-3	4,80	1,36	4,65	1,32	5,58	1,41	1,31	-	9,45	3,50	12,00	9,65	1,47	2,36	0,10
4-3-3	3,70	1,42	1,35	4,75	1,31	5,50	1,42	1,31	9,85	3,50	11,42	10,07	1,47	2,36	0,10
2-1-3	4,90	1,35	4,53	1,41	5,54	1,31	1,31	--	8,55	4,25	12,00	10,05	1,40	2,36	0,14
2-2-3	4,90	1,35	4,53	1,41	5,54	1,31	1,31	-	8,55	4,25	12,00	10,05	1,40	2,36	0,14
2-3-3	4,90	1,35	4,70	1,20	5,79	1,31	1,31	-	9,19	3,80	11,94	10,21	1,44	2,36	0,14
15-1-3	4,50	1,35	5,03	1,41	6,42	1,31	-	-	9,33	3,70	12,00	9,52	1,47	2,36	0,10
1-1-3	4,50	1,35	5,10	1,40	6,65	1,31	1,31	-	8,75	4,25	12,00	10,24	1,40	2,36	0,20
1-2-3	4,60	1,35	5,10	1,40	6,65	1,31	1,31	-	8,75	4,25	12,00	10,24	1,40	2,36	0,20
1-3-3	4,60	1,35	5,10	1,40	6,65	1,31	1,31	-	8,75	4,25	12,00	10,24	1,40	2,36	0,20
17-1-3	4,80	1,35	4,35	1,41	5,50	1,41	1,31	-	8,65	4,15	12,00	10,04	1,47	2,36	0,10

Tab. 5 Abmessungen der Lang-Lkw im Feldversuch

Variable	Einheit	Beschreibung
$l_{EGa}$	m	Kuppellänge (a) des Zugfahrzeugs nach 96/53/EG
$l_{EGb}$	m	Kuppellänge (b) des Anhängers nach 96/53/EG
$l_{EGz}$	m	Wischenmaß, Abstand Mitte Königszapfen zu Mitte Kupplungsbolzen
$l_{Zges}$	m	Gesamtlänge des Zugfahrzeugs
$u_{Zv}$	m	Überhang bis zur vordersten Begrenzung des Zugfahrzeugs
$b_{SS}$	m	Breite der vorderen Stoßstange am Führungspunkt
$l_{FP}$	m	Längsabstand des Führungspunktes von der vorderen Fahrzeugbegrenzung

Tab. 6 Erläuterungen zu Tab. 5

## 11 Literatur

- ACEA WORKING GROUP HDEI/BCEI: FMS-Standard description. Version 3. Abrufbar unter: [http://www.fms-standard.com/Truck/download/fms\\_document\\_ver03\\_ers\\_14\\_09\\_2012.pdf](http://www.fms-standard.com/Truck/download/fms_document_ver03_ers_14_09_2012.pdf). 2012.
- ALLGEMEINER DEUTSCHER FAHRRAD-CLUB E. V.: Verkehrssicherheit - Seitliche Sicherheitsabstände. 2013. Abrufbar unter: <http://www.adfc.de/Verkehr--Recht/Sicher- unterwegs/Seitenabstaende/Seitliche- Sicherheitsabstaende>.
- APS E.V. Abrufbar unter: Webseite des Allianz pro Schiene e.V. "No Mega Trucks" (letzter Abruf: 23.11.2012).
- BENDEL, W; PFLUG, H.-C; SCHOCH, D. u. SCHRÖTER, H.: Endbericht zum Pilotversuch „Ecocombi“. Stuttgart. 2009.
- BRAUN, H. u. H. Konitzer (Hrsg.): StVZO Straßen-Verkehrs-Zulassungsordnung mit Erläuterung. Grundwerk mit 50. Ergänzungslieferung. ISBN 978-3-7812-1750-8. (Kirschbaum) Bonn. 2012.
- BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN: Leitfaden - Feldversuch mit Lang-Lkw. Abrufbar unter: [http://www.bast.de/cIn\\_030/nn\\_42254/DE/Aufgaben/abteilung-v/referat-v1/lang-lkw/leitfaden-neu,templateld=raw,property=publicationFile.pdf/leitfaden-neu.pdf](http://www.bast.de/cIn_030/nn_42254/DE/Aufgaben/abteilung-v/referat-v1/lang-lkw/leitfaden-neu,templateld=raw,property=publicationFile.pdf/leitfaden-neu.pdf) (letzter Abruf: 26.06.2013). 2013.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: Verordnung über Ausnahmen von straßenverkehrsrechtlichen Vorschriften für Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge. LKWÜberlStVAusnV. 2011.
- DENIMAL, P; SCHALLER, K. V; SASSE, U; TIETZE, R. u. A. Süßmann: Konzept zur erhöhten Transporteffizienz für 40-Tonner. In: Automobiltechnische Zeitschrift H. 12. S. 60–65. 2012.
- D-TEC: Combidolly. Datenblatt des B-Double, CTD-41-03D. Kesteren, NL. 2010.
- FAHRZEUGWERK BERNARD KRONE GMBH: Nie wieder Übergewicht. Die neue DWC Stützlastreduzierung. Werlthe. 2009.
- FAHRZEUGWERK BERNARD KRONE GMBH: DWC. Dynamic Wheel Base Control. 2013. Abrufbar unter: <http://www.krone-trailer.com/produkte/dwc/dwc/> (letzter Abruf: 23.05.2013).
- FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E.V.: FAT Schriftenreihe 220. Fahrdynamische Analyse innovativer Nutzfahrzeugkonzepte (letzter Abruf: 04.09.2013). 2008.
- FRIEDRICH, B; HOFFMANN, S. u. BRÄCKELMANN, F.: Auswertung des niedersächsischen Modellversuchs zum Einsatz von „GigaLinern“. Schlussbericht. 2007.
- GLAESER, K.-P.: Auswirkungen von neuen Fahrzeugkonzepten auf die Infrastruktur des Bundesfernstraßennetzes. Schlussbericht November 2006 (letzter Abruf: 19.03.2013). 2006.
- GLAESER, K.-P.: Auswirkungen von neuen Fahrzeugkonzepten. Schlussbericht (letzter Abruf: 19.03.2013). 2008.
- HEIßING, B.: Fahrwerkhandbuch. Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven. Praxis ATZ/MTZ-Fachbuch. (Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden) Wiesbaden. 2011.
- HOEPKE, E. (Hrsg.): Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten. ISBN 9783834809957. (Vieweg + Teubner) Wiesbaden. 2010.
- ISIKLAR, G.: Simulation of complex articulated commercial vehicles for different driving manoeuvres. Master's thesis. TU Eindhoven (letzter Abruf: 13.09.2013). 2007.
- KNIGHT, I; ROBINSON, T; ROBINSON, B; BARLOW, T. u. MCCRAE, T.: The likely effects of permitting longer semi-trailers in the UK: vehicle specification performance and safety. 2010.
- KRAFTFAHRZEUG-ÜBERWACHUNGSORGANISATION FREIBERUFLICHER KFZ-SACHVERSTÄNDIGER E.V.: Vorschriften zu § 30 StVZO. Zulässige Messwert-Abweichungen bei Fahrzeugprüfungen (Toleranzkatalog). Losheim am See. 2004.
- KURAL, K; BESSELINK, I; PAUWELUSSEN, J. u. Nijmeijer H.: Assessment of Dutch Longer and Heavier Vehicles with a performance based approach and its applicability to Europe (letzter Abruf: 19.03.2013). 2012.
- LEYENDECKER, J.: Feldversuch mit Lang-Lkw. Email. Bonn. 2012.
- LUIJTEN, M. F. J.: Lateral Dynamic Behaviour of Articulated Commercial Vehicles. Master's Thesis. Eindhoven University of Technology. 2010.

---

MESCHIK, M.: Simulation von Schleppkurven verschiedener Fahrzeuge. In: MARX, E. Mitteilungen des Institutes für Verkehrswesen der Universität für Bodenkultur. Wien. 1992.

**NORMUNGSAUSSCHUSS**

AUTOMOBILTECHNIK: Straßenfahrzeuge – Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen – Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug H. 15008. 2011.

PACEJKA, H. B.: Tyre and vehicle dynamics. 2005.

QUEENSLAND TRANSPORT: Cycling and heavy vehicles. Abrufbar unter: [www.transport.qld.gov.au/cycling](http://www.transport.qld.gov.au/cycling). 2006.

RUCK, B.: Homepage des Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Karlsruher Institut für Technologie. 2013. Abrufbar unter: <http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/science/aerodyn/pub18.htm> (letzter Abruf: 01.09.2013).

VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE: Fakten und Argumente zum Öko-Laster. Wachsender Güterverkehr sichert Wohlstand und Arbeitsplätze. 2008. Abrufbar unter: <http://www.vda.de/de/meldungen/hintergruende/index.html>.

WABCO HOLDINGS INC.: TEBS E2.5 Systembeschreibung (letzter Abruf: 02.07.2013). 2012.

WANGRIN, G; STÜRMER, B. u. WÖHRMANN, M.: Abschlussbericht NRW Modellversuch. Technische Erprobung von Fahrzeugkombinationen mit einer Gesamtlänge bis 25,25m ("Gigaliner"). 2009.

WEINHOEPEL GMBH: KIMAX Achslast Messgeräte. 2012. Abrufbar unter: <http://www.weinhoepfel.de/kimax.html> (letzter Abruf: 01.09.2013).