

**Abschlussbericht**

Forschungsprojekt FE 82.0630/2015

## **Fahrzeugtechnische Eigenschaften von Lang-Lkw**

Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen

Dipl.-Ing. Armin Förg  
Dipl.-Ing. Alexander Süßmann  
Dipl.-Ing. Andreas Wenzelis  
Dipl.-Ing. Simon Schmeiler

31. August 2016

Förg & Süßmann Ingenieurbüro GbR  
Ebenauer Str. 5  
80637 München



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Übergeordnete Problemstellung und Zielsetzung.....</b>	<b>2</b>		
<b>2</b>	<b>AP1 - Fahrzeugdokumentation .....</b>	<b>3</b>		
2.1	Problemstellung und Zielsetzung .....	3		
2.2	Methodisches Vorgehen in Datenverarbeitung und -erhebung .....	4		
2.3	Fahrzeugdatenbank .....	5		
2.4	Fahrzeugkombinationstypen und Aufteilung im Feldversuch .....	5		
2.5	Technische Anforderungen .....	9		
2.5.1	Spurhalteleuchten .....	9		
2.5.2	Luftfederung .....	9		
2.5.3	Differenzialsperre und Antriebsschlupfregelung .....	9		
2.5.4	Elektronisch gesteuertes Bremssystem .....	10		
2.5.5	Scheibenbremsen und Retarder .....	10		
2.5.6	Achslastüberwachung .....	10		
2.5.7	Spurhaltewarnsystem.....	11		
2.5.8	Elektronisches Fahrdynamikregelsystem .....	11		
2.5.9	Abstandsregelsystem und Notbremsassistenzsistem .....	12		
2.5.10	Rückspiegel.....	12		
2.5.11	Kamera-Monitor-System .....	12		
2.5.12	Konturmarkierungen des Lang-Lkw ..	14		
2.5.13	Heckkennzeichnung des Lang-Lkw ..	14		
2.5.14	Digitales EG-Kontrollgerät.....	15		
2.6	Weitere Fahrzeugeigenschaften .....	15		
2.6.1	Kombinierter Verkehr .....	15		
2.6.2	Kurvenlaufeigenschaften.....	16		
<b>3</b>	<b>AP2 - Bremsversuche .....</b>	<b>17</b>		
3.1	Problemstellung und Zielsetzung .....	17		
3.2	Stand der Wissenschaft und Technik.....	17		
3.2.1	Fahrzeugtechnik.....	17		
3.2.2	Vergleichbare Untersuchungen .....	18		
3.3	Methodisches Vorgehen.....	18		
3.3.1	Fahrzeuge .....	18		
3.3.2	Messaufbau und Testgelände.....	19		
3.4	Ergebnisse .....	20		
3.4.1	Lang-Lkw vom Typ 2 versus Sattelkraftfahrzeug .....	20		
3.4.2	Lang-Lkw vom Typ 3 versus Sattelkraftfahrzeug.....	21		
3.4.3	Lang-Lkw vom Typ 3 mit verminderter Achszahl versus Sattelkraftfahrzeug	21		
3.4.4	Diskussion.....	21		
<b>4</b>	<b>AP3 - Ermittlung zur Wirksamkeit von EVSC in allen Fahrzeugen der Kombination .....</b>	<b>24</b>		
4.1	Problemstellung und Zielsetzung.....	24		
4.2	Stand der Wissenschaft und Technik .....	24		
4.2.1	Rechtliches zur Typgenehmigung von neuen Typen von Fahrzeugen und von neuen Fahrzeugen.....	24		
4.2.2	Bewertung der fahrdynamischen Stabilität von Nutzfahrzeugen.....	26		
4.3	Methodisches Vorgehen .....	28		
4.4	Ergebnisse .....	28		
4.4.1	Experteninterview .....	28		
4.4.2	Zusammenfassung und Bewertung..	31		
<b>5</b>	<b>AP4 - Änderungsvorschläge zu den fahrzeugtechnischen Anforderungen und deren Dokumentation .....</b>	<b>35</b>		
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>38</b>		
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>39</b>		

## 1 Übergeordnete Problemstellung und Zielsetzung

Seit dem 1. Januar 2012 wird in Deutschland unter Federführung des Bundesverkehrsministeriums (BMVI) ein Feldversuch mit Lang-Lkw durchgeführt. Die Verordnung über Ausnahmen von straßenverkehrsrechtlichen Vorschriften für Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge (LKWÜberlStVAusnV vom 19.12.2011) regelt hierbei die Vorgaben, definiert gültige Kombinationstypen und schreibt technische Anforderungen für die im Feldversuch teilnehmenden Lang-Lkw vor. Die technischen Anforderungen bieten teilweise alternativ wählbare, teilweise frei gestaltbare Ausführungsmöglichkeiten.

Ein Ziel dieser Studie ist die Erstellung bzw. Erweiterung einer technischen Dokumentation der am Feldversuch teilnehmenden Lang-Lkw und wie technische Anforderungen jeweils umgesetzt wurden. Basis der Dokumentation bilden die Ergebnisse der im Januar 2014 veröffentlichten Studie „Lang-Lkw: Auswirkungen auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt“ (Süßmann et al. 2014). Diese wertete den zum Stichtag 15. Juli 2013 gemeldeten Bestand an am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge aus (43 Lang-Lkw von 23 Speditionen). Gegenstand der Auswertung bildeten unter anderem die

- Aufteilung der Lang-Lkw in Kombinationstypen, sowie
- die Umsetzung der in § 5 LKWÜberlStVAusnV vorgeschriebenen, teilweise alternativen technischen Anforderungen.

Arbeitspaket 1 (AP1) dieser Studie befasst sich mit der Aktualisierung und Erweiterung der technischen Dokumentation der am Feldversuch teilnehmenden Lang-Lkw und ermöglicht Auswertungen hinsichtlich der Ausführung der Forderungen beispielsweise nach:

- Kamera-Monitor-Systemen
- Kenntlichmachen des Lang-Lkw durch rückwärtiges Schild und andere Darstellungsformen
- möglichem Einsatz im Kombinierten Verkehr
- Achslastmessung
- Differenzialsperre oder Antriebsschlupfregelung

Arbeitspaket 2 (AP2) dieser Studie untersucht die Bremswege von Lang-Lkw im Vergleich zu Lkw herkömmlicher Bauart. In (Süßmann et al. 2014) wurden bereits Bremsversuche hierzu durchge-

führt, wobei sowohl der untersuchte Lang-Lkw als auch das Sattelkraftfahrzeug herkömmlicher Bauart auf ihr maximales zulässiges Gesamtgewicht von 40 Tonnen ausgeladen waren („worst case“-Szenario, ohne Betrachtung maximal zulässiger 44t im Kombinierten Verkehr nach § 34 Abs. 6 Nr. 6 StVZO). Im Unterschied hierzu werden im Rahmen dieser Studie Bremsversuche mit der gleichen Ladungsdichte durchgeführt, welche sich jeweils aus den maximalen Beladungen von Lang-Lkw auf 40 Tonnen ergeben. Hierbei erfahren konventionelle Sattelkraftfahrzeuge eine volumetrische Auslastung, ohne dass ihr zulässiges Gesamtgewicht erreicht wird („Substitutions“-Szenario). Untersuchungsgegenstand bilden die beiden am häufigsten im Feldversuch vorkommenden Kombinationstypen mit üblicher Achsanzahl (54 % Typ 3 davon 49 % 8-achsig; 29 % Typ 2 davon 67 % 7-achsig) sowie einer dieser Kombinationstypen mit minimal vorkommender Achsanzahl (Typ 3 6-achsig). Die Bremswege werden mit den durch die Lang-Lkw jeweils ersetzen Sattelkraftfahrzeuge herkömmlicher Bauart („äquivalente“ Lkw) verglichen.

Arbeitspaket 3 (AP3) befasst sich mit der Ermittlung der Wirksamkeit von elektronischen Fahr-dynamikregelsystemen (Electronic Vehicle Stability Control, EVSC) bei Lang-Lkw. Es wird untersucht, ob das EVSC in den verschiedenen Lang-Lkw-Typen bei kritischen Fahrmanövern an allen Fahrzeugteilen der Kombinationen so arbeitet, dass Schleudervorgänge oder Überrollen sicher verhindert werden. Die Untersuchung wird mittels Recherchen und Fachgesprächen mit Zulieferern und Herstellern durchgeführt. Hierzu wird im ersten Schritt der Stand der Technik der eingesetzten EVSC-Systeme anhand von Publikationen ermittelt. Anhand des Standes der Technik wird ergänzt durch Expertengespräche mit Herstellern von EVSC-Systemen für Lang-Lkw eine Bewertung abgeleitet, die den bisherigen EVSC-Absicherungsprozess bei Lang-Lkw beurteilt und mögliche Handlungsempfehlungen für zusätzliche Absicherungsmaßnahmen identifiziert.

Die Studie schließt mit einer Ergebniszusammenfassung aus den vorherigen Arbeitspaketen und der Ableitung von Änderungsvorschlägen zu den fahrzeugtechnischen Anforderungen an Lang-Lkw.

## 2 AP1 - Fahrzeugdokumentation

Nach Darlegung der zugrundeliegenden Problemstellung, der Entwicklung des Teilnehmerumfangs am Lang-Lkw-Feldversuch und der abgeleiteten Zielsetzung (2.1), wird das methodische Vorgehen in dieser Studie erläutert. Hierbei wird insbesondere auf die zur Verfügung gestellten Informationen und die notwendige, erweiterte Datenakquise eingegangen (2.2). Anschließend wird die Fahrzeugdatenbank als zentrales Ergebnisobjekt dieser Studie vorgestellt und deren struktureller Aufbau erläutert (2.3). Abschließend erfolgen die Vorstellung der zulässigen Typen von Lang-Lkw und die Auswertung der typenmäßigen Aufteilung (Bild 4), sowie eine aggregierte Auswertung der Umsetzung aller technischen Anforderungen.

### 2.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die LKWÜberStVAusV eröffnet den Betreibern eine freie Wahl zwischen fünf verschiedenen Lang-Lkw-Typen (Bild 3) und die zum Teil generische Formulierung der technischen Anforderungen lässt für Fahrzeughersteller und Betreiber einen Interpretationsraum alternativer Umsetzungsmöglichkeiten.

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Feldversuchs erscheint es daher untersuchenswert, welche Typen von Lang-Lkw von Betreibern eingesetzt werden, wie die technischen Anforderungen der LKWÜberStVAusV tatsächlich umgesetzt sind und insbesondere, ob eine etwaige dem Wortlaut des Gesetzes entsprechende Umsetzung auch die gewünschten Eigenschaften im Sinne der LKWÜberStVAusV sicherstellt.

Die Untersuchung und Fahrzeugdokumentation (Fahrzeugdatenbank, siehe 2.3) sowie die aggregierte Auswertung orientiert sich an der direkten Vorgängerstudie (Süßmann et al. 2014) um die Vergleichbarkeit dieser kontinuierlich fortgesetzten Studie zu gewährleisten.

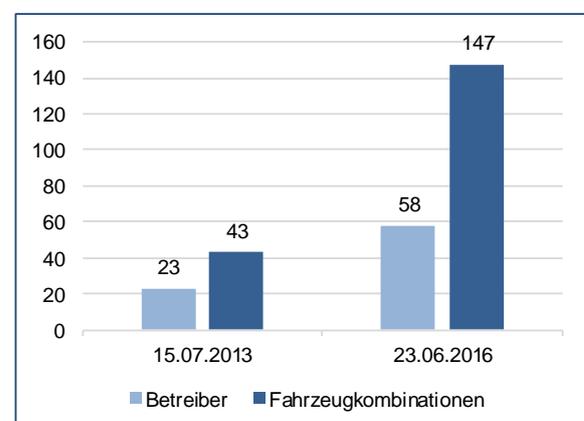
Eine Aktualisierung der Fahrzeugdokumentation der Vorgängerstudie erscheint in der Abschlussphase des Feldversuchs insbesondere aufgrund des enorm veränderten Teilnehmerkreises zwingend notwendig: Die Vorgängerstudie dokumentierte 23 Betreiber mit in Summe 43 Lang-Lkw (Stand 15.07.2013), wobei sich Betreiber und Lang-Lkw mit aktuell (Stand 23.06.2016) 58 Betreibern und 147 Lang-Lkw in der Zwischenzeit vervielfachten (Bild 1, Bild 2).

Ziel dieses Arbeitspaketes ist somit die Erstellung einer zusammenfassenden Dokumentation aller am Feldversuch teilnehmenden Lang-Lkw und die



**Bild 1** Anmeldungen zum Feldversuch bis 23.06.2016 (Quelle: BASt Homepage, www.bast.de)

Ermöglichung einer aggregierten Sicht auf die verschiedenen Kombinationstypen sowie die Umsetzung technischer Anforderungen. Eine detaillierte Beschreibung der tabellierten Daten erfolgt im Rahmen der Vorstellung der Fahrzeugdatenbank (2.3).



**Bild 2** Vervielfachung der Anzahl an Betreibern und Fahrzeugkombinationen am Lang-Lkw-Feldversuch

## 2.2 Methodisches Vorgehen in Datenverarbeitung und -erhebung

Das methodische Vorgehen im Rahmen dieser Studie umfasst die Sichtung aller zur Verfügung gestellten Daten, die Prüfung auf Vollständigkeit und eine erweiterte Datenerhebung für eine vollständige Überführbarkeit in eine Fahrzeugdatenbank. Die erweiterte Datenerhebung umfasst das Nachfordern von Dokumenten bei der BAST, das Nachfassen bei einzelnen Betreibern zur Klärung von Unklarheiten und Fehlern in der Dokumentation sowie die Durchführung einer Fragebogenaktion bei allen 58 teilnehmenden Speditionen zur Aufnahme von Detailinformationen in Bezug auf die Umsetzung der technischen Anforderungen in § 5 LKWÜberStVAusV.

Folgende Daten wurden seitens des Auftraggebers zur Verfügung gestellt:

- Fahrzeugdatenbank der Vorgängerstudie (Süßmann et al. 2014)
- Gemeldete Lang-Lkw je Spedition aus der Anlage zur Meldebestätigung nach § 12 LKWÜberStVAusV
- Kopien der Zulassungsbescheinigungen Teil I je Fahrzeugmodul aller Lang-Lkw
- Übereinstimmungsnachweise je Spedition (gemäß § 7 LKWÜberStVAusV)

Die Fahrzeugdatenbank der Vorgängerstudie wird in dieser Studie zum Zwecke der Vergleichbarkeit als Orientierung genutzt und in strukturell gleicher Form weitergeführt.

Die Meldebestätigungen führen alle gemeldeten Lang-Lkw sowie deren einzelne Fahrzeugmodule je Spedition auf. Aufgrund ihrer fortlaufenden Aktualisierung dienen sie in erster Linie zur Vollständigkeitsüberprüfung der Datenbank. Außerdem erlauben die Meldebestätigungen die Identifikation nicht mehr relevanter Übereinstimmungsnachweise, z. B. aufgrund von zwischenzeitlichen Abmeldungen.

Der Zulassungsbescheinigung Teil I werden folgende Daten zu den Fahrzeugmodulen entnommen:

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

Die Übereinstimmungsnachweise nach § 7 sind die zentrale Informationsquelle für die Fahrzeugdoku-

mentation. Hieraus können folgende Informationen entnommen werden:

- Typ der Fahrzeugkombination
- Hersteller und Typ der Fahrzeugmodule
- Achsabstände in der Fahrzeugkombination
- Lenkbarkeit einzelner Achsen
- Liftbarkeit einzelner Achsen
- Angaben zum Kurvenlaufverhalten des Lang-Lkw sowie Bestätigung der Einhaltung nach § 32d StVZO
- Angaben zur Erfüllung und Umsetzung der in § 5 LKWÜberStVAusV geforderten technischen Anforderungen
- Bestätigung der Baugleichheit einzelner Fahrzeugmodule hinsichtlich relevanter technischer Eigenschaften
- Bestätigung der wahlweisen Verwendbarkeit baugleicher Fahrzeugmodule
- Bestätigung der wahlweisen Zusammensetzung von Lang-Lkw nach definierten Mustern (Baugleichheit der Lang-Lkw in Bezug auf Gesamtlänge, Achszahl, Achsabstände, Lenk- und Liftbarkeit der Achsen)

Um die aggregierte Auswertung aller im Rahmen dieser Studie geforderten Fahrzeugeigenschaften zu ermöglichen, wurde eine eigene Datenerhebung in Form eines Fragebogens durchgeführt. Der Fragebogen ist Lang-Lkw-Typ-spezifisch angepasst und muss je Spedition und eingesetztem, baugleichen Typ einmal vervollständigt werden.

Folgende Aspekte werden abgefragt:

- Berücksichtigung der Vorderachslast der Sattelzugmaschine bei der Bestimmung der Zuggesamtmasse
- Ableseort der Achslasten der einzelnen Fahrzeugmodule
- Zeitlicher Aufwand zur Bestimmung der Lang-Lkw-Gesamtmasse
- Ort der Kameraanzeige des Kamera-Monitor-Systems und Exklusivität der Anzeige auf einem Monitor
- Größe des Monitors für die Anzeige des rückwärtigen Kamerabildes
- Ort der Anbringung der rückwärtigen Kamera
- Verschmutzungsanfälligkeit der Kamera

- Nutzung und Mehrwert des Kamera-Monitor-Systems zur Beobachtung des rückwärtigen Verkehrs
- Nutzung und Mehrwert des Kamera-Monitor-Systems als Rückfahrlilfe
- Kennzeichnung des Lang-Lkw durch Standardschild oder zusätzliche Kennzeichnungen
- Tauglichkeit für den Kombinierten Verkehr durch Container-Verriegelungen (Twistlocks)
- Tauglichkeit für den Kombinierten Verkehr durch Krantaschen für die Bahnverladung
- Kupplungsart zum Anhänger (hoch- oder tiefgekuppelt)
- Daten zu allen Zugfahrzeugen (Hersteller, Modell, amtliches Kennzeichen, Leistung, Schadstoffklasse, Achszahlen, Gewichte und Achslasten)
- Daten zu allen Untersetzachsen und Anhängern (Hersteller, amtliches Kennzeichen, Achszahlen, Gewichte und Achslasten, Kupplungsart)

Die Rücklaufquote der Fragebögen beträgt 95 % (63 von 66), womit 97 % aller teilnehmenden Fahrzeugkombinationen (143 von 147) erfasst wurden (Stand 23.06.2016).

## 2.3 Fahrzeugdatenbank

Die Fahrzeugdatenbank der Vorgängerstudie dient als strukturelle Vorgabe für die Weiterführung und Aktualisierung im Rahmen dieser Studie.

Alle am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeugkombinationen werden zeilenweise tabelliert und nach folgenden Merkmalen gruppiert aufgegliedert:

- Betreiber
- Lang-Lkw-Typ
- Ausprägung der Umsetzung aller technischen Anforderungen gemäß § 5 LKWÜberlStVAusnV
- Einsatztauglichkeit für den Kombinierten Verkehr gemäß § 6 LKWÜberlStVAusnV und Mittel zur Tauglichkeit
- Gesamtlänge des Lang-Lkw
- Gesamtachszahl des Lang-Lkw
- Lenkbarkeit der Achsen
- Lenkbarkeit der Dollyachsen (nur Typ-3-Lang-Lkw)
- Liftbarkeit der Achsen
- Bereifung aller Achsen
- Achsabstände beim Lang-Lkw
- Daten zum Kurvenlaufverhalten (Außenradius, Kreisfahrt, Ringflächenbreite, Ausschermmaß, Erfüllung § 32d StVZO)

Sollte ein Übereinstimmungsnachweis eine wahlweise Zusammenstellung verschiedener Lang-Lkw zulassen, die in zentralen Gesamtfahrzeugeigenschaften nicht datengleich sind (z. B. unterschiedliche Gesamtachszahl durch alternative Sattelanhänger), so werden diese Varianten in der Datenbank mit „b“ gekennzeichnet, wohingegen alle anderen Fahrzeugkombinationen mit „a“ gekennzeichnet sind. Die Summe aller „a“-Varianten entspricht damit genau allen theoretisch gleichzeitig fahrenden Lang-Lkw (ohne Mehrfachverwendung derselben Fahrzeugmodule). Diese Zahl ist identisch mit der aktuellen Meldezahl der BAST von 147 Lang-Lkw (Stand 23.06.2016, Bild 1). Daneben listet die Datenbank aktuell 7 „b“-Varianten auf (Stand 21.03.2016), davon weisen 4 eine unterschiedliche Achszahl gegenüber ihrer korrespondierenden „a“-Variante auf, wobei als „a“-Variante jeweils der Lang-Lkw mit der geringeren Gesamtachszahl definiert wurde. In der Statistik über die Gesamtachszahlen wirkt sich dies durch +/- 1 Lang-Lkw bei 6/7-Achsern, +/- 2 Lang-Lkw bei 7/8-Achsern und +/- 1 Lang-Lkw bei 8/9-Achsern aus.

## 2.4 Fahrzeugkombinationstypen und Aufteilung im Feldversuch

Die LKWÜberlStVAusnV erlaubt fünf unterschiedliche Typen von Lang-Lkw (Bild 3). Im Unterschied zu § 32a der StVZO dürfen Lastkraftfahrzeuge zwei Anhänger in Form einer Untersetzachse und einem Sattelanhänger mitführen (Typ 3). Damit wird eine maximale Gesamtlänge der Fahrzeugkombination von 25,25 Meter ermöglicht. Möglich sind jedoch auch Lastkraftwagen mit einem Anhänger bis zu einer Gesamtlänge von 24,00 Meter (Typ 5), was einem „verlängerten“ Gliederzug entspricht. Weiterhin erlaubt die Verordnung einen weiteren Anhänger hinter einem Sattelkraftfahrzeug in Form eines Zentralachsanhängers (Typ 2) oder in Form eines weiteren Sattelanhängers (Typ 4, „B-Double“). Die vor dem Feldversuch zum Teil bereits per Ausnahmegenehmigung eingesetzten Sattelkraftfahrzeuge mit dem „Verlängerter-Anhänger-Konzept“ sind nun als zusätzliche Kombinationsart mit einer Gesamtlänge von 17,80 Meter anstatt der herkömmlichen 16,50 Meter in die Ausnahmeverordnung integriert (Typ 1).

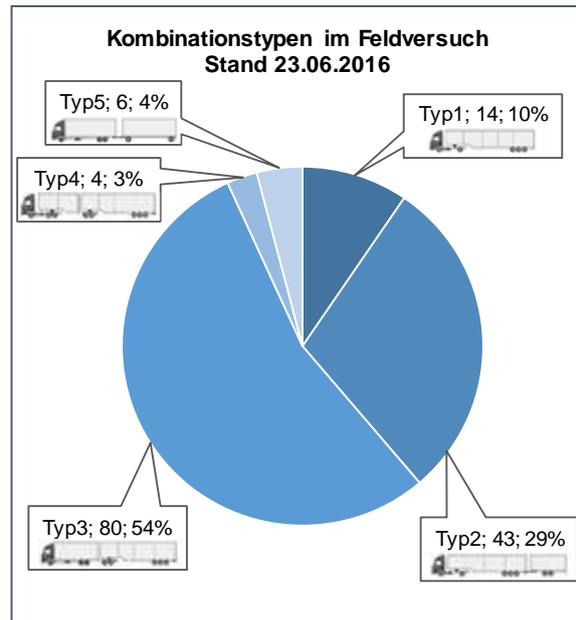


**Bild 3** Mögliche Kombinationstypen nach § 5 LKW-ÜberStV-AusN und jeweilige Gesamtlänge

Die Aufteilung der am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeugkombinationen auf Lang-Lkw-Typen (Bild 4) weist mit 54 % und 80 fahrenden Kombinationen eine starke Tendenz zum Kombinationstyp 3 auf. Mit 29 % und 43 Fahrzeugkombinationen ist Typ 2 der zweithäufigste Kombinationstyp. Typ 2 und 3 stellen mit insgesamt 123 von 147 Fahrzeugkombinationen (84 %) somit die Standardkombinationen im Lang-Lkw-Feldversuch dar.

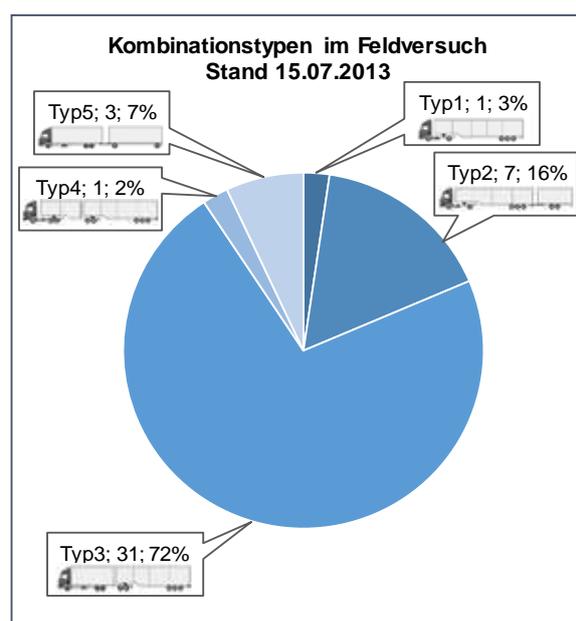
Die Gründe für die Wahl des Lang-Lkw-Typs sind meist individuell von den bereits im Fuhrpark befindlichen Fahrzeugmodulen und geplanten Investitionen abhängig, um die Modularität im Fuhrpark zu erhalten. Darüber hinaus ist die Wahl von stark subjektiven Einschätzungen der erwarteten Fahrzeugeigenschaften geprägt.

So wurden für die Wahl des dominierenden Typ 3-Lang-Lkw häufig besonders gute Eigenschaften bei Kurvenläufigkeit, Fahrstabilität, Handling und Rangierfähigkeit genannt. Die notwendige Investition in eine Untersetzachse („Dolly“) wird hierbei abgewogen, stellt für die meisten Speditionen jedoch kein wirtschaftliches Ausschlusskriterium dar.



**Bild 4** Aufteilung der angemeldeten Fahrzeugkombinationen auf Kombinationstypen (23.06.2016)

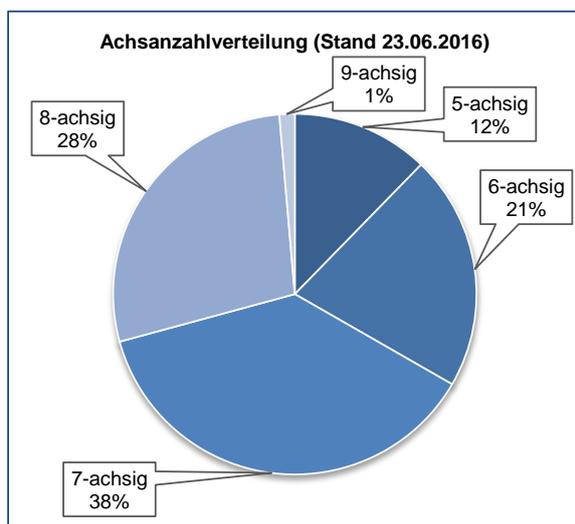
Beim zweithäufigsten Typ 2-Lang-Lkw wird ebenfalls die gute Modularität als wichtiges Entscheidungsmerkmal genannt, die fehlende Ausstattung von Standard-Sattelanhängern im Fuhrpark mit einer zusätzlichen Anhängerkupplung stellt jedoch für einige einen Nachteil dar. Dennoch nahm der Anteil der Typ 2-Lang-Lkw im Verlauf des Feldversuchs von 16 % mit 7 Einheiten (15.07.2013) auf 29 % mit 43 Einheiten (23.06.2016) stark zu (vergleiche Bild 4 und Bild 5).



**Bild 5** Aufteilung der angemeldeten Fahrzeugkombinationen auf Kombinationstypen (15.07.2013)

Die Fahrzeugkombinationen vom Typ 1 (14; 10 %), Typ 5 (6, 4 %) und Typ 4 (4, 3 %) stellen insbesondere durch die Verwendung weniger verbreiteter Fahrzeugmodule mit entsprechend mangelhafter Kompatibilität zum bestehenden Fuhrpark weiterhin die Minderheit der gewählten Kombinationstypen dar.

Aufgrund der in den Übereinstimmungsnachweisen zulässigen wahlweisen Konfiguration unterschiedlicher Lang-Lkw, können Fahrzeugmodule unterschiedlicher Achszahl kombiniert werden, wodurch sich unterschiedliche Gesamtachszahlen ergeben (Bild 6). Unabhängig vom jeweiligen Typ sind die meisten Lang-Lkw 7-achsig (38 %) oder 8-achsig (28 %). Fahrzeuge mit 9 Achsen (1 %) stellen eine Ausnahme einer Spedition dar, die 2 Lang-Lkw mit 4-achsigen Zugmaschinen betreibt. Der Anteil der Fahrzeuge mit nur 5 oder 6 Achsen hat im Verlauf

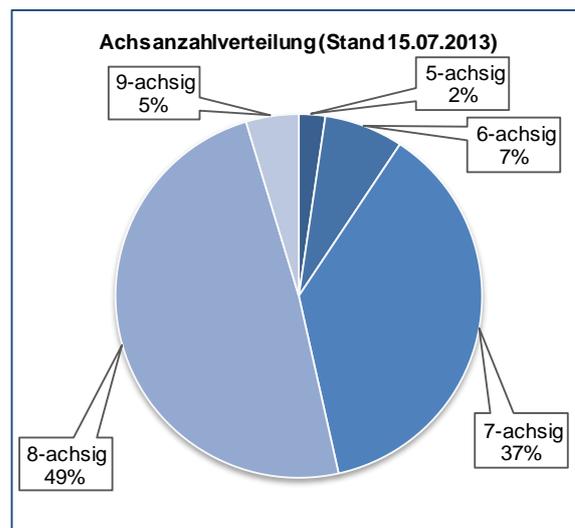


**Bild 6** Verteilung der Achszahlen der Lang-Lkw-Züge im Feldversuch (Stand 23.06.2016)

des Feldversuchs zugenommen, sodass sich ein leichter Trend zu insgesamt geringeren Achszahlen verzeichnen lässt (vgl. Bild 6 und Bild 7).

Auch innerhalb eines Lang-Lkw-Typs können die Achszahlen durch die Kombinationsmöglichkeiten von Fahrzeugmodulen unterschiedlicher Achszahl variieren (Bild 8, Bild 9, Bild 10, Bild 11, Bild 12).

Während alle Typ-1-Lang-Lkw stets 5-achsig sind (Bild 8, 2-achsige Sattelzugmaschine + 3-achsiger



**Bild 7** Verteilung der Achszahlen der Lang-Lkw-Züge im Feldversuch (Stand 15.07.2013)

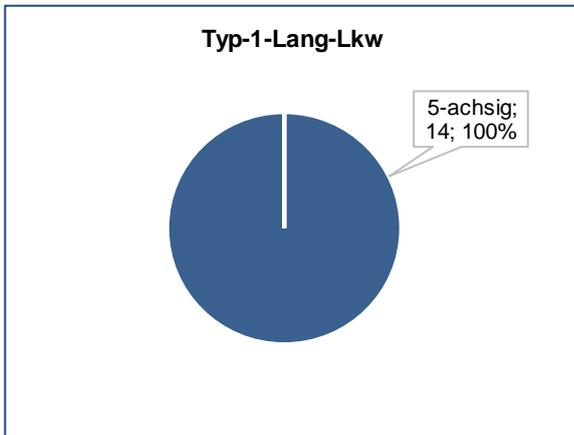
Sattelanhänger), streut die Gesamtachszahl der anderen Typen von 5 bis 9 Achsen.

Typ 2-Lang-Lkw sind überwiegend 7-achsig und bestehen typischerweise aus: 2-achsige Sattelzugmaschine + 3-achsiger Sattelanhänger + 2-achsiger Zentralachsenanhänger (Bild 9). Es existieren jedoch auch Typ 2-Lang-Lkw mit einer verminderten Achszahl von 5 und 6.

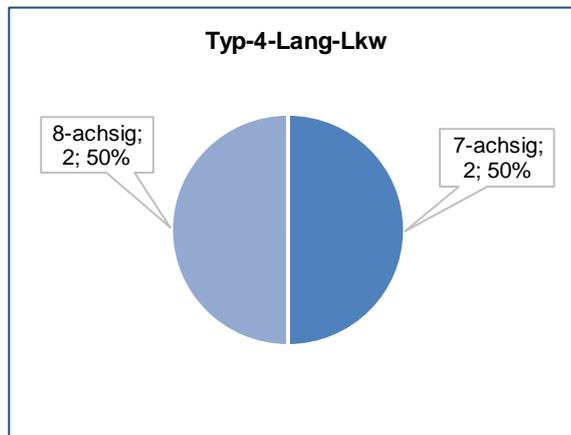
Typ 3-Lang-Lkw sind in ihrer typischen Standardausführung 8-achsig, bestehend aus: 3-achsiger Motorwagen + 2-achsige Untersetzachse + 3-achsiger Sattelanhänger (Bild 10). Auch bei diesem Typ existiert ein Trend zur Verminderung der Achszahlen durch Einsatz von 2-achsigen Motorwagen und/oder 2-achsigen Sattelanhängern, wodurch sich 6- bzw. 7-achsige Züge ergeben.

Typ 4-Lang-Lkw stellen aufgrund der geringen Zahl eine Sonderform im Feldversuch dar. Die 4 eingesetzten Fahrzeugkombinationen weisen 7 und 8 Achsen auf (Bild 11).

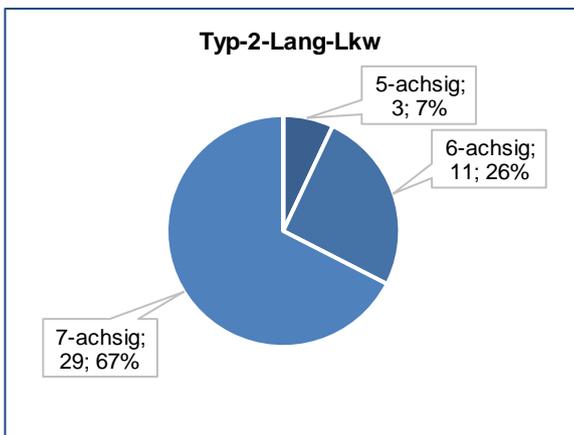
Auch die Typ 5-Lang-Lkw sind mit einer Gesamtachszahl von 6 Fahrzeugen schwach im Feldversuch repräsentiert. In der häufigsten Form besitzen sie 6 Achsen: 3-achsiger Motorwagen + 3-achsiger Anhänger (Bild 12).



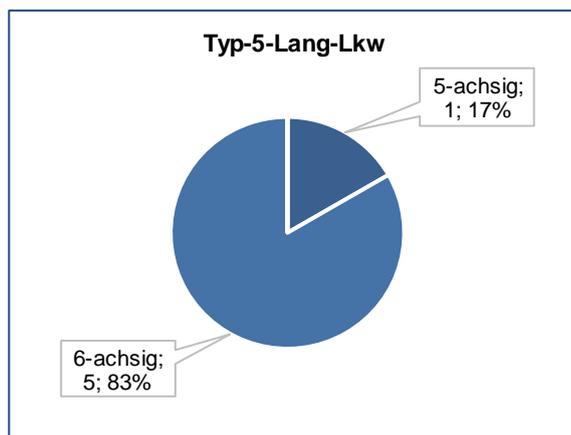
**Bild 8** Verteilung der Achszahl bei Typ-1-Lang-Lkw



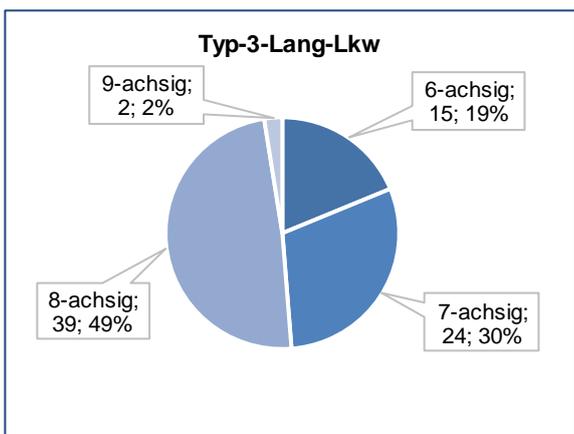
**Bild 11** Verteilung der Achszahl bei Typ-4-Lang-Lkw



**Bild 9** Verteilung der Achszahl bei Typ-2-Lang-Lkw



**Bild 12** Verteilung der Achszahl bei Typ-5-Lang-Lkw



**Bild 10** Verteilung der Achszahl bei Typ-3-Lang-Lkw



Bild 13 Spuralhalteleuchten nach § 51 Absatz 4 der StVZO

## 2.5 Technische Anforderungen

Im Folgenden werden die technischen Anforderungen nach § 5 der LKWÜberlStVAusnV kurz erläutert und die Umsetzung der Fahrzeugkombinationen im Rahmen des Feldversuchs ausgewertet.

### 2.5.1 Spuralhalteleuchten

In § 5 LKWÜberlStVAusnV wird folgende technische Anforderung gestellt:

*„Spuralhalteleuchten am hinteren Ende des Anhängers mit nach vorn wirkenden weißen Leuchten nach § 51 Absatz 1 der StVZO“*

Spuralhalteleuchten (Bild 13) stellen bei Anhängern zulassungsseitig eine optionale Ausstattung dar, sind jedoch bei Lang-Lkw verpflichtend. Sie dienen 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.

### 2.5.2 Luftfederung

In § 5 LKWÜberlStVAusnV wird folgende technische Anforderung gestellt:

*„Luftfederung außer auf den Lenkachsen der Kraftfahrzeuge“*

Luftfederungen sorgen für Achslastausgleich und schonen durch die Reduktion der dynamischen Achslastschwankungen die Straße.

Obwohl die Lenkachsen nicht verpflichtend luftgedert sein müssen, sind über 80 % der eingesetzten Fahrzeugkombinationen vollluftgedert (Bild 14).

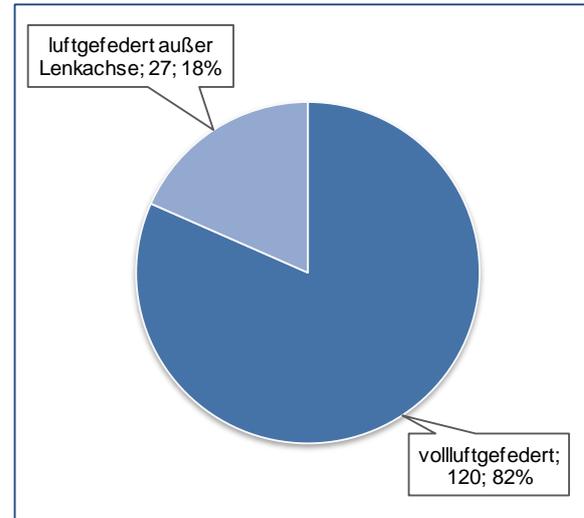


Bild 14 Ausstattung der Lang-Lkw mit Luftfederung

### 2.5.3 Differenzialsperre und Antriebsschlupfregelung

In § 5 LKWÜberlStVAusnV wird folgende technische Anforderung gestellt:

*„Differenzialsperre oder Antriebsschlupfregelung“*

Beide Sicherheitseinrichtungen sollen ein Durchdrehen der Antriebsachsen verhindern, wobei die Antriebsschlupfregelung elektronisch funktioniert und als Teil des EVSC (Electronic Vehicle Stability Control) seit November 2011 in Deutschland für alle neuen Nutzfahrzeugtypen verpflichtend ist (UN/ECE 2010), (Europäische Kommission 13.07.2009). Im Gegensatz zur Differenzialsperre erreicht die Antriebsschlupfregelung ihre Wirkung

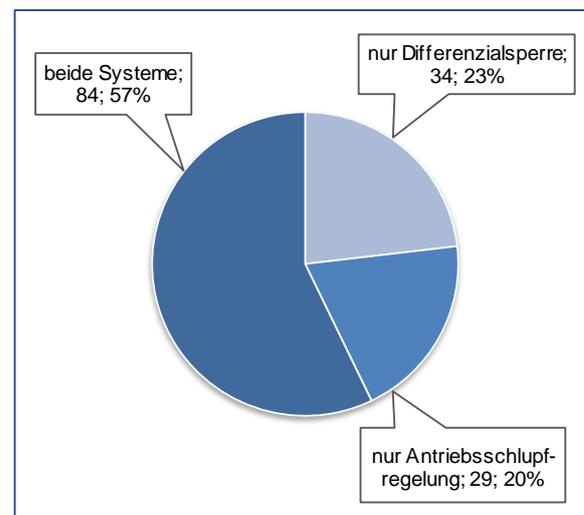


Bild 15 Ausstattung der Lang-Lkw mit Differenzialsperre und/ oder Antriebsschlupfregelung

durch ein Abbremsen eines Rades, falls dieses durchdrehen sollte. Drehen beide Antriebsräder durch, wird zusätzlich automatisch das Motormoment verringert. Ein Großteil der Fahrzeuge übererfüllt aktuell die Anforderungen der LKWÜberlStVAusnV bereits und ist mit beiden Systemen ausgestattet (Bild 15).

### 2.5.4 Elektronisch gesteuertes Bremssystem

In § 5 LKWÜberlStVAusnV wird folgende technische Anforderung gestellt:

*„elektronisch gesteuertes Bremssystem (EBS nach UN/ECE Regelung Nr. 13 Änderungsserie 11; ABl. L 297/1 vom 13.11.2010, S. 183)“*

Die Funktionsweise und der Stand der Technik in Bezug auf das elektronisch gesteuerte Bremssystem (EBS) wird detailliert in Kapitel 3 behandelt.

Allen am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeugkombinationen wird eine Ausstattung mit einem elektronischen gesteuerten Bremssystem in den Übereinstimmungsnachweisen bescheinigt.

### 2.5.5 Scheibenbremsen und Retarder

In § 5 LKWÜberlStVAusnV wird folgende technische Anforderung gestellt:

*„Scheibenbremsen und Retarder (Verlangsamter) im Zugfahrzeug“*

Die Erfüllung dieser technischen Anforderung wird allen am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeugkombinationen in den Übereinstimmungsnachweisen bescheinigt.

Der Wortlaut der LKWÜberlStVAusnV verlangt explizit nach einem „Retarder“, d.h. einer verschleißfreien, meist hydrodynamisch mit Öl oder Wasser arbeitenden Dauerbremse.

### 2.5.6 Achslastüberwachung

In § 5 LKWÜberlStVAusnV wird folgende technische Anforderung gestellt:

*„automatische Achslastüberwachung mit sinnfälliger Anzeige der Achslasten für die Achsen mit Luftfederung oder der Gesamtmasse“.*

Die Vorgängerstudie (Süßmann et al. 2014) bietet bereits eine ausführliche Darstellung des Standes der Technik zu den gängigen Systemen der Achslastüberwachung bei Nutzfahrzeugen.

Gemäß den Übereinstimmungsnachweisen wird allen Fahrzeugkombinationen die Erfüllung dieser Anforderung bestätigt.

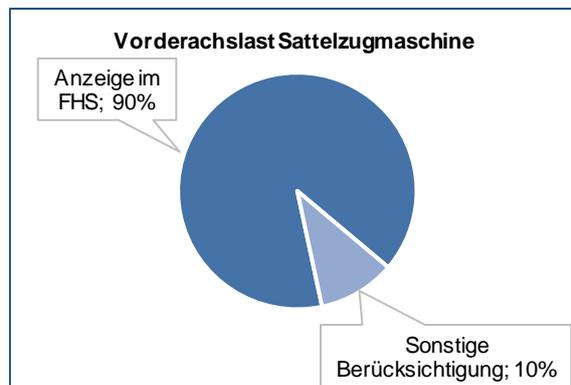
Im Rahmen der in dieser Studie durchgeführten Fragebogenaktion werden jedoch präzisere Aussagen zu folgenden Aspekten abgefragt:

- Art der Berücksichtigung der Vorderachslast der Sattelzugmaschine bei der Erfassung des Zuggesamtgewichts
- Ableseort der Achslast des Sattelanhängers/1. Anhängers/der Untersetzachse
- Ableseort der Achslast des Zentralachsanhängers/2. Anhängers
- Zeitaufwand zur Bestimmung der Lang-Lkw-Gesamtmasse

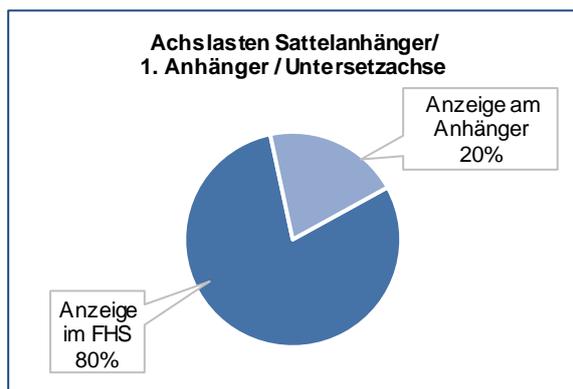
Aufgrund des hohen Anteils an vollluftgefederten Fahrzeugkombinationen (Bild 14), können bei mehr als 80 % aller Fahrzeugkombinationen die Achslasten aller Achsen der einzelnen Fahrzeugmodule direkt im Fahrerhaus des Zugfahrzeugs abgelesen werden (Bild 16, Bild 17, Bild 18). Bei den übrigen Anhängern muss die Achslast direkt außen am Fahrzeug abgelesen werden, was im praktischen Einsatz einen größeren Zeitaufwand zur Bestimmung der Fahrzeuggesamtmasse zur Folge hat.

Dieser Zeitaufwand liegt in den meisten Fällen bei max. 5 Minuten (89 %, Bild 19). Längere Bestimmungszeiten im Bereich von 10-15 min (3 Betreiberangaben) werden von den Teilnehmern z.T. durch „umständliches Ablesen von Einzelachslasten an den Fahrzeugeinheiten“ bei z.T. höherer Achszahl und fehlender Bedienerfreundlichkeit der Menüführung des Achslastmonitors („Smartboard“) am Anhänger bzw. Dolly“ begründet.

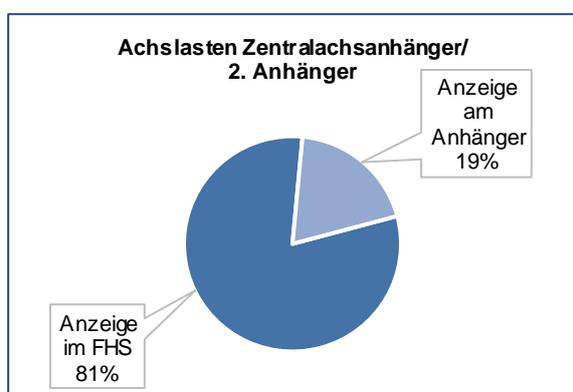
Im Falle einer Anzeige aller Achslasten direkt im Kombiinstrument im Fahrerhaus, wie es beim überwiegenden Teil der Lang-Lkw möglich ist, müssen vom Fahrer lediglich die Einzelachslasten zur Gesamtmasse des Fahrzeugs addiert werden. In einigen Fällen wird darüber hinaus auch die Gesamtmasse bereits im System angezeigt. Die Angaben erfolgen in den Einheiten Kilogramm oder



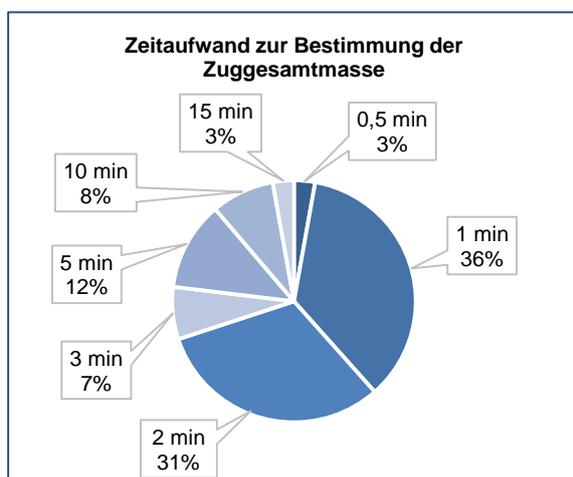
**Bild 16** Art und Weise der Erfassung der Vorderachslast der Sattelzugmaschine



**Bild 17** Ableseort der Achslast des Sattelanhängers bzw. des 1. Anhängers



**Bild 18** Ableseort der Achslast des 2. Anhängers



**Bild 19** Zeitaufwand zur Bestimmung der Zugesamtmasse der Lang-Lkw-Kombination

Tonne mit zumeist einer Nachkommastelle, eine weitere Umrechnung durch den Fahrer ist nicht erforderlich. Signifikante Fehlerquellen bei der Bestimmung der Gesamtmasse wurden von den Betreibern nicht als Problemstellung genannt (z.B. Fehlbedienung, Ableser-/Abschreiberfehler). Das Fahrzeug muss jedoch einen geraden Stand aufweisen und die Druckluft muss ausreichend aufgebaut sein.

Wird die Last einer blattgefederten Vorderachse nicht angezeigt, wird diese von den Betreibern rechnerisch durch Addition eines festen, zuvor ermittelten Achslastwertes berücksichtigt. Werden Anhängerachslasten nicht im Fahrerhaus angezeigt, so müssen diese an eigenen Achslastmonitoren („Smartboard“) an den einzelnen Fahrzeugmodulen abgelesen, in eine Achslasttabelle übertragen und zur Gesamtmasse des Zuges addiert werden.

## 2.5.7 Spurhaltewarnsystem

In § 5 LKWÜberlStVAusnV wird folgende technische Anforderung gestellt:

„Spurhaltewarnsystem“

Gängige Spurhaltewarnsysteme 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.

Gemäß den Übereinstimmungsnachweisen wird allen Fahrzeugkombinationen die Erfüllung dieser Anforderung bestätigt. Seitens der Autoren des Berichts wird vorgeschlagen, in der LKWÜberlStVAusnV für diese Anforderung auf die bereits bestehende UN/ECE-Regelung Nr. 130 Bezug zu nehmen.

## 2.5.8 Elektronisches Fahrdynamikregelsystem

In § 5 LKWÜberlStVAusnV wird folgende technische Anforderung gestellt:

„Elektronische Fahrdynamikregelsysteme (nach UN/ECE Regelung Nr. 13 Änderungsserie 11; ABl. L 297/1 vom 13.11.2010, S. 183)“

Als Erweiterung der Anforderungen 3 (2.5.3) und 4 (2.5.4) bezüglich einer elektrischen Regelung verlangt diese Anforderung eine allgemeine Verpflichtung der Integration der elektronischen Fahrdynamikregelung (ESP) oder auch „Electronic Vehicle Stability Control“ (EVSC) ein. Das System ermittelt den aktuellen fahrdynamischen Zustand des Fahrzeuges und erhöht mittels radselektiver Bremsenriffe über die elektronische Bremsregelung (2.5.4) die Fahrstabilität in kritischen Fahrsituationen und -manövern.

Gemäß den Übereinstimmungsnachweisen wird allen Fahrzeugkombinationen die Erfüllung dieser Anforderung bestätigt.

Eine detaillierte Analyse des Standes der Technik von EVSC für Nutzfahrzeuge findet in Kapitel 3 statt.

## 2.5.9 Abstandsregelsystem und Notbremsassistentensystem

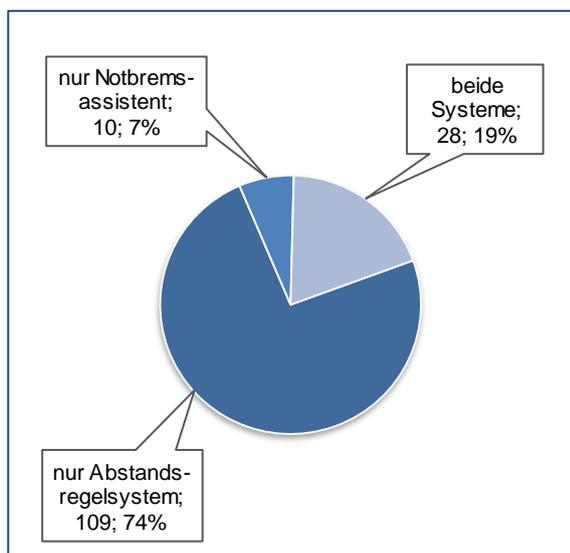
In § 5 LKWÜberlStVAusnV wird folgende technische Anforderung gestellt:

*„automatisches Abstandsregelsystem (Abstandstempomat) oder Notbremsassistentensystem“*

Ein Abstandsregelsystem ermittelt über Radarsignale den Abstand und die Relativgeschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeuges. Das System regelt daraufhin die Geschwindigkeit des Lang-Lkw, sodass der gesetzlich geforderte bzw. eingestellte Mindestabstand eingehalten wird. Die eingesetzten Systeme unterscheiden sich je nach Fahrzeughersteller.

Ein Notbremsassistent ermöglicht die Erkennung fahrender oder stehender Hindernisse, die entsprechende Warnung des Fahrers und gegebenenfalls die Einleitung einer aktiven Teilbremsung. Sollte eine Reaktion seitens des Fahrers ausbleiben, kann das System letztlich eine Vollbremsung bis zum Stillstand des Fahrzeugs durchführen. Die UN-Regelung Nr. 131 dokumentiert hierzu eine einheitliche Regelung und verpflichtet alle neuen schweren Nutzfahrzeuge ab 2015 zur Ausstattung mit AEBS (Die Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) 13.02.2014).

Bereits 19 % aller Fahrzeugkombinationen verfügen über beide Systeme, 74 % sind nur mit einem Abstandsregelsystem ausgestattet und 10 % verfügen lediglich über einen Notbremsassistenten (Bild 20).



**Bild 20** Verbreitung der Ausstattung mit einem automatischen Abstandsregelsystem (Abstandstempomat) und/oder Notbremsassistentensystem

## 2.5.10 Rückspiegel

In § 5 LKWÜberlStVAusnV wird folgende technische Anforderung gestellt:

*„Einrichtungen für indirekte Sicht nach der Richtlinie 2003/97/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 10. November 2003 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für die Typgenehmigung von Einrichtungen für indirekte Sicht und von mit solchen Einrichtungen ausgestatteten Fahrzeugen sowie zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG und zur Aufhebung der Richtlinie 71/127/EWG (ABl. L 25 vom 29.1.2004, S. 1), die zuletzt durch die Richtlinie 2006/96/EG vom 20. November 2006 (ABl. L 363 vom 20.11.2006, S. 81) geändert worden ist“*

Zur Verringerung des „toten Winkels“ wurde diese Richtlinie für schwere Lkw eingeführt und löste damit 2010 die Richtlinie 71/127/EWG ab. Hier sind Bestimmungen zur Vergrößerung des Sichtfeldes, zu zusätzlichen Spiegeln, Krümmungsradien sowie erlaubten Kamera-Monitor-Systemen zur indirekten Sicht enthalten.

Gemäß den Übereinstimmungsnachweisen wird allen Fahrzeugkombinationen die Erfüllung dieser Anforderung bestätigt.

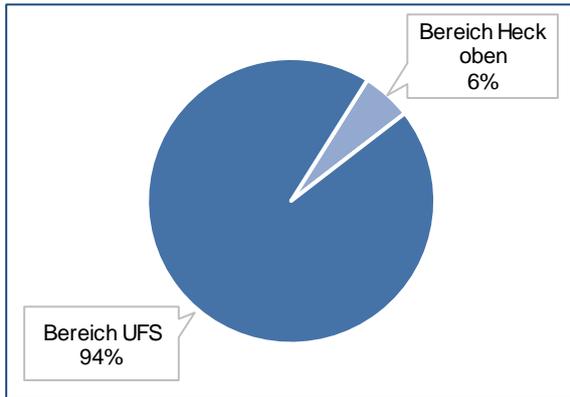
## 2.5.11 Kamera-Monitor-System

In § 5 LKWÜberlStVAusnV wird folgende technische Anforderung gestellt:

*„Kamera-System am Heck des Fahrzeugs oder der Fahrzeugkombination sowie einem zugehörigen Monitor im Blickfeld des Fahrers für die Sicht nach hinten“*

Die Vorgängerstudie (Süßmann et al. 2014) beschäftigte sich bereits detailliert mit den Sichtproblemen des Fahrzeugführers und erarbeitete einen Stand der Technik in Bezug auf Kamera-Monitor-Systeme, den möglichen Anbringungs- und Übertragungsmöglichkeiten sowie den relevanten Sichtfeldern zur Beobachtung sowohl des rückwärtigen Verkehrs als auch als Rangierhilfe.

Im Rahmen dieser Studie werden daher weiterführende Detailfragen zur praktischen Umsetzung und Nutzung des Kamera-Monitor-Systems untersucht, wo die LKWÜberlStVAusnV nicht näher spezifiziert und einen weiten Lösungsraum alternativer Umsetzungen zulässt.



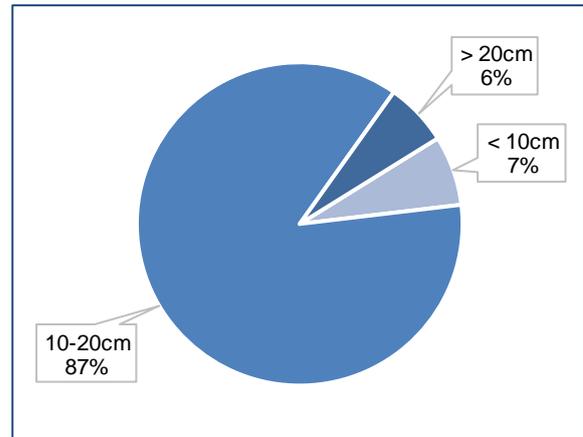
**Bild 21** Anbringungsort der rückwärtigen Kamera am Fahrzeugheck des Lang-Lkw

Der Anbringungsort wird nicht näher spezifiziert, befindet sich jedoch bei 94 % aller Fahrzeugkombinationen im Bereich des Unterfahrschutzes, bei den lediglich 6 % der Fahrzeugkombinationen mit Anbringung am oberen Fahrzeugende ist von einem veränderten Sichtfeld auszugehen (Bild 21).

Ein entscheidender Aspekt für die praktische Nutzung des Kamera-Monitor-Systems ist die Verschmutzungsanfälligkeit.

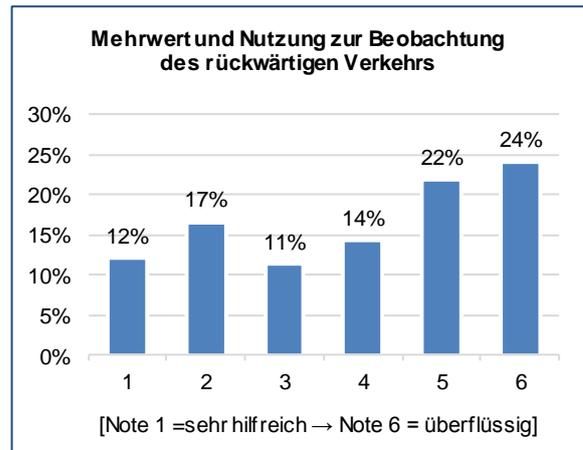
Die Verschmutzungsanfälligkeit wird von einigen Betreibern durchaus als mittelmäßiges Problem bewertet (Note 3/4, 43 %), das einen Zusatzaufwand im praktischen Arbeitsalltag zur regelmäßigen Reinigung der Kamera bedingt (Bild 22), der überwiegende Teil bewertet dies jedoch als geringes Problem (Note 1/2, 53 %).

Das Kamerabild muss gemäß LKWÜberStVAusnV auf einem zugehörigen Monitor im Sichtfeld des Fahrzeugführers angezeigt werden. Nicht näher spezifiziert sind jedoch die Größe der Anzeige und ob das Kamerabild exklusiv und permanent auf einem Monitor angezeigt werden soll oder ob auf demselben Monitor zusätzliche Anzeigen zulässig

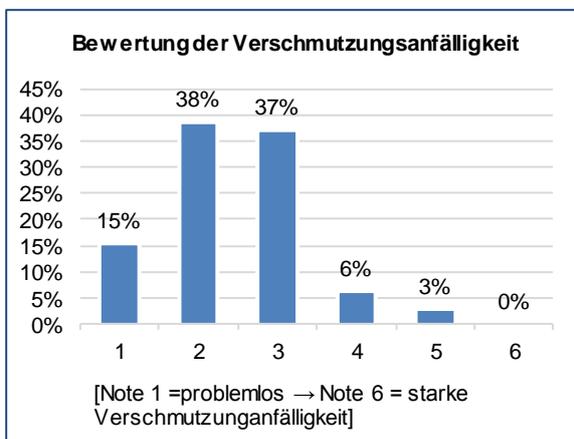


**Bild 23** Bildschirmdiagonalen bei der Umsetzung der Monitoranzeige im Fahrerhaus

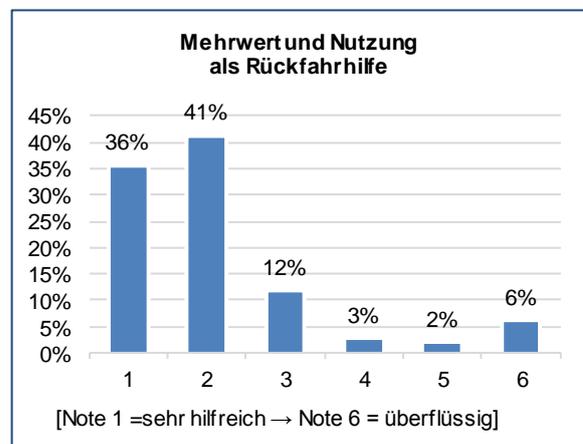
sind, z. B. bei Integration in das Tachometer oder Navigationssystem. Die meisten Fahrzeugkombinationen sind mit einem Monitor mittlerer Größe (10-20 cm Bildschirmdiagonale, Bild 23) ausgerüstet.



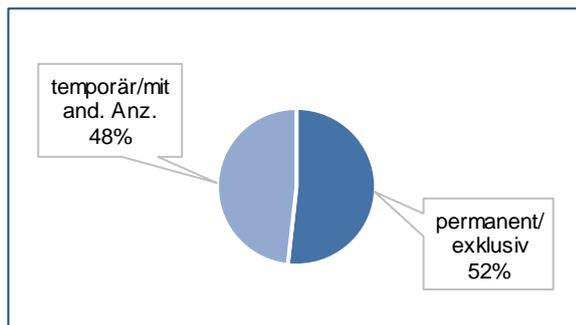
**Bild 24** Bewertung des Kamera-Monitor-Systems in Bezug auf den Nutzen zur Beobachtung des rückwärtigen Verkehrs



**Bild 22** Bewertung der Verschmutzungsanfälligkeit der rückwärtigen Kamera durch die Fahrzeugbetreiber



**Bild 25** Bewertung des Kamera-Monitor-Systems in Bezug auf den Nutzen als Rückfahrhilfe



**Bild 26** Art der Anzeige des Kamerabildes im Fahrerhaus

Zu etwa gleichen Anteilen wählen die Betreiber permanente, exklusive Anzeigen auf einem separaten Monitor und die Integration des Kamerabildes in bestehende Monitore, die nicht exklusiv das Kamerabild anzeigen, sondern auch weitere Anzeigen darstellen (Bild 26).

Um die Praktikabilität sowie Nutzen und Mehrwert des Kamera-Monitor-Systems im alltäglichen Fahrzeugeinsatz zu analysieren, wurde im Rahmen der Fragenbogenaktion auch eine Bewertung des Systems in Bezug auf die Nutzung zur Beobachtung des rückwärtigen Verkehrs (Bild 24) und den Einsatz als Rückfahrlilfe (Bild 25) abgefragt.

Bei der Bewertung des Mehrwerts des Kamera-Monitor-Systems zur Beobachtung des rückwärtigen Verkehrs ergibt sich ein gemischtes Bild, der Mehrwert wird jedoch vom größeren Teil der Betreiber eher verneint oder als niedrig bewertet (Bild 24), wohingegen der Mehrwert als Rückfahrlilfe klar betont wird und insgesamt als hilfreich bewertet wird (Bild 25).

### 2.5.12 Konturmarkierungen des Lang-Lkw

In § 5 LKWÜberlStVAusV wird folgende technische Anforderung gestellt:

*„Konturmarkierungen aus retroreflektierendem Material nach UN/ECE Regelung Nr. 48 (ABl. L 137 vom 30.5.2007, S. 1)“*

Wie bereits seit 2011 für alle Neufahrzeuge der Klassen N2, N3, O3 und O4 verpflichtend, müssen alle Fahrzeugmodule eines Lang-Lkw 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 UN/ECE Regelung Nr. 48 (Die Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) 30.01.2011) definierten Abstand über dem Boden eine durchge-

hende Linienmarkierung sichtbar sein muss sowie jeweils an den oberen Ecken der Fahrzeugseiten rechtwinklig angeordnete Streifen angebracht werden müssen. Bei Fahrzeugen mit Wechselsystemen besteht die Ausnahme, dass nur das Fahrge- stell mit einer Linienmarkierung ausgestattet sein muss.

Gemäß den Übereinstimmungsnachweisen wird allen Fahrzeugkombinationen die Erfüllung dieser Anforderung bestätigt.

### 2.5.13 Heckkennzeichnung des Lang-Lkw

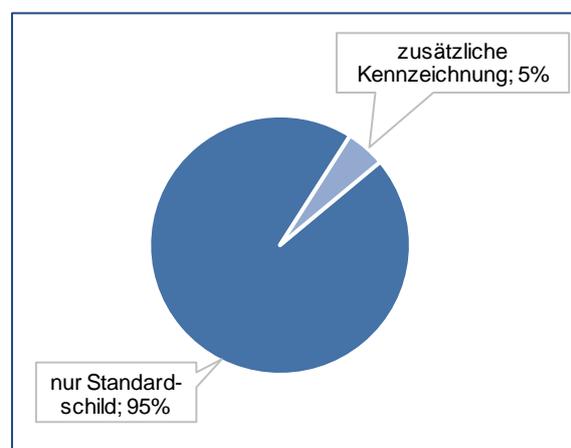
In § 5 LKWÜberlStVAusV wird folgende technische Anforderung gestellt:

*„rückwärtige Kenntlichmachung durch ein Schild aus retroreflektierendem Material in Anlehnung an die UN/ECE Regelung Nr. 70 (BGBl. 1994 II S. 970) mit der Aufschrift „Lang-Lkw“ (Schriftgröße 130 mm)“*

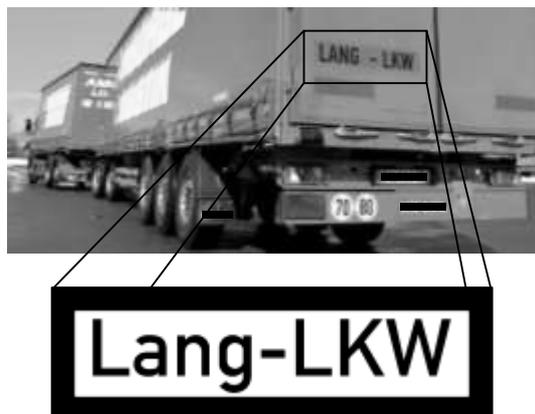
Die LKWÜberlStVAusV verlangt eine heckseitige Kennzeichnung des Fahrzeugs mit einem retroreflektierenden „Lang-Lkw“-Schild (Bild 28).

Gemäß den Übereinstimmungsnachweisen wird allen Fahrzeugkombinationen die Erfüllung dieser Anforderung bestätigt.

Im Rahmen der Fragebogenaktion wurde erfasst, dass lediglich 5 % der Lang-Lkw über eine zusätzliche Kennzeichnung verfügen (z.B. Schild „25m“, Leuchtstreifen), wohingegen 95 % nur das durch die LKWÜberlStVAusV geforderte Standardschild anbringen (Bild 27). Die Vorgängerstudie (Süßmann et al. 2014) kam in Bezug auf die Lang-Lkw-Kennzeichnung durch Probandenbefragungen zum klaren Ergebnis, dass eine vereinfachte grafische Darstellung des längeren Fahrzeugs am Heck wirkungsvoller als eine textuelle Aufschrift „Lang-Lkw“ ist.



**Bild 27** Umsetzung der heckseitigen Kennzeichnung der Lang-Lkw-Kombinationen



**Bild 28** Heckseitige Fahrzeugkennzeichnung der Lang-Lkw-Kombinationen

### 2.5.14 Digitales EG-Kontrollgerät

In § 5 LKWÜberStVAusV wird folgende technische Anforderung gestellt:

*„Kontrollgerät nach den Bestimmungen des Anhangs I B der Verordnung (EWG) Nummer 3821/85 des Rates vom 20. Dezember 1985 über das Kontrollgerät im Straßenverkehr (ABl. L 370 vom 31.12.1985, S. 8), die zuletzt durch die Verordnung (EU) Nr. 1266/2009 vom 16. Dezember 2009 (ABl. L 339 vom 22.12.2009, S. 3) geändert worden ist“*

Das Kontrollgerät wurde zur Aufzeichnung der Lenkzeiten des Lkw-Fahrers in der EWG-Verordnung 3821/85 eingeführt und muss nach heutigem Stand ein digitales Gerät sein und über einen Massenspeicher verfügen. Individuelle Lenkzeiten sollen regelmäßig vom digitalen Kontrollgerät (oder Fahrtenschreiber) heruntergeladen werden. Die letzte Änderung (VO (EU) Nr. 1266/2009) beinhaltet geringfügige Anpassungen bezüglich Begrifflichkeiten und Funktionen des Kontrollgeräts.

Gemäß den Übereinstimmungsnachweisen wird allen Fahrzeugkombinationen die Erfüllung dieser Anforderung bestätigt.

## 2.6 Weitere Fahrzeugeigenschaften

### 2.6.1 Kombiniertes Verkehr

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

Es wird im Allgemeinen unterschieden zwischen begleitetem und unbegleitetem Kombinierten Verkehr. Im begleiteten Kombinierten Verkehrs wird das gesamte Fahrzeug auf die „Rollende Landstraße“ (RoLA) oder eine Roll-on-Roll-off-Fähre (RoRo-Fähre) verladen. Im unbegleiteten Kombinierten Verkehr 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 Einsatzbarkeit im Kombinierten Verkehr im Sinne des § 6 der LKWÜberStVAusV näher beschrieben (BMVBS und Leyendecker 2012). Demnach ist nur der unbegleitete KV zulässig. Der begleitete Kombinierte Verkehr auf RoLa oder RoRo-Fähren sei praktisch nicht möglich, weil der „Einsatz von Lang-Lkw nur innerdeutsch stattfindet und ein grenzüberschreitender Einsatz der Fahrzeuge bzw. Fahrzeugkombinationen nicht zulässig ist“.

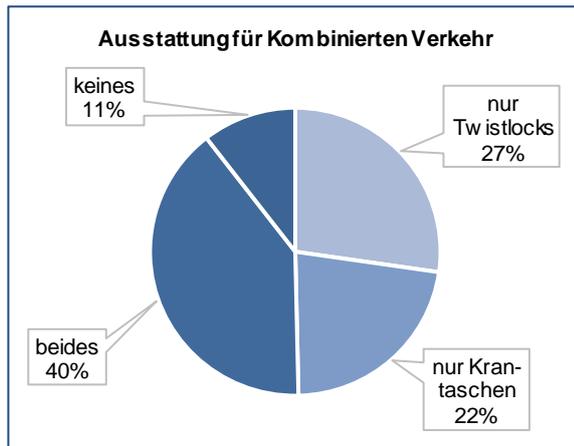
Weiterhin wird erklärt, dass es für die KV-Tauglichkeit im Sinne des § 6 der LKWÜberStVAusV ausreichend sei, dass lediglich ein Teil der Fahrzeugkombination eine Ladeinheit transportieren kann, deren Umschlag mit Geräten möglich ist. In einer weiteren Stellungnahme des BMVI zur Definition



**Bild 29** Sattelanhänger mit Krantaschen zur Bahnverladung im Kombinierten Verkehr



**Bild 30** Twistlock zur Aufnahme von Containern und Wechselchassis im Kombinierten Verkehr



**Bild 31** Ausstattung der Fahrzeugkombinationen mit Krantaschen und/oder Twistlocks für den Einsatz im Kombinierten Verkehr

der KV-Tauglichkeit im Feldversuch mit Lang-Lkw wurde erneut festgestellt, dass die Transportierbarkeit von mit Geräten umschlagbaren Ladeeinheiten, d.h. Container/Wechselbrücken oder der Anhänger selbst, Voraussetzung ist (BMVI 2016).

Die technischen Möglichkeiten des Kombinierten Verkehrs und alle entsprechend notwendigen Ausstattungen sind in der Vorgängerstudie (Süßmann et al. 2014) detailliert dargestellt.

Die Lang-Lkw im Feldversuch sind entweder mit Krantaschen zur Bahnverladung ausgestattet (Bild 29) oder ermöglichen die Aufnahme von Containern/Wechselchassis mit Hilfe einer Containersicherung, sog. Twistlocks (Bild 30). Rund 40 % der Fahrzeuge sind mit beiden Einrichtungen ausgestattet, 22 % besitzen nur Krantaschen, 27 % verfügen nur über Twistlocks (Bild 31). 15 Lang-Lkw (11 %) von 8 Speditionen (14 %) verfügen über keine dieser beiden Einrichtungen.

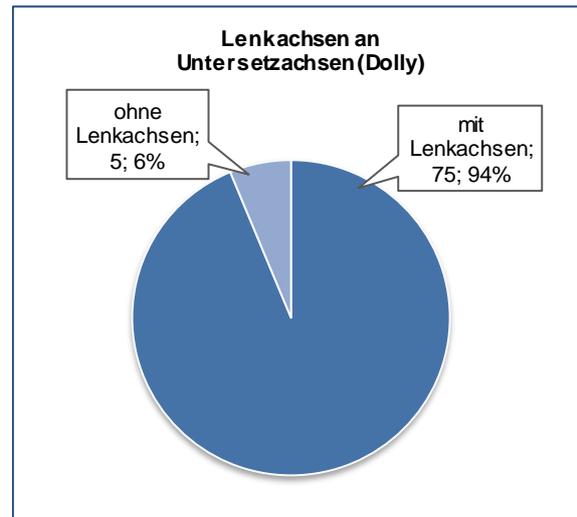
## 2.6.2 Kurvenlaufeigenschaften

Eine detaillierte Analyse der Kurvenlaufeigenschaften von Lang-Lkw sowie die Durchführung praktischer Versuche zum Aufbau eines Simulationswerkzeugs für Simulationen zur Einhaltung des § 32d StVZO mit Lang-Lkw ist zentraler Bestandteil der Vorgängerstudie (Süßmann et al. 2014).

Im Rahmen dieser Studie wird die Erfüllung von § 32d StVZO lediglich anhand der Übereinstimmungsnachweise überprüft und in der Fahrzeugdatenbank (2.3) tabelliert.

Gemäß den Übereinstimmungsnachweisen wird allen Fahrzeugkombinationen die Erfüllung dieser Anforderung bestätigt.

Für die 80 Fahrzeugkombinationen des Typs 3 wird zusätzlich die Lenkbarkeit der Unteretzachse



**Bild 32** Lenkbarkeit von Unteretzachsen (Dolly); „mit Lenkachsen“ umfasst auch die Lenkbarkeit über eine lenkbare Deichsel

(Dolly) ausgewertet (Bild 32). Mit 94 % sind die meisten der eingesetzten Unteretzachsen lenkbar, lediglich 6 % verfügen nicht über gelenkte Achsen.

Eine erste Plausibilisierung der Ergebnisse zeigte jedoch eine inkonsistente Beurteilung der Lenkbarkeit der Dollyachsen in den Übereinstimmungsnachweisen. So wurden baugleiche Dollys, deren Lenkbarkeit nicht über gelenkte Achsen, sondern durch eine aktiv gelenkte Deichsel dargestellt wird, von unterschiedlichen Gutachtern in verschiedenen Gutachten sowohl als „ungelenkt“ (im Sinne des Wortlauts „ohne gelenkte Achsen“) als auch als „gelenkt“ (im Sinne von „Lenkbarkeit gegeben“) beurteilt.

In der Statistik wurden Dollys, deren Lenkbarkeit über eine aktiv gelenkte Deichsel realisiert wird, unter „mit Lenkachse“ erfasst.

## 3 AP2 - Bremsversuche

### 3.1 Problemstellung und Zielsetzung

Diese Untersuchung knüpft auch hier an die BASt-Studie „Lang-Lkw: Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt“ der ersten Untersuchungsphase im Feldversuch mit Lang-Lkw in Deutschland an. Dort wurde unter gleichen Versuchsbedingungen der Bremsweg eines 8-achsigen Lang-Lkw vom Typ 3 mit dem eines herkömmlichen, 5-achsigen Sattelkraftfahrzeugs verglichen, wobei beide Fahrzeugkombinationen bis zu ihrem zulässigen Gesamtgewicht von jeweils 40 t beladen waren (Süßmann et al. 2014). Dies stellt aus Sicht herkömmlicher Lkw ein „worst case“-Szenario dar, da diese auch mit maximaler Nutzlast bei gegenüber dem Lang-Lkw geringerer Achszahl beladen waren.

Ziel dieser Untersuchung ist nun ein ergänzender Vergleich der Bremswege bei gleicher Ladungsdichte, die sich aus der Beladung von Lang-Lkw auf ihr zulässiges Gesamtgewicht ergibt. Der Bremsweg der zwei gängigsten Lang-Lkw-Typen wird mit dem der jeweils durch die Lang-Lkw substituierten Fahrzeugkombinationen herkömmlicher Bauart verglichen. In diesem „Substitutions“-Szenario wird angenommen, dass sich durch den Einsatz der Lang-Lkw die Ladungsdichte (Art der Ladung) nicht ändert, jedoch die Menge der Ladung entsprechend des größeren Ladevolumens. Dies ist beispielsweise bei Pendelverkehren in der Kontraktlogistik oft der Fall.

Um die Effizienz und Kostenstruktur der Lang-Lkw weiter zu steigern, werden diese von den Betreibern zunehmend auf ihren Einsatzzweck hin optimiert und weniger aus Standard-Fahrzeugkomponenten zusammengesetzt. Resultat sind beispielsweise Lang-Lkw vom Typ 3 mit 6 statt 8 Achsen und entsprechend geringerem Eigen- bzw. Leergewicht. Diese werden im Rahmen dieser Untersuchung in einer weiteren Versuchsreihe betrachtet, um zu ermitteln, ob doch ein gewisser Einfluss der Achszahl auf die erreichten Bremswege besteht.

### 3.2 Stand der Wissenschaft und Technik

#### 3.2.1 Fahrzeugtechnik

Nach § 5 LKWÜberStVAusnV müssen im Feldversuch mit Lang-Lkw zugelassenen Fahrzeuge über ein elektronisches Bremssystem (EBS) verfügen.

Dies impliziert die Ausstattung der Fahrzeuge mit einem Anti-Blockier System (ABS), dessen Funktion es ist, das Blockieren der Räder bei Bremsungen zu verhindern. Wesentliche Bausteine hierfür bilden an Rädern angebrachte Drehzahlsensoren sowie sog. Modulatoren, die den Bremsdruck regeln.

Vor dem Hintergrund von Bremsweguntersuchungen gilt es, unterschiedliche ABS-Konfigurationen bzw. –Architekturen mit zu berücksichtigen, da diese möglicherweise auch einen Einfluss auf das Bremsvermögen der unterschiedlichen Fahrzeuge haben. Der Bremsweg könnte in Zusammenhang mit der Aufteilung von einzeln bzw. gemeinsam sensierten oder geregelten Rädern in Verbindung stehen, da hierdurch die Kraftschlussausnutzung beeinflusst wird.

Zu unterscheiden sind die ABS-Konfigurationen im Wesentlichen durch die Anzahl und Position der Drehzahlsensoren und die Ansteuerungen unterschiedlicher Räder durch die Modulatoren.

#### ABS-Konfigurationen bei ziehenden Einheiten

Bei Sattelzugmaschinen (4x2) kommen üblicherweise 4 Sensoren und 4 Modulatoren zum Einsatz (4S/4M), sodass jedes Rad einzeln angesteuert werden kann. Bei 3-achsigen Motorwägen mit einer angetriebenen Achse (6x2) kann diese Konfiguration auch zum Einsatz kommen. Hier können die Räder der zwei Hinterachsen nur je Seite angesteuert werden, da je Seite nur ein Drehzahlsensor und ein Modulator zur Verfügung steht. Eine annähernd gleiche Kraftschlussausnutzung wird hierbei vorausgesetzt.

Eine Erweiterung für 6x2-Motorwägen stellt eine ABS-Konfiguration mit 6 Drehzahlsensoren und 5 Modulatoren dar (6S/5M). Hierbei verfügt wiederum jedes Rad über einen Drehzahlsensor. Die Bremsdruckregelung an der Vorder- sowie Antriebsachse erfolgt analog 4S/4M-Konfiguration. Die Vor- oder Nachlaufachse wird über einen weiteren Modulator angesteuert. (Bendix Commercial Vehicle Systems LCC 2009)

Bei der ABS-Konfiguration mit 6 Drehzahlsensoren und 6 Modulatoren (6S/6M) verfügt auch bei 6x2-Motorwägen jedes Rad über einen Drehzahlsensor sowie einen Modulator, sodass jedes Rad individuell geregelt werden kann. (WABCO 2016; Bendix Commercial Vehicle Systems LCC 2009)

#### ABS-Konfigurationen bei gezogenen Einheiten

Bei gezogenen Sattelanhängern wird der Bremsdruck üblicherweise über zwei Modulatoren je Seite geregelt. Je Seite kommen ein (2S/2M) oder zwei (4S/2M) Drehzahlsensoren zum Einsatz. Eine

annähernd gleiche Kraftschlussausnutzung je Seite wird vorausgesetzt bzw. angenommen. Grundausstattung von 3-achsigen Sattelanhängern bildet in der Regel die 2S/2M-Konfiguration (Knorr Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH 2015; WABCO 2013). Empfohlen wird jedoch die Zusatzausstattung mit der 4S/2M-Konfiguration. (Braun 2012)

Eine Variante der 2S/2M-Konfiguration genannt 2S/2M-SLV (Select Low Valve) kommt unter anderem bei zweiachsigen gelenkten Unteretzachsen zum Einsatz (Fahrzeugwerk Bernard Krone GmbH 2012). Hierbei befinden sich zwei Drehzahlsensoren auf der ungelenkten Achse mit je einem Modulator. Der jeweils geringere Bremsdruck („select low“) wird über ein Doppelabsperrventil an die gelenkte Achse durchgesteuert, um ein blockieren der dortigen Räder zu verhindern. (WABCO 2010)

Zentralachsanhänger, wie sie bei Lang-Lkw vom Typ 2 zum Einsatz kommen, verfügen üblicherweise über eine 4S/3M-Konfiguration. Hierbei wird eine Achse über einen Modulator, eine über zwei Modulatoren geregelt. (Knorr Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH 2015; Bendix Commercial Vehicle Systems LCC 2009)

### 3.2.2 Vergleichbare Untersuchungen

Vergleichbare Untersuchungen sind solche Bremswegtests, die mit Lang-Lkw oder ähnlichen Fahrzeugkombinationen wie Lang-Lkw durchgeführt wurden.

Eine derartige Untersuchung stellt jene bereits erwähnte der ersten Untersuchungsphase des Lang-Lkw Feldversuchs dar. Im erwähnten „worst case“-Szenario zeigte ein 8-achsiger Lang-Lkw vom Typ 3 mit 40 t Gesamtgewicht einen Bremsweg (80 km/h Durchgang bis Fahrzeugstillstand) von 36 m im Vergleich zu einem 5-achsigen Sattelkraftfahrzeug ebenfalls mit einem von Gesamtgewicht 40 t mit 44 m. (Süßmann et al. 2014)

Vor dem Feldversuch in Deutschland wurden Bremswege von 8-achsigen Fahrzeugkombinationen ähnlich Lang-Lkw vom Typ 3, jedoch mit einem in Deutschland nicht zulässigen Gesamtgewicht von 60 t, vermessen. Der Bremsweg wurde verglichen mit einem 5-achsigen Lastzug mit einem Gesamtgewicht von 40 t. Der Bremsweg wurde auf trockenem Asphalt gemessen ab einem 60 km/h-Durchgang bis zum Fahrzeugstillstand. Dabei zeigte die Fahrzeugkombination mit 60 t einen um rund 5 % geringeren Bremsweg. Der gleiche Versuchsaufbau wurde auf nassem poliertem Granit ab einer Geschwindigkeit von 45 km/h wiederholt, wobei die dem Lang-Lkw ähnliche Fahrzeugkombination einen um 17 % kürzeren Bremsweg aufwies. Die kürzeren Bremswege wurden mit

der höheren Achszahl und der damit verbesserten Wirksamkeit des ABS begründet. (Bendel et al. 2009)

Der Zusammenhang zwischen Fahrzeugmasse und Bremsweg wird auch in den folgenden Untersuchungen von Interesse sein, da bei gleicher Ladungsdichte die Lkw herkömmlicher Bauart mit weniger Ladevolumen und geringerem Eigengewicht leichter sein werden als die Lang-Lkw mit größerem Ladevolumen und höherem Eigengewicht.

Martin Winkelbauer erläutert in diesem Zusammenhang (Winkelbauer 2009):

*„Eine höhere Masse führt bei Kraftfahrzeugen in der Regel nicht zwangsläufig zu einem längeren Bremsweg. Dies wäre nur dann der Fall, wenn die Leistungsfähigkeit der Bremsen selbst (...) überschritten würde. Die zwischen Reifen und Fahrbahn maximal übertragbaren Kräfte sind dem Gewicht direkt proportional. Daher steigt die maximale Bremskraft zwischen Boden und Reifen in genau gleichem Ausmaß wie die Masse. Der Bremsweg ist daher in erster Näherung von der Masse unabhängig.“*

Der Einfluss jeweiliger ABS-Konfigurationen auf die Bremswege blieb in obigen Studien weitestgehend unbeachtet.

## 3.3 Methodisches Vorgehen

### 3.3.1 Fahrzeuge

Aus der Fahrzeugdatenbank zum Zwischenstand 21.03.2016 wurden die zwei Kombinationstypen 2 und 3 ausgewählt, da diese mit 28 % und 56 % die größten Anteile an der am Feldversuch teilnehmenden Fahrzeugflotte darstellen. Wie von Süßmann et al. (2014) bereits diskutiert, werden Lang-Lkw zunehmend auf ihren Einsatzzweck hin optimiert, was einen höheren Anteil an Fahrzeugen mit geringerer Anzahl an Achsen zur Folge hat.

Daher wird der Vergleich der Bremswege in drei Versuchsreihen durchgeführt. Neben zwei Lang-Lkw vom Typ 2 und 3 mit üblicher Achsanzahl von 7 bzw. 8 wird auch ein Fahrzeug vom Typ 3 mit nur 6 Achsen einer Bremswegmessung unterzogen.

Referenzfahrzeuge bilden die jeweils beim Feldversuchsteilnehmer durch die Lang-Lkw substituierten Lkw herkömmlicher Bauart. Es ergeben sich folgende Gegenüberstellungen.

- Versuchsreihe 1:  
Lang-Lkw vom Typ 2 (7 Achsen, 40 t zGG)  
versus  
Sattelkraftfahrzeug (5 Achsen, 40 t zGG)

- Versuchsreihe 2:  
Lang-Lkw vom Typ 3 (8 Achsen, 40 t zGG)  
versus  
Sattelkraftfahrzeug (5 Achsen, 40 t zGG)
- Versuchsreihe 3:  
Lang-Lkw vom Typ 3 (6 Achsen, 40 t zGG)  
versus  
Sattelkraftfahrzeug (4 Achsen, 36 t zGG)

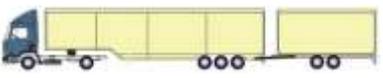
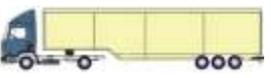
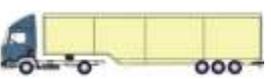
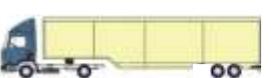
Die Fahrzeuge werden jeweils über die zur Verfügung stehende Ladefläche gleichmäßig beladen. Details zu den Fahrzeugen, deren jeweilige Leermassen, Beladungen sowie ABS-Konfigurationen

sind in Tabelle 1 abgebildet.

### 3.3.2 Messaufbau und Testgelände

Die Bremsweguntersuchungen wurden am 11. Juni 2016 auf dem ehemaligen Fliegerhorst in Leipheim durchgeführt. Für die Messungen stand ein 1,3 km langer, gerader und ebener Abschnitt zur Verfügung. Der Untergrund besteht aus rauen Betonplatten. Alle gültigen Messungen wurden auf trockenem Untergrund durchgeführt.

Um vergleichbare und reproduzierbare Messer-

	Lang-Lkw	Lkw herkömmlicher Bauart		
1	<b>Lang-Lkw-Typ 2 (7 Achsen)</b> (Kühlfahrzeug) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sattelzugmaschine, 2-achsig, 4S/4M</li> <li>- Sattelanhängen, 3-achsig, 4S/2M</li> <li>- Zentralachsanhänger, 2-achsig, 4S/3M</li> </ul> 	<b>Sattelkraftfahrzeug (5 Achsen)</b> (Kühlfahrzeug) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sattelzugmaschine, 2-achsig, 4S/4M</li> <li>- Sattelanhängen, 3-achsig, 4S/2M</li> </ul> 		
	Leergewicht	24,6 t	Leergewicht	17,8 t
	Ladevolumen	130 m <sup>3</sup>	Ladevolumen	85 m <sup>3</sup>
	Beladung	15,4 t	Beladung bei ca. 120 kg/m <sup>3</sup>	10,2 t
	Dichte der Ladung bei maximaler Beladung	ca. 120 kg/m <sup>3</sup>		
	Gesamtgewicht	40,0 t	Gesamtgewicht	28,0 t
	Mittlerer gemessener Bremsweg aus 80 km/h	37,9 m	Mittlerer gemessener Bremsweg aus 80 km/h	35,3 m
2	<b>Lang-Lkw-Typ 3 (8 Achsen)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Motorwagen, 3-achsig, 6S/5M</li> <li>- Dolly, 2-achsig, 2S/2M-SLV</li> <li>- Sattelanhängen (Koffer), 3-achsig, 2S/2M</li> </ul> 	<b>Sattelkraftfahrzeug (5 Achsen)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sattelzugmaschine, 2-achsig, 4S/4M</li> <li>- Sattelanhängen (Koffer), 3-achsig, 2S/2M</li> </ul> 		
	Leergewicht	23,9 t	Leergewicht	17,5 t
	Ladevolumen	130 m <sup>3</sup>	Ladevolumen	85 m <sup>3</sup>
	Beladung	16,1 t	Beladung bei ca. 125 kg/m <sup>3</sup>	10,7 t
	Dichte der Ladung bei maximaler Beladung	ca. 125 kg/m <sup>3</sup>		
	Gesamtgewicht	40,0 t	Gesamtgewicht	28,2 t
	Mittlerer gemessener Bremsweg aus 80 km/h	40,4 m	Mittlerer gemessener Bremsweg aus 80 km/h	37,6 m
3	<b>Lang-Lkw-Typ 3 (6 Achsen)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Motorwagen, 2-achsig, 4S/4M</li> <li>- Dolly, 2-achsig, 2S/2M-SLV</li> <li>- Sattelanhängen, 2-achsig, 2S/2M</li> </ul> 	<b>Sattelkraftfahrzeug, 4-achsig</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sattelzugmaschine, 2-achsig, 4S/4M</li> <li>- Sattelanhängen, 2-achsig, 2S/2M</li> </ul> 		
	Leergewicht	20,4 t	Leergewicht	14,0 t
	Ladevolumen	150 m <sup>3</sup>	Ladevolumen	100 m <sup>3</sup>
	Beladung	19,6 t	Beladung bei ca. 130 kg/m <sup>3</sup>	12,9 t
	Dichte der Ladung bei maximaler Beladung	ca. 130 kg/m <sup>3</sup>		
	Gesamtgewicht	40,0 t	Gesamtgewicht	26,9 t
	Gemessener Bremsweg aus 80 km/h	38,7 m	Gemessener Bremsweg aus 80 km/h	35,4 m

Tab. 1 Gegenüberstellung von Fahrzeugkombinationen für Bremsweguntersuchungen

gebnisse zu erzielen, wurde je Fahrzeug folgende Prozedur durchgeführt. Angestrebt waren mindestens zwei Messungen je Fahrzeug.

- Beschleunigung der Fahrzeuge auf mindestens 82 km/h
- Bremspedalschlag und Halten der maximalen Bremspedalkraft, sodass das ins EBS eingesteuerte Bremsignal unmittelbar auf seinen Maximalwert anschwillt und das Fahrzeug mit seiner maximalen Bremsleistung verzögert.
- Messung des Bremsweges ab 80-km/h-Durchgang bis Fahrzeugstillstand

Die Verzögerung der Fahrzeuge wurde redundant durch ein an den Zugfahrzeugen installiertes 100Hz-GPS-System für automotiv Anwendungen (TBJ-Dynamische Messtechnik 2016) sowie durch ein ortsfestes optisches Messsystem gemessen, das als Rückfallebene diente.

Das optische Messsystem besteht aus einer 120Hz-Kamera sowie auf der Bremsstrecke angebrachten Wegmarkierungen, was als Absicherung der GPS-Messung eine Bild-für-Bild-Auswertung von zurückgelegten Distanzen je Zeiteinheit ermöglicht.

### 3.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse aller durchgeführten Messungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Für die Versuchsreihe 1 konnten drei Messungen je Fahrzeug durchgeführt werden. Für Versuchsreihe 2 wurden wie vorgesehen zwei Messungen je

Fahrzeug durchgeführt. In Versuchsreihe 3 waren die ersten drei Messungen am Sattelkraftfahrzeug ungültig (gelöste Bremse, Störung auf Messtrecke). Aufgrund einer aufziehenden Regenfront konnte in Versuchsreihe 3 keine zweite gültige Messung für das Sattelkraftfahrzeug eingefahren werden. Bei den darauffolgenden Bremsungen des Lang-Lkw ist die zweite Messung ebenfalls ungültig, da Regen einsetzte.

#### 3.4.1 Lang-Lkw vom Typ 2 versus Sattelkraftfahrzeug

In Versuchsreihe 1 wurde ein Lang-Lkw vom Typ 2 mit 7 Achsen mit einem Sattelkraftfahrzeug mit 5 Achsen verglichen. Um aus den Lang-Lkw-Fahrzeugmodulen die Sattelkraftfahrzeugkonfiguration herzustellen, wurde vom Lang-Lkw der Zentralachsanhänger abgehängt. Hierdurch wurde eine optimale Vergleichbarkeit zwischen Lang-Lkw und Sattelkraftfahrzeug ermöglicht, da kein Fahrzeugteil ersetzt werden musste. Mögliche ungewollte Parameteränderungen beispielsweise durch unterschiedliche Bereifungen oder Bremsausrüstungen können somit ausgeschlossen werden.

Bei dem Lang-Lkw handelt es sich um ein Kühlfahrzeug. Das Leergewicht beläuft sich auf 24,6 t. Das Fahrzeug wurde mit 15,4 t Zuladung gleichmäßig über seine Ladelänge auf 40 t Gesamtgewicht beladen. Dabei teilte sich die Ladung etwa im Verhältnis 2:1 auf Sattelanhänger und Zentralachsanhänger. Bei abgekoppeltem Zentralachsanhänger ergab sich für das Sattelkraftfahrzeug als Vergleichs-Kombination in beladenem Zustand ein Gesamtgewicht von 28 t.

Für den Lang-Lkw vom Typ 2 wurde ein mittlerer Bremsweg von 37,9 m gemessen. Die einzelnen

	Fahrzeug   Anzahl der Achsen   Gesamtgewicht   Bremsung	gemessener Bremsweg	mittlerer Bremsweg
1	Lang-Lkw-Typ 2   7A   40t   Bremsung 1	37,7 m	37,9 m
	Lang-Lkw-Typ 2   7A   40t   Bremsung 2	38,1 m	
	Lang-Lkw-Typ 2   7A   40t   Bremsung 3	37,9 m	
	Sattelkraftfahrzeug   5A   28t   Bremsung 1	34,9 m	35,3 m
	Sattelkraftfahrzeug   5A   28t   Bremsung 2	36,1 m	
	Sattelkraftfahrzeug   5A   28t   Bremsung 3	35,0 m	
2	Lang-Lkw-Typ 3   8A   40t   Bremsung 1	41,1 m	40,4 m
	Lang-Lkw-Typ 3   8A   40t   Bremsung 2	39,6 m	
	Sattelkraftfahrzeug   5A   28t   Bremsung 1	38,8 m	37,6 m
	Sattelkraftfahrzeug   5A   28t   Bremsung 2	36,5 m	
3	Lang-Lkw-Typ 3   6A   40t   Bremsung 1	38,7 m	38,7 m
	Lang-Lkw-Typ 3   6A   40t   Bremsung 2 (ungültig, Nässe)	(48,9 m)	
	Sattelkraftfahrzeug   4A   27t   Bremsung 1 (ungültig)	-	35,4 m
	Sattelkraftfahrzeug   4A   27t   Bremsung 2 (ungültig)	-	
	Sattelkraftfahrzeug   4A   27t   Bremsung 3 (ungültig)	-	
	Sattelkraftfahrzeug   4A   27t   Bremsung 4	35,4 m	

Tab. 2 Gemessene und mittlere Bremswege aller durchgeführter Messungen

gemessenen Bremswege streuten hierbei nur geringfügig. Der höchste und der niedrigste Bremsweg weisen eine Differenz von unter 0,5 m auf. Für das Sattelkraftfahrzeug konnte ein mittlerer Bremsweg von 35,3 m gemessen werden. Die Differenz zwischen minimalem und maximalem Messwert liegt bei etwa 1 m.

Die Messungen zeigen somit einen geringfügig längeren Bremsweg des Lang-Lkw mit 40 t Gesamtmasse im Vergleich zum Sattelkraftfahrzeug mit 28 t Gesamtmasse. Die Differenz beträgt etwa 2,5 m, bzw. bezogen auf den Bremsweg des Sattelkraftfahrzeugs etwa 7 %.

### 3.4.2 Lang-Lkw vom Typ 3 versus Sattelkraftfahrzeug

In Versuchsreihe 2 wurde ein Lang-Lkw vom Typ 3 mit 8 Achsen mit einem Sattelkraftfahrzeug mit 5 Achsen verglichen. Beide Fahrzeuge teilten sich denselben Sattelanhänger. Die ziehenden Einheiten unterschieden sich. Diese bildeten ein Motorwagen mit Untersetzachse beim Lang-Lkw und eine Sattelzugmaschine beim Sattelkraftfahrzeug.

Das Leergewicht des Lang-Lkw vom Typ 3 beläuft sich auf 23,9 t und ist damit geringfügig höher als bei ähnlichen Typ 3 Lang-Lkw. Das höhere Leergewicht ist in einer relativ schweren Untersetzachse sowie einem Kofferaufbau des Sattelanhängers begründet. Der Lang-Lkw wurde mit 16,1 t gleichmäßig über die Ladelänge auf 40 t Gesamtgewicht ausgeladen. Das Verhältnis der Ladelängen beträgt zwischen Sattelanhänger und Motorwagenaufbau wiederum etwa 2:1. Das Sattelkraftfahrzeug als Vergleichsfahrzeug erreichte damit ein Gesamtgewicht von ca. 28 t. Das Fahrzeug ist somit dem Vergleichsfahrzeug aus Versuchsreihe 1 bezüglich Achskonfiguration und Gesamtmasse ähnlich.

Für den Lang-Lkw vom Typ 3 wurde aus zwei Messungen ein mittlerer Bremsweg von 40,4 m gemessen. Die zweimalige Messung des Bremsweges des Sattelkraftfahrzeugs ergab einen mittleren Wert von 37,6 m, jedoch mit einer Differenz zwischen beiden Messwerten von etwa 2 m.

Auch bei Vergleichsmessung 2 wurde somit ein geringfügig längerer Bremsweg bei dem 40 t schweren Lang-Lkw im Vergleich zu einem 28 t schweren Sattelkraftfahrzeug gemessen. Der Bremsweg ist damit um etwa 2,8 m bzw. 7 % länger.

Der mittlere Bremsweg beider Kombinationen liegt etwa 2 m oberhalb jener aus Versuchsreihe 1. Das heißt, dass die festgestellten Unterschiede zwischen Lang-Lkw und Vergleichsfahrzeug in etwa der Größe liegen, wie sie auch als Streuung inner-

halb der gleichen Messreihe eines Fahrzeugs auftreten.

### 3.4.3 Lang-Lkw vom Typ 3 mit verminderter Achszahl versus Sattelkraftfahrzeug

In Versuchsreihe 3 wurde ein Lang-Lkw vom Typ 3 mit 6 Achsen mit einem Sattelkraftfahrzeug mit 4 Achsen verglichen. Analog zu Versuchsreihe 2 kam für beide Fahrzeuge der Versuchsreihe derselbe 2-achsige Sattelanhänger inklusive Ladung zum Einsatz.

Der Lang-Lkw besitzt ein Eigengewicht von 20,4 t und wurde auf 40 t Gesamtmasse über die zur Verfügung stehende Ladelänge gleichmäßig mit 19,6 t beladen. Das Sattelkraftfahrzeug kam damit auf eine Gesamtmasse von etwa 27 t.

Für den Lang-Lkw wurde ein Bremsweg von 38,7 m gemessen. Der gemessene Bremsweg des Sattelkraftfahrzeugs beläuft sich auf 35,4 m.

Wie in den vorausgegangenen Versuchsreihen weist der Lang-Lkw mit 40 t Gesamtmasse im Vergleich zum Sattelkraftfahrzeug mit 27 t Gesamtmasse einen geringfügig größeren Bremsweg auf. Die Differenz beträgt rund 3,3 m bzw. 10 % des Bremsweges des Sattelkraftfahrzeugs.

Zur zweiten Bremswegmessung des Lang-Lkw setzte bereits Regen ein. Dies führte zu einem rund 10 m längeren Bremsweg. Die Messung war damit ungültig.

### 3.4.4 Diskussion

Der verwendete Messaufbau mit den resultierenden Streuungen der Bremswege eines Fahrzeugs über mehrere Bremsungen hinweg erwies sich aber als hinreichend für den angestrebten Vergleich der Aufgabenbeschreibung.

Die Ergebnisse sind jedoch vor dem Hintergrund der Messungenauigkeit des Versuchsaufbaus zu diskutieren. Unter Berücksichtigung der Streuungen der Bremswege wiederholter einzelner Messungen je Fahrzeug (bspw. +/-1,2 m in Versuchsreihe 2) ist eine Toleranz von etwa +/- 1,5 m anzusetzen.

Aufgrund der geringen Unterschiede in den Bremswegen und der relativ geringen Anzahl an Bremsungen kann aus den hier durchgeführten Versuchsreihen kein Rückschluss auf den Einfluss unterschiedlicher ABS-Konfiguration gezogen werden. Jedoch empfiehlt ein Hersteller von Bremsystemen (siehe Ausführungen im folgenden Kapitel) die Sensierung und Druckregelung (Modulator) von 2/3 aller Anhängerachsen zur Verkürzung der Bremswege – dies gilt jedoch nicht explizit für Lang-Lkw, sondern für alle Lkw mit Anhänger. Bei

einem 3-achsigen Sattelanhänger entspräche dies einer 4S/4M-Konfiguration.

In Tabelle 3 sind die Verzögerungen aller Bremsungen in den drei Versuchsreihen (V) sowohl für die Lang-Lkw (LLKW) als auch für die Sattelkraftfahrzeuge (SKF) in Geschwindigkeitsintervallen von 10 km/h aufgetragen, jeweils mit Angabe der Anzahl der Achsen (A). Die Verzögerungen streuen bei allen Messungen in allen Geschwindigkeitsintervallen um über  $1 \text{ m/s}^2$ , in den oberen Geschwindigkeitsintervallen ist die Streuung mit teilweise über  $2 \text{ m/s}^2$  am stärksten. Insbesondere zeigten sich in Versuchsreihe 1 beim Sattelkraftfahrzeug sehr hohe Verzögerungen, die gleichzeitig stark streuen (s. Tabelle 3). Demgegenüber wiesen beispielsweise die ersten drei Messungen im Bremsweg nur eine äußerst geringe Streuung von 0,4 m auf (vgl. Tabelle 2). Die Verzögerungen liegen im Mittel bei allen Fahrzeugen und Bremsungen im Bereich von 6 bis  $7 \text{ m/s}^2$ .

Alle auf 40 t Gesamtmasse beladenen Lang-Lkw weisen im betrachteten „Substitutions“-Szenario einen geringfügig höheren Bremsweg im Vergleich zu den durch sie ersetzten Sattelkraftfahrzeugen auf. Die Differenz der Bremswege über die Versuchsreihen hinweg liegt im Bereich von rund 2,5...3,3 m bzw. 7...10 % und damit knapp oberhalb der Nachweisgrenze des Versuchsaufbaus. Auch die Unterschiede über die Versuchsreihen hinweg liegen in diesem Bereich, sodass beispielsweise das Sattelkraftfahrzeug mit 28 t Gesamtmasse in Versuchsreihe 2 den annähernd gleichen Bremsweg aufweist wie der Lang-Lkw mit 40 t in Versuchsreihe 1.

Die etwas längeren Bremswege der Lang-Lkw mit 40 t gegenüber den herkömmlichen Sattelkraftfahrzeugen mit 28 t widersprechen jedoch der diskutierten Annahme von Winkelbauer (2009), wonach der Bremsweg in erster Näherung vom Gewicht unabhängig sei. Als Modell zur Erklärung für die vorliegende Versuchsreihe ist diese erste Näherung offenbar unzureichend.

Den hier erzielten Resultaten sind für eine Gesamtschau aber auch die Ergebnisse der Untersuchungen von Süßmann et al. (2014) im Rahmen der Vorgängerstudie gegenüberzustellen. Bei gleicher maximaler Fahrzeuggesamtmasse von 40 t wies dort im „worst case“-Szenario der Lang-Lkw mit 36 m im Vergleich zum Sattelkraftfahrzeug mit 44 m einen kürzeren Bremsweg auf.

Bei ganzheitlicher Betrachtung des „worst case“-Szenarios in Süßmann et al. (2014) sowie des „Substitutions“-Szenarios in dieser Studie kann abschließend von vergleichbaren Bremswegen von Lang-Lkw im Vergleich zu Lkw herkömmlicher Bauart ausgegangen werden.

Eine Gegenüberstellung von allen betrachteten Lang-Lkw über die Versuchsreihen hinweg zeigt vergleichbare Bremswege im Bereich von 38...40 m. Dies schließt im untersuchten Fall auch den Lang-Lkw vom Typ 3 mit 6 Achsen ein. Die Reduktion der Achszahl ging hier mit keiner Verlängerung des Bremsweges einher.



Tab. 3 Gemessene Verzögerungen in Geschwindigkeitsintervallen von 10 km/h

## 4 AP3 - Ermittlung zur Wirksamkeit von EVSC in allen Fahrzeugen der Kombination

### 4.1 Problemstellung und Zielsetzung

Gemäß der EG-Verordnung Nr. 661/2009 zur Verbesserung der Verkehrssicherheit vom 13. Juli 2009 ist zur EG-Typgenehmigung von neuen Typen der Fahrzeugklassen N3 und O3 ab 01.11.2011<sup>1</sup> und für Neufahrzeuge dieser Klassen ab 01.11.2014 ein elektronisches Fahrdynamikregelungssystem EVSC (Electronic Vehicle Stability Control) vorgeschrieben.

Hierunter fallen sinngemäß auch Nutzfahrzeugkombinationen mit Überlange, die im Rahmen der LKWÜberlStVAusnV als Lang-Lkw zugelassen werden können (siehe auch LKWÜberlStVAusnV § 5 Absatz 8). Da sich die Kinematik dieser Fahrzeugkombinationen teilweise signifikant von konventionellen Fahrzeugkombinationen unterscheidet, ist zu prüfen, ob eine Anpassung der EVSC-Funktionalität auf Basis konventioneller Fahrzeuge erforderlich ist, um eine vergleichbare Fahrsicherheit durch elektronische Stabilisierungseingriffe zu gewährleisten.

Im folgenden Arbeitspaket sollen ein Überblick und eine Bewertung der Funktionalität von EVSC-Systemen in Lang-Lkw geliefert werden. Auf Basis von gesetzlichen Vorschriften bezüglich der Funktionalität und technischen Ausprägung von EVSC-Systemen in konventionellen Lkw wird zum einen durch Recherche des Stands der Wissenschaft und zum anderen durch Expertengespräche mit Herstellern von EVSC-Systemen für Lang-Lkw eine Bewertung abgeleitet, die den bisherigen EVSC-Absicherungsprozess bei Lang-Lkw beurteilt und gegebenenfalls Handlungsempfehlungen für zusätzliche Absicherungsmaßnahmen identifiziert.

## 4.2 Stand der Wissenschaft und Technik

### 4.2.1 Rechtliches zur Typgenehmigung von neuen Typen von Fahrzeugen und von neuen Fahrzeugen

Neben der genannten EG-Verordnung Nr. 661/2009, die die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Anhängern hinsichtlich ihrer allgemeinen Sicherheit definiert und hierunter bezüglich EVSC-Systemen die verpflichtende Einführung derselben in der EG regelt, wird in der UN/ECE Regelung Nr. 13 Änderungsserie 11; ABl. L 297/1 vom 13.11.2010 (nachfolgend UN/ECE R13 genannt) das Verfahren zur Typgenehmigung neuer Fahrzeuge, hierunter auch schwere Nutzfahrzeuge und Anhänger, hinsichtlich der Bremsen und des EVSC detailliert beschrieben. (UN/ECE 2010)

Das EVSC-System muss nach UN/ECE Regelung Nr. 13 für alle Fahrzeugklassen die Funktionen Richtungsstabilisierung und Überschlagregelung umfassen, die folgende Funktionalitäten beinhalten:

- Die Richtungsstabilisierung umfasst eine Funktion des EVSC-Systems, die den Fahrer im Rahmen der physikalischen Grenzen des Fahrzeugs dabei unterstützt, bei Unter- oder Übersteuern die gewünschte Fahrtrichtung beizubehalten, und die bei einem Anhänger dazu beiträgt, diesen in der Fahrtrichtung des Zugfahrzeugs zu halten
- Die Überschlagregelung umfasst eine Funktion des EVSC-Systems, die auf ein bevorstehendes Überrollen reagiert, um das Kraftfahrzeug, die Zugfahrzeug-Anhänger-Kombination oder den Anhänger bei fahrdynamischen Manövern im Rahmen der physikalischen Grenzen des Fahrzeugs zu stabilisieren.

Zur Realisierung der Funktion Richtungsstabilisierung in Zugfahrzeugen werden spezifische Anforderungen an das EVSC-System wie folgt definiert:

- Die Raddrehzahlen des linken und des rechten Rads an jeder Achse oder alternativ an einer Achse jeder Achsgruppe müssen durch selektive Bremsung reduziert werden können, wenn durch Auswertung des tatsächlichen Fahrzeugverhaltens eine Abweichung im Vergleich zu dem vom Fahrer angeforderten Fahrzeugverhalten detektiert wird
- Die Bestimmung des tatsächlichen Verhaltens des Zugfahrzeugs erfolgt neben den

<sup>1</sup> Für Fahrzeuge der Klasse N3 „mit 2 und 3 Achsen mit pneumatischer Signalübertragung und ABS“ und O3 „kombinierte Achslast zwischen 3,5 und 7,5 t“ gilt gesondert der 11. Juli 2012

gemessenen Raddrehzahlen auf Basis der Messwerte des Gierwinkels und der Querschleunigung

- Die Bestimmung des vom Fahrer angeforderten Fahrverhaltens erfolgt durch Auswertung der Lenk-, Brems- und Fahrpedaleingaben des Fahrers.

Zur Realisierung der Funktion Überschlagregelung in Zugfahrzeugen werden spezifische Anforderungen an das EVSC-System wie folgt definiert:

- Die Raddrehzahlen bei mindestens zwei Rädern jeder Achse oder Achsgruppe müssen durch selektive Bremsung oder durch automatisch gesteuerte Bremsung reduziert werden können, wenn aufgrund der Auswertung des tatsächlichen Fahrzeugverhaltens ein Fahrzustand erkannt wird, der zu einem Überschlag des Fahrzeugs führen kann
- Die Bestimmung des tatsächlichen Verhaltens des Zugfahrzeugs erfolgt anhand der Werte der Reifenaufstandskraft (oder mindestens der Querschleunigung und der Raddrehzahlen) und der Steuereingaben des Fahrers an das Bremssystem und den Motor.

Darüber hinaus bestehen für beide Funktionen des EVSC-Systems die Anforderungen:

- Die Motorleistung muss durch das EVSC-System beeinflussbar sein
- Die Betriebsbremsen eines potentiell mitgeführten Anhängers müssen über die jeweilige(n) Steuerleitung(en) fahrerunabhängig durch das EVSC-System zu betätigt sein.

Bezüglich mitgeführter Anhängerfahrzeuge werden wiederum zur Realisierung der Funktion Richtungsstabilisierung spezifische Anforderungen an das EVSC-System wie folgt definiert:

- Die Raddrehzahlen des linken und des rechten Rads an jeder Achse oder einer Achse jeder Achsgruppe müssen durch selektive Bremsung reduziert werden können, wenn aufgrund der Auswertung des tatsächlichen Verhaltens des Anhängers im Vergleich zu einem vom Fahrer angeforderten Fahrzeugverhalten eine Abweichung detektiert wird.

Zur Realisierung der Funktion Überschlagregelung in Anhängerfahrzeugen werden spezifische Anforderungen an das EVSC-System wie folgt definiert:

- Die Raddrehzahlen bei mindestens zwei Rädern jeder Achse oder Achsgruppe müssen durch selektive Bremsung oder

durch automatisch gesteuerte Bremsung reduziert werden können, wenn aufgrund der Auswertung des tatsächlichen Verhaltens des Anhängers ein Fahrzustand erkannt wird, der zu einem Überschlag des Fahrzeugs führen kann.

Die Bestimmung des tatsächlichen Verhaltens des Anhängers bzw. der Anhänger erfolgt anhand der Werte der Reifenaufstandskraft oder mindestens der Querschleunigung und der Radgeschwindigkeiten.

Die Wirksamkeit des EVSC-Systems muss für den zu genehmigenden Fahrzeugtyp (Zugfahrzeug oder Anhängerfahrzeug) dem technischen Dienst durch dynamische Fahrmanöver nachgewiesen werden. Da für den Nachweis keine einheitlichen Prüfverfahren vereinbart sind, muss nach UN/ECE R13 das Nachweisverfahren zwischen dem Fahrzeughersteller und dem technischen Dienst abgesprochen werden und die kritischen Bedingungen der Funktion Richtungsstabilisierung und der Funktion Überschlagregelung enthalten bzw. adressieren.

Zum Nachweis der Wirkung der Funktion Richtungsstabilisierung kann eines oder mehrere der folgenden dynamischen Manöver ausgeführt werden:

- Prüfung der Verringerung des Bahnradius
- Lenkwinkelsprungtest
- Sinuslenkmanöver mit Haltezeiten
- Wende (J-Turn)
- Einfacher Fahrspurwechsel bei Fahrspuren mit unterschiedlichem Kraftschlussbeiwert ( $\mu$ -split)
- Doppelter Fahrspurwechsel
- Rückwärtsfahrprüfung oder „Fish-Hook-Test“
- Sinuslenkmanöver mit einer Periode (asymmetrisch) oder Lenkwinkelimpulstest

Zum Nachweis der Wirkung der Funktion Überschlagregelung kann eines oder mehrere der folgenden dynamischen Manöver ausgeführt werden:

- Stationäre Kreisfahrt
- Wende (J-Turn)

Die Erfüllung der in UN/ECE R13 definierten Regelungen zur Typgenehmigung von Fahrzeugen hinsichtlich EVSC-Funktionalität sind dem technischen Dienst für jeden Fahrzeugtyp einzeln nachzuweisen. Eine Überprüfung der Funktionalität des EVSC-Systems in einer Fahrzeugkombination (Zugfahrzeug und gekuppelte/s Anhängerfahrzeug/e) wird nicht gefordert. Für konventionelle

Gliederzüge und Sattelkraftfahrzeuge besteht weitreichende Expertise bezüglich der fahrdynamischen Stabilität dieser Fahrzeuge seitens der Hersteller und der Prüforganisationen. Da die im Rahmen der LKWÜberlStVAusnV zugelassenen Lang-Lkw jedoch die geometrischen Ausmaße konventioneller Lkw teilweise wesentlich übertreffen und zusätzliche Gelenkpunkte aufweisen, gelten diese Stabilitätserkenntnisse nicht zwangsläufig analog für Lang-Lkw.

Da auch im europäischen Ausland vergleichbare Lang-Lkw auf den Straßen vorzufinden sind, mitunter schon seit vielen Jahren im regulären Zulassungsbetrieb, werden die Fragestellungen bezüglich möglicher Kombinationstypen und deren Typisierung auch bereits auf UN/ECE-Ebene durch ein Expertengremium zu „Modular Vehicle Combinations“ (MVC) als Arbeitsgruppe der Working Party on Brakes and Running Gear bearbeitet (UN/ECE 2016). Bisher wurden hier jedoch noch keine Randbedingungen von möglichen Kombinationstypen oder Ansätze zur fahrdynamischen Bewertung in kombinierten Prüfverfahren publiziert. Nach Abschluss der Arbeiten zu MVC ist eine Übernahme dieser Prüfvorschriften für Lang-Lkw jedoch zu empfehlen.

Im Folgenden sollen zuerst aus dem Stand der Wissenschaft allgemeine Aussagen über die fahrdynamische Stabilität von überlangen Nutzfahrzeugkombinationen gewonnen und objektive Stabilitätsmaße identifiziert werden. Daraufauf soll durch Experteninterviews mit den Herstellern von EVSC-Systemen für Lang-Lkw identifiziert werden, welche Erprobungsumfänge und Absicherungsmaßnahmen unternommen wurden, um die ordnungsgemäße Funktion der Systeme zu gewährleisten und wo gegebenenfalls aus Sicht der Experten Handlungsbedarf seitens des Gesetzgebers besteht. Abschließend sollen die Aussagen der Hersteller der EVSC-Systeme aggregiert aufgezeigt und relevante Punkte bezüglich EVSC-Auslegung und -Erprobung abschließend diskutiert werden.

#### 4.2.2 Bewertung der fahrdynamischen Stabilität von Nutzfahrzeugen

Die fahrdynamische Stabilität von Nutzfahrzeugkombinationen weist im Vergleich zu Solo-Fahrzeugen in Bezug auf dynamisches und stationäres Antwortverhalten auf Fahrereingaben oder Fahrbahnanregung ein prinzipiell kritischeres Verhalten auf. Aufgrund zusätzlicher Freiheitsgrade (Knickpunkte), potentiell höherer Gesamtmasse und kinematischer Kopplung sowie Kraft- und zum Teil auch Momentenübertragung zwischen Zugfahrzeug und Anhängerfahrzeugen ergeben sich im Vergleich zu Einzelfahrzeugen neue Instabili-

tätsphänomene. Diese lassen sich nach (Verma et al. 1980) und (Gerum et al.) für die Kombination von Zugfahrzeug und Sattelanhänger wie folgt beschreiben:

- *Querstellen*, auch *Jackknifing* genannt, zeichnet sich durch große Schwimmwinkel bzw. große relative Gierbewegungen zwischen Zugfahrzeug und Anhänger/n aus und zählt zu den häufigsten Ursachen für Hochgeschwindigkeitsunfälle (Kang und Deng 2007; Gerum et al. 2003)
- Seitliche *Pendelbewegung* der Anhänger. Dabei führt der Anhänger eine oszillierende Bewegung um die Gierachse bei höheren Geschwindigkeiten aufgrund niedriger Systemdämpfung aus. Dieses Verhalten, bedingt aus der kinematischen Kopplung zwischen Zugfahrzeug und Anhänger/n, ist abhängig von Systemparametern und Betriebsbedingungen wie Fahrgeschwindigkeit und Fahrbahnreibung.
- *Überrollen* bezeichnet das Umkippen des Zugfahrzeugs, eines Anhängers oder der Fahrzeugkombination infolge der Einwirkung äußerer Kräfte auf den Fahrzeugverbund. Diese Kräfte können z. B. vom Fahrzustand (Querbeschleunigung) oder den Fahrbahneigenschaften (Querneigung, loser Untergrund) herrühren.

Diese Instabilitätsdefinitionen finden im Folgenden aufgrund ihrer allgemeinen Beschreibung auch für andere Kombinationstypen als Sattelkraftfahrzeug Anwendung.

Ellis (1994) zählt zur Instabilität auch den Verlust der Manövrierbarkeit und beschränkt sich nicht auf klassische Stabilitätsdefinitionen dynamischer Systeme. Demnach kann das Fahrer-Fahrzeug-System instabil bzw. die resultierende Trajektorie unerwünscht sein, auch wenn das Fahrzeug selbst gemäß mathematischer Definitionen stabil ist. Daher ergeben sich für Fahrzeug-Anhänger-Kombinationen mit zwei Gelenken zusätzliche Instabilitäten:

- *Geradeausschieben des Zugfahrzeugs* bei blockierter Vorderachse. Dies ist zwar eine stabile Fahrzeugbewegung, die Trajektorie ist aber unerwünscht, da das Zugfahrzeug untersteuert
- *Verlust der Lenkbarkeit und Geradeausschieben bei Schrägstellen* des Dolly-Anhängers.

Sparks und Berthelot (1989) untersuchten Lkw-Unfälle mit den Ursachen *Querstellen* oder *Überrollen* und kamen zu dem Schluss, dass selbst sehr geübte Fahrer, die durch ein Warnsystem un-

terstützt werden, nur ca. die Hälfte der Unfälle hätten verhindern können. Kang und Deng (2007) stellen weiterhin fest, dass sich die *Pendelbewegung* von Anhängern aufgrund des großen Phasenverzugs zwischen Fahrereingabe und Anhängerreaktion nur schwer durch den Fahrer beeinflussen lässt. Beide Untersuchungen unterstreichen die hohe Bedeutung von EVSC-Systemen in Nutzfahrzeuggespannen und insbesondere bei Lang-Lkw.

Bei Einzelfahrzeugen wird das Sicherstellen der Stabilität typischerweise in Form von Handlungseigenschaften und Fahrerwahrnehmung evaluiert. Im Gegensatz dazu existiert für Fahrzeug-Anhänger-Kombinationen bisher kein Konsens bezüglich zu verwendender Performancekennzahlen oder Evaluationskriterien zur Systembewertung (Kang und Deng 2007).

Dennoch haben sich in der Literatur folgende Kennwerte zur Bewertung vorgenannter Instabilitäten und gewünschter Fahrzeugeigenschaften durchgesetzt (Fancher und Winkler 2007):

- Querversatz bei Hochgeschwindigkeitslenkmanövern (z. B. bei einem Notausweichmanöver)
- Kippstabilität
- Eigenlenkgradient
- Rearward Amplification
- Querbeschleunigungs- und Gierreaktionszeiten des letzten Anhängers
- Dämpfungswert der Gierreaktion des letzten Anhängers

Obwohl sich für diese Kennwerte in der Literatur keine einheitlichen Grenzwerte finden lassen, ist ihre Aussagekraft zur Stabilitätsbewertung allgemein anerkannt (van de Molengraft-Luijten et al. 2012; Pinxteren 2009; Fancher et al. 2008; Fancher und Winkler 1992). So lassen sich zum Beispiel die Werte für Kippstabilität und Rearward Amplification als wesentliche Indikatoren zur Erklärung instabilitätsinduzierter Unfälle aus Unfalldatenbanken identifizieren (Mueller et al. 1999).

Die Rearward Amplification (RA) beschreibt dabei das Verhältnis der maximalen Querbeschleunigung des letzten Anhängers bezogen auf die maximale Querbeschleunigung des Zugfahrzeugs bzw. alternativ die maximale Gierrate des Anhängers zur maximalen Gierrate des Zugfahrzeugs innerhalb eines Manövers. Die RA ist abhängig von der Anregungsfrequenz der Fahrervorgabe und kann ihren fahrzeugtypischen Maximalwert in alltäglichen Fahrmanövern wie Fahrspurwechsel und Ausweichmanövern erreichen (Pinxteren 2009). Große Werte der RA wirken sich negativ auf die Kippsta-

bilität aus. Wenn beispielsweise die statische Kippstabilität mit  $4 \text{ m/s}^2$  bestimmt ist, liegt bei einer RA von 2 die anregende Querbeschleunigung, bei der man das Umkippen des hinteren Anhängers erwarten muss, lediglich bei  $2 \text{ m/s}^2$  im Zugfahrzeug. Zahlreiche Beiträge beschäftigen sich daher mit den Abhängigkeiten der RA von Fahrzeug- und Umweltparametern, sowie verschiedener Fahrzeug-Anhänger-Kombinationen bzw. mit geeigneten Messverfahren. (Süßmann et al. 2014; Wöhrmann 2008; Haldane und Bunker 2007; Ei-Gindy et al. 2001; Fancher und Winkler 1992, 2007; Kang und Deng 2007; van de Molengraft-Luijten et al. 2012)

In (Prem et al. 2001) sind folgende Empfehlungen zur Verbesserung der RA genannt:

- Anzahl der Gelenke (Anhänger) reduzieren
- Abstand des Schwerpunkts des Zugfahrzeugs zum Kupplungspunkt reduzieren
- Wankabstützung über Turntables an den Kupplungspunkten
- Hinteren Überhang des Kupplungspunktes reduzieren
- Deichsellänge von Dollys vergrößern
- Radstände der Anhänger vergrößern
- Reifen mit höheren Schräglaufsteifigkeiten verwenden

In (van de Molengraft-Luijten et al. 2012) und (Süßmann et al. 2014) wurde nachgewiesen, dass sich die RA beim einfachen Fahrspurwechsel für verschiedene Fahrzeugkombinationen um den Faktor 3,5 bzw. ca. 4 unterscheiden kann.

In der Literatur sind weiterhin viele Veröffentlichungen zu finden, die die fahrdynamische Stabilität von Nutzfahrzeugkombinationen verschiedener Konfigurationen analysieren und auch die Wirksamkeit von EVSC-Systemen mit einbeziehen. Charakteristische Kennwerte können allgemein helfen, anhand repräsentativer Fahrmanöver das Fahrverhalten einzelner Fahrzeugkombinationen objektiv zu bewerten und so einen Stabilitätsvergleich zwischen Fahrzeugvarianten (beispielsweise nach Adaption der Regelparameter im EVSC oder nach physikalischen Änderungen der Geometrie oder dem Aufbau des Gespanns) und zwischen Fahrzeugtypen zu ermöglichen. Dies motiviert, derartige Kennwerte zur Beurteilung der Fahrstabilisierungsfunktion zukünftig auch zur EG-Typgenehmigung von Lang-Lkw anzuwenden.

### 4.3 Methodisches Vorgehen

Das Kapitel Stand der Wissenschaft und Technik zeigt auf, dass gesetzliche Anforderungen an EVSC-Systeme bisher nur fahrzeugspezifisch, dabei zwar sowohl für ziehende als auch gezogene Einheiten, aber nicht für Fahrzeugkombinationen definiert sind und folglich auch keine gesamtheitlichen Anforderungen für EVSC-Systeme in Lang-Lkw enthalten sind. Die in der Literatur beschriebenen Instabilitätsphänomene von Nutzfahrzeugkombinationen - insbesondere die Untersuchungen, die sich mit der Stabilität von Nutzfahrzeugkombinationen mit Überlänge und höherer Tonnage befassen (Süßmann et al. 2014; Wöhrmann 2008; Haldane und Bunker 2007; Ei-Gindy et al. 2001; Fancher und Winkler 1992, 2007) - zeigen jedoch auf, dass Lang-Lkw eine höhere Dynamik bei querdynamischer Anregung entwickeln können als konventionelle Lkw. Durch Interviews mit Experten der Hersteller von EVSC-Systemen, die in Lang-Lkw zum Einsatz kommen, soll im vorliegenden Arbeitspaket ermittelt werden, welche bisherigen Absicherungsmaßnahmen seitens der Hersteller für die verbauten EVSC-Systeme getroffen wurden und ob die Systeme an die neuartigen Fahrzeugkombinationstypen angepasst und appliziert wurden, um sicheres Fahrverhalten von Lang-Lkw sicherzustellen.

In den Experteninterviews sollen u.a. folgende Fragenkomplexe adressiert und diskutiert werden:

- Steuerungs- und Regelungsprinzipien
- Erprobung und Absicherung
- Funktionsfähigkeit des EVSC-Systems bei Lang-Lkw

Die gewonnenen Informationen seitens der Hersteller werden anschließend in Relation zu den gesetzlichen Anforderungen bezüglich EVSC-Funktionalität und den Erkenntnissen aus der Literatur gesetzt und mögliche weitere Entwicklungspotentiale zur Stabilisierung von Lang-Lkw benannt.

### 4.4 Ergebnisse

Zunächst werden die Ergebnisse der Expertenbefragung in konsolidierter Form dargestellt. Abschließend werden die wesentlichen Ergebnisse der Befragung zusammengefasst und bewertet.

#### 4.4.1 Experteninterview

Es wurden Expertengespräche mit Vertretern zweier führender Bremssystemhersteller für Nutzfahrzeuge geführt; nachfolgend Hersteller A und Hersteller B genannt.

fahrzeuge geführt; nachfolgend Hersteller A und Hersteller B genannt.

#### Teil (A): Steuerungs- und Regelungsprinzipien

*Worin liegen die wesentlichen Unterschiede zwischen einem EVSC für Lang-Lkw (mehr als 1 Anhänger) zu konventionellen LKW-EVSC Systemen (max. 1 Anhänger)?*

- Hersteller A:  
Erweitertes Einspurmodell mit mehreren Anhängern. Masse wird berechnet oder gemessen und anschließend plausibilisiert und als Modelleingang verwendet.
- Hersteller B:  
Einspurmodell ohne Anhängermodellierung mit Anpassung der Regelschwellen auf Basis der geschätzten Gespannmasse und der Anzahl der Anhänger.

*Wie wird die Teilfunktion Richtungsstabilisierung (Über-/Untersteuern) realisiert?*

- Beide:  
Berechnung eines Sollverhaltens anhand eines Einspurmodells. Bei Abweichung vom Sollverhalten erfolgt eine radselektive Einbremsung im Zugfahrzeug (Erzeugung eines Differenzgiermoments) und gleichmäßige Bremsung der Anhänger (Streckung und Reduktion der Bewegungsenergie).

*Wie werden folgende Fahrzustände des/der Anhänger(s) adressiert?*

#### Jackknifing

- Hersteller A:  
Schätzung des Knickwinkels des ersten Anhängers durch erweitertes Einspurmodell. Bremsengriff am Anhänger mit maximal verträglichen Bremsdrücken. Zweiter Anhänger wird immer als stabil angenommen.
- Hersteller B:  
Keine Angabe

#### Pendelschwingungen

- Hersteller A:  
Phasenversetztes, seitenspezifisches Einbremsen der Anhänger nach Erkennung anhand der Querschleunigung. Ist für Lang-Lkw jedoch nicht stabilitätskritisch.
- Hersteller B:  
Bedämpfung von Pendelbewegungen im Zugfahrzeug. Keine Bedämpfung von Pendelbewegungen von Anhängern, da nicht detektierbar ohne Zusatzsensorik

(Gierratensensor). Eine Aufschaukelerkennung auf Basis der Querschleunigung mit Dämpfungsfunktion ist jedoch enthalten.

*Wie wird die Teilfunktion Überschlagregelung realisiert?*

- Beide:  
Die Überschlagregelung ist im Zugfahrzeug und Anhängern enthalten.
- Beide:  
Jedes Teilfahrzeug hat individuelle, vorparametrierte Querschleunigungsschwellen (Hersteller A: achlastabhängig), die durch kontinuierliche Radschlupfmessung bei gepulsten Testbremsungen ggf. korrigiert werden.  
  
Das Zugfahrzeug errechnet für sich und die Anhängerfahrzeuge spezifische, stationäre Querschleunigungsschwellen. Erreicht das Zugfahrzeug eine dieser Querschleunigungsschwellen (des Zugfahrzeugs, oder eines Anhängers), erfolgte eine Einbremsung des Gesamtfahrzeugs.
- Beide:  
Die Anhänger besitzen eine zusätzliche, autarke Überschlagregelungsfunktion, die unabhängig vom Zugfahrzeug bei Erreichen der vorparametrierten oder errechneten Querschleunigungsschwelle aktiv werden kann. Der Anhänger wird in diesem Falle gleichmäßig verzögert, das Zugfahrzeug wird indes über den Regeleingriff nach EBS22 (ISO 11992-2:2014 (E)) nur per CAN-Bus informiert, wenn die ABS Regelschwellen des Anhängers hierbei erreicht werden.

*Kommunikation mit den Anhängerfahrzeugen nach ISO 11992:*

*a) Welche für die EVSC-Funktion maßgeblich relevanten Größen werden von den Anhängern an das Zugfahrzeug übermittelt??*

- Beide: Gemäß EBS22 aus ISO 11992-2:2014 (E) (Auszug):
  - ABS-Status
  - Automatische Federspeicherbremsung aktiv
  - Spannungsversorgung ausreichend
  - Achslasten
  - Achsanzahl

- Querschleunigung
- Querschleunigungsgrenzen
- Achsabstände
- Raddrehzahlen
- Bauart des Anhängers

*Findet auf Basis vorgenannter Kommunikation eine Adaption der Reglerparameter statt?*

- Hersteller A:  
Für einige wenige Parameter findet dies bereits statt. Neue EVSC-Systeme, die gerade noch in der Entwicklung sind, adaptieren nach Plausibilisierung sehr viele Parameter.
- Hersteller B:  
Nein.

*Kann der Kombinationstyp durch Kodierung erkannt werden?*

- Hersteller A:  
Ja, ist aber derzeit nicht zuverlässig möglich aufgrund nicht verläSSLicher Kodierungen seitens der Anhängerhersteller. Wenn die gesendeten Daten plausibilisiert werden können, werden sie aber auch zur Regelung verwendet.
- Hersteller B:  
Kodierung der Anhängertypen auf dem CAN vorhanden. Prinzipielle Erkennung des Kombinationstyps wäre damit gegeben. Die Schwellwerte werden jedoch für das Grundgespann (Sattelkraftfahrzeug oder Gliederzug) ausgewählt und bei weiteren Anhängern typenspezifisch konservativ reduziert.

*Wie ist sichergestellt, dass das EVSC bei Lang-Lkw nach Zusammenstellen der Kombination funktioniert?*

- Beide:  
Durch Absicherung im Realversuch mit unterschiedlichen Beladungszuständen und Schwerpunktlagen für erfahrungsgemäß kritische Kombinationen.

*Welche Voraussetzungen müssen bei den Fahrzeugen der Kombination vorliegen?*

- Beide:  
Wenn die technischen Voraussetzungen des § 5 der LKWÜberlStVAusnV erfüllt sind, findet eine ordnungsgemäße EVSC-Funktion statt.

*Kann bewusst oder unbewusst durch Fehler beim Zusammenstellen eines Lang-Lkw die Situation entstehen, dass das EVSC nicht in allen Einheiten*

korrekt funktioniert? Wenn ja, wie kann man dem vorbeugen?

- Beide:  
Es kann keine Fehlfunktion des EVSC durch Fehler beim Zusammenstellen eines Lang-Lkw entstehen. Im Fehlerfalle eines Systems (z.B. ABS Ausfall) wird auf eine Basisregelung zurückgegriffen mit konservativeren Regelschwellen und Bremsdrücken. Die Performance des EVSC-Systems ist, wie auch bei konventionellen Lkw, hingegen schon davon abhängig, ob der Lkw gleichmäßig oder ungleichmäßig vom Fahrer beladen wurde.

Welche zusätzlichen Messgrößen würden Ihrer Meinung nach Vorteile für die EVSC-Teilfunktionen Richtungsstabilisierung und Überschlagregelung bringen?

- Hersteller A:  
Masseverteilung auf einzelne Teilfahrzeuge wäre wichtig für die Funktion Kippvermeidung  
Wichtiger als zusätzliche Daten ist die Verlässlichkeit vorhandener und spezifizierter Daten
- Hersteller B:  
Gierratensensoren in den Anhängern zur Knickwinkelschätzung / -plausibilisierung und zur Erkennung von Pendelschwingungen

### Teil (B): Erprobung und Absicherung

Wurde Ihr EVSC-System für alle Lang-Lkw-Typen getestet und appliziert? Inwieweit wurde simulative Absicherung betrieben?

- Hersteller A:  
Simulative Untersuchung nur punktuell. Absicherung wird maßgeblich im Realversuch betrieben. Folgende Typen wurden im Realversuch analysiert:
  - Motorwagen + Dolly + Sattelanhängen (Typ 3)
  - Motorwagen + Dolly + Sattelanhängen + Zentralachsanhänger (Typ 3 + Zentralachsanhänger)
  - Motorwagen + Dolly + B-Link + Sattelanhängen
  - Sattelzugmaschine + B-Link + Sattelanhängen (Typ 4)
  - Alles bis 76 Tonnen

- Hersteller B:  
Es wurden kritische Kombinationstypen untersucht

Welche Beladungszustände wurden untersucht?

- Hersteller A:  
Beladungsbrücken mit Stützrädern, Schwerpunkthöhe und Schwerpunktlängsposition der Ladung wurden systematisch verändert.
- Hersteller B:  
Beladungsvariation nach Testanforderungsprotokoll für EVSC.

Gibt es kritische/ungeschickte Kombinationen aus Beladung und Typ?

- Hersteller A:  
Ungleiche Masseverteilung. Je weiter hinten ein Anhänger angekuppelt wird, umso kritischer ist dessen Verhalten. Dies ist insbesondere bei Zentralachsanhängern, die nicht tiefgekuppelt sind, der Fall.
- Hersteller B:  
Fahrzeuge mit Zentralachshänger (Typ 2) sind prinzipiell die kritischsten Kombinationstypen, sind aber auch beherrschbar.

Welche Manöver wurden zur Analyse stationären und instationären Fahrverhaltens durchgeführt?

- Hersteller A:
  - Für Applikation deutlich mehr als in ECE-13 vorgeschrieben gemacht
  - J-Turn liefert Hauptkriterien für Regelsysteme auf  $\mu$ -high
  - Double-Lane-Change (meist Kundenwunsch)
  - Stationäre Kreisfahrt zum Identifizieren von Kippgrenzen
  - Sine with Dwell in USA, in EU eher nicht verwendet
  - $\mu$ -low (Niedrigreibwert) gefahren in Schweden für Richtungsstabilisierung
  - $\mu$ -high (Hochreibwert) gefahren in Deutschland für Überschlagregelung
- Hersteller B:
  - Quasistationäre Kreisfahrt (Kippgrenze)
  - Klothoide
  - Single Lane Change

- Double Lane Change zur Untersuchung des Aufschwingens
- J-Turn optional
- Tests auf  $\mu$ -high and  $\mu$ -low

*Wie wurde die Kritikalität der Fahrzeugreaktion bewertet? Welche Kennwerte wurden analysiert?*

- Hersteller A:  
Es werden über 1.000 Messgrößen aufgezeichnet. Es gibt keine objektiven Pass- / Fail-Kriterien, da die EVSC Performanz von Fahrzeug zu Fahrzeug unterschiedlich ist. Hauptkriterien bei Richtungsstabilisierung sind die Lage der Gierrate im Referenzband und der Verlauf des Schwimmwinkels (Erfassung durch Zusatzmesstechnik). Hauptkriterien bei Überschlagregelung sind die Einfahrgeschwindigkeit in den J-turn und der einfache Spurwechsel bis zur Kippgrenze
- Hersteller B:  
Gierratenmodule verbaut in Anhängern. Auswertung der Rearward Amplification (RA) der Gierrate mit Grenzwert RA = 1,1 im geregelten Fall.

### Teil (C): Funktionsfähigkeit EVSC bei Lang-Lkw

*Wie ist Ihrer Einschätzung nach die fahrdynamische Stabilität / Stabilisierbarkeit von Lang-Lkw gesamtheitlich zu bewerten?*

- Hersteller A:
  - Fahrzeuge sind mit gutem Gewissen zulassungsfähig, wenn ein appliziertes EBS vorhanden ist
  - Verbesserte Rahmenbedingungen allerdings wünschenswert
  - Prüfvorschrift: Sicherstellen der Verlässlichkeit spezifizierter und kommunizierter CAN-Daten
  - Gateway vorschreiben zum Sicherstellen der Kommunikation
  - Bremswege bei Lang-Lkw besser, Verkehrssicherheit kein Problem
- Hersteller B:
  - Prinzipiell sind auch lange und kinematisch anspruchsvolle Kombinationstypen stabilisierbar, wenn EBS vorhanden ist
  - Es wird lieber konservativ geregelt als auf Komfort oder Fahrdynamik
  - Nachuntersuchungen würden gemacht und das EVSC erweitert werden, um dieses noch weiter zu

verbessern, wenn explizite Kombinationstypen feststehen

*Gibt es gesetzliche Randbedingungen, die Sie sich vom Gesetzgeber wünschen würden?*

- Hersteller A:
  - Keine Einschränkungen bei den Kombinationen notwendig
  - Mindestens 2/3 der Räder an den Trailern sollen sensiert und geregelt sein. Dies würde Bremsweg und Richtungsstabilität deutlich verbessern
  - Verbesserte Rahmenbedingungen, siehe Antwort bei C.1
- Hersteller B:
  - Genauere gesetzliche Vorgaben bzgl. Typen: Kombinationsarten mit Geometrieinschränkung und Definition Kupplungssystem
  - Totzeiten im Trailer sollten festgelegt werden, Zeitsynchronität wichtig. Sonst schnell Instabilitäten im Zug
  - Parallele Untersuchungen sinnvoll, wie auch die passive Fahrzeugsicherheit gesteigert werden kann ohne EVSC (Achskinematik, Geometrie, Reifen etc.)
  - Simulative Absicherung aller Lang-Lkw-Typen mit EVSC: evtl. durch Gesetzgeber vorab zu untersuchen

### 4.4.2 Zusammenfassung und Bewertung

Es existiert bisher keine europäische Regelung, die für die Typgenehmigung von EVSC eine Betrachtung des Fahrverhaltens im Gesamtsystem, bestehend aus Zugfahrzeug und Anhängerfahrzeug, fordert. Unabhängig davon besitzen die EVSC-Hersteller jedoch einen großen Erfahrungsschatz darin, wie sich Fahrzeugkombinationen durch Integration ihrer EVSC-Systeme stabilisieren lassen und in welchem Bereich die technischen Herausforderungen liegen. Im Rahmen dieser Entwicklungstätigkeiten haben die Hersteller bereits viele Fahrzeugkombinationen fahrdynamisch untersucht, hierunter auch Fahrzeugkombinationen mit Überlänge, da diese schon seit einigen Jahren im europäischen und nicht-europäischen Ausland zulassungsfähig sind und die auch mitunter als fahrdynamisch noch kritischer zu bewerten sind als die in der LKWÜberlStVAusnV definierten Lang-Lkw (mehr Gelenkpunkte, Gesamtmasse von bis zu 76 Tonnen). Die Hersteller besitzen folglich eine große Expertise bezüglich überlanger Fahrzeugkombinationen und deren Stabilisierung durch ein

EVSC-Vollsystem mit EBS in allen Fahrzeugen, wie es in der LKWÜberlStVAusnV vorgeschrieben ist. Der Grundaufbau aus Richtungsstabilisierung und Überschlagregelung im Zugfahrzeug und untergeordneten, aber auch autark funktionsfähigen Überschlagsregelungen in den Anhängerfahrzeugen gehorcht derselben Struktur wie in den Fahrzeugen nach LKWÜberlStVAusnV.

Für die im Rahmen der LKWÜberlStVAusnV zulassungsfähigen Lang-Lkw wurde vermutlich aufgrund der Erfahrung der Hersteller mit komplexeren Kombinationstypen nicht konsequent jeder der fünf Lang-Lkw-Typen fahrdynamisch untersucht. Es wurden nur einzelne Typen spezifisch betrachtet und repräsentative Erkenntnisse aus Untersuchungen mit vergleichbaren oder noch kritischeren Fahrzeugkombinationen verwendet, um die EVSC-Systeme zu applizieren und abzusichern.

Die vorliegende Varianz der möglichen Zug- und Anhängerfahrzeuge, der Achsabstände, der Masseverteilung und vieler weiterer Parameter ist im Allgemeinen sehr groß, sodass die möglichen Fahrzeugkombinationstypen vorab nicht explizit im EVSC festgelegt werden können. Die Hersteller verfolgen daher im Allgemeinen eine im fahrdynamischen Sinne konservative Regelstrategie, die die Fahrsicherheit fokussiert. Während der Fahrt werden im EVSC-System eines Herstellers bereits teilweise die von den Anhängerfahrzeugen über den CAN-Datenbus gelieferten Daten verarbeitet, das Reglermodell damit bedatet und die Schwellwerte fortwährend angepasst. Dies birgt den Vorteil, dass die Regelschwellen präziser bestimmt werden können, was die Fahrsicherheit und die Effizienz erhöhen kann. Der zweite Hersteller verarbeitet diese Daten noch nicht, kann jedoch aufgrund der Erkennung des generellen Fahrzeuggrundtyps und potentiell weiterer Anhänger durch Festlegung von konservativen Regelschwellen auch für variierende Fahrzeugkombinationen ein sicheres Fahrverhalten darstellen. Folglich kann in beiden Fällen auch bei Umkonfiguration gewährleistet werden, dass das EVSC zuverlässig funktioniert. Es liegt somit eine prinzipiell robuste Regelcharakteristik vor. Der zweite Hersteller würde sich dennoch in der Gesetzgebung für Lang-Lkw die genaue Definition der Kombinationstypen inklusive Geometriedaten der einzelnen Fahrzeuge zur Einschränkung der Varianz wünschen. Der erste Hersteller hingegen fordert, dass vorrangig alle Informationen auf dem CAN-Bus verlässlich korrekt und dauerhaft verfügbar sein sollten, was insbesondere bei Anhängerfahrzeugen kleinerer Hersteller oft noch nicht der Fall sei.

Unterstützt wird die Robustheit der EVSC-Systeme weiterhin dadurch, dass die Überschlagregelung in den Anhängerfahrzeugen mit Hilfe eines integrieren Querbeschleunigungssensors im EBS-System

auch autark und somit unabhängig vom Zugfahrzeug und von der Anzahl und den Eigenschaften anderer Anhängerfahrzeuge agieren kann. Nach Aussage der Hersteller geht eine Aktivierung der Überschlagregelung jedoch erfahrungsgemäß vom Zugfahrzeug aus, da dieses die Querbeschleunigungsschwellen zumeist vor den Anhängerfahrzeugen erreicht bzw. durch Auswertung der zeitlichen Ableitungen der Querbeschleunigung des Zugfahrzeugs und des Lenkradwinkels des Fahrers bereits frühzeitig durch Bremsengriff dem Erreichen einer Querbeschleunigungsschwelle entgegenwirken kann.

Die prinzipiell autarke Funktionalität der Überschlagregelung der Anhängerfahrzeuge bringt jedoch eine weitere positive Eigenschaft mit sich, die auch eine eingeschränkte richtungsstabilisierende Funktion erbringen kann. Sollte die individuelle Querbeschleunigungsschwelle der Überschlagregelung eines Anhängers bei einem Ausweichmanöver ohne Kippgefahr erreicht werden (bspw. durch Querstellung auf Niedrigreibwert), wovon das Zugfahrzeug durch fehlende Schwimmwinkel- oder Knickwinkelschätzung womöglich initial nichts bemerkt, bremst das betroffene Anhängerfahrzeug autark ab. Ein tendenziell richtungsstabilisierender Abbau der Bewegungsenergie kann somit auch von den nur mit Überschlagregelungsfunktion versehenen Anhängern ausgehen. Dies erfolgt auch dann, wenn beispielsweise entgegen der vorgeschriebenen technischen Fahrzeuganforderungen gemäß LKWÜberlStVAusnV ein Zugfahrzeug ohne EVSC-System für einen Lang-Lkw verwendet werden würde.

Es ist festzustellen, dass die Hersteller eine sehr große Bandbreite an Fahrmanövern, Beladungszuständen und Reibwerten analysieren und mit hohem Aufwand messtechnisch erfassen und bewerten. Aus diesem Grund sind die Experten auch der Meinung, dass der Aufwand der technischen Abnahme bei der Typp Genehmigung allgemein geringgehalten werden sollte. Strenge zusätzliche Anforderungen wie Pass-/Fail-Kriterien für Lang-Lkw, wie zum Beispiel die Auswertung von fahrdynamischen Kennwerten mit definierten Wertebereichen, sind nach Expertenmeinung an dieser Stelle nicht sinnvoll und würden in ausreichender Form vom Hersteller ausgewertet. Bei der Typp Genehmigung seitens des technischen Dienstes sollte jedoch nach Wunsch eines Herstellers darauf geachtet werden, dass die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen inklusive der relevanten Botschaften ordnungsgemäß funktioniert und dass jeder Anhänger seinen Bauarttyp korrekt an das Zugfahrzeug übermittelt.

Trotz aller Anstrengungen können seitens der Hersteller nicht alle Instabilitätsphänomene adressiert werden, die für überlange Fahrzeugkombinationen

in der Literatur genannt werden. Einem Querstellen des zweiten Anhängers kann aufgrund fehlender Gierratensensoren und radindividueller Bremsdruckregelung nur in gewissem Maße entgegen gewirkt werden, indem wie oben beschrieben bei Auslösen der Querschleunigungsschwellen der eigentlichen Überschlagregelung ein selbständiges Bremsen der Anhänger eingeleitet wird. Eine tatsächliche Regelung der Anhänger auf eine berechnete Solltrajektorie im Einspurmodell im EVSC-System des Zugfahrzeugs ist indes nicht möglich. Die Messung aller Raddrehzahlen und eine durchgängige radselektive Bremsung sind in den Anhängerfahrzeugen kostenbedingt nicht in Serie integriert, womit eine separate Beeinflussung der Gierbewegung der Anhänger ermöglicht würde. Weiterhin kann aufgrund fehlender Gierratensensoren in den Anhängern der Ist-Bewegungszustand der gesamten Fahrzeugkombination nicht genau identifiziert und folglich nicht auf die Reduktion der Abweichung zu einer berechneten Solltrajektorie geregelt werden. Die Erweiterung der technischen Einrichtung von Lang-Lkw um die Größen Raddrehzahlen aller Räder, radindividuelle Bremsdrücke und Gierratensensoren der Anhängerfahrzeuge würde dabei helfen, die Fahrstabilität der Fahrzeugkombinationen weiter zu steigern und zudem nach Expertenmeinung auch dabei helfen, die Bremswege der Fahrzeuge weiter zu verkürzen.

Gesamtheitlich herrscht bei den Experten die Meinung vor, dass die Lang-Lkw mit EVSC als sicher einzustufen sind. Auch der kinematisch kritischste Kombinationstyp 2 wird neben den EVSC-Herstellern auch von einem unabhängigen Experten, dem Bereichsleiter Cars, Trucks & Training vom Berufsbildungszentrum für den Straßenverkehr (BBZ Nordhausen) als absolut sicher bezeichnet (Interview mit Dietmar Zänker). Im Rahmen seiner durchgeführten Untersuchungen variierte er die Beladung bis 55 Tonnen Gesamtgewicht und analysierte zwei Fahrmanöver: Zuziehen in einer Kurve (A) einfacher Spurwechsel (B) eines Lang-Lkw vom Typ 2. Er konnte auch auf Niedrigreibwert keine kritischen Fahrzustände provozieren, wenn das EVSC-System aktiv war. Auch bei deaktiviertem EVSC-System im Zugfahrzeug und lediglich aktiver Überschlagregelung in den Anhängerfahrzeugen bewertet er das Fahrverhalten als sicher (A) bzw. als noch stabil (B). Lediglich im passiven Fall bei Komplettausfall des EVSC-Systems beschreibt der Experte das Fahrverhalten des Lang-Lkw vom Typ 2 aufgrund der Unterdämpfung des Zentralachsanhängers als kritisch und als nicht mehr durch den Fahrer stabilisierbar. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus (Süßmann et al. 2014). Damit diesem Komplettsystemausfall mit größtmöglicher Sorgfalt entgegengewirkt werden kann, besitzen die EVSC-Systeme beider Herstel-

ler sogenannte Fail-Safe-Funktionen mit Redundanzebenen in den Regelstrategien. Sollten wichtige Messdaten des Gesamtfahrzeugs bzw. der Gesamtfahrzeugkombination wie Achszahl, Achslasten oder Raddrehzahlen fehlen oder ein Teilsystemausfall vorliegen (beispielsweise ABS-Ausfall eines Anhängers), werden die Regelschwellen sukzessive herabgesetzt, bis ein stabiler Fahrzustand gewährleistet werden kann. Integrierte Algorithmen ermöglichen zudem bei nicht verbauter Sensorik, die relevanten Messgrößen zu schätzen. In jedem Falle wird bei den EVSC-Systemen immer von einer initial-konservativen Regelung auf Fahrsicherheit ausgegangen. Dies unterstützt den robusten Regelcharakter der verbauten EVSC-Systeme in Lang-Lkw.

Da die EVSC-Systeme jedoch immer nur eine Reaktionsregelung auf ein auftretendes Fahrverhalten leisten können, wurde von einem der Experten angemerkt, dass auch eine Untersuchung und Optimierung der passiven Fahrwerke der Zugfahrzeuge und Anhängerfahrzeuge einen Sicherheitsvorteil bringen könnten. Besitzen bereits die unregelten passiven Fahrzeuge bzw. Fahrzeugkombinationen ein sehr instabiles Fahrverhalten, kann auch ein EVSC-System nur im Rahmen des physikalisch Möglichen eine Verbesserung der Fahrsicherheit leisten und das Fahrzeug bzw. Fahrzeugkombinationen nicht auf das Fahrsicherheitsniveau eines geregelten, aber passiv gut ausgelegten Grundfahrzeugs heben. Die von (Prem et al. 2001) eingangs genannten konstruktiven Maßnahmen können eine Verbesserung des Fahrverhaltens des passiven Grundfahrzeugs bewirken. Auch mechanische Zusatzelemente wie eine integrierte Knickwinkeldämpfung als potentielle Weiterentwicklung des „Knickschutz für LKW-Gliederzug zur Durchführung von LKW-Sicherheitstrainings“ (Schänker und Zänker 2001) für den normalen Straßenbetrieb können in diesem Kontext potentiell dazu beitragen, ein sichereres passives Grundfahrzeug zu erhalten. Weitere Untersuchungen in den genannten Punkten sind aus diesem Grund aus fahrdynamischer Sicht zu empfehlen.

Als ebenfalls empfehlenswert einzustufen ist, den kritischsten Lang-Lkw, den Typ 2, in einer spezifischen fahrdynamischen Untersuchung objektiv anhand von Messwerten mit extern verbauter Messsensorik zu bewerten, da dieser von den Herstellern in seiner genauen Definition nach LKWÜberlStVAusnV bisher nicht in vollem Umfang im Fahrversuch analysiert wurde. Hierbei wäre es sinnvoll, sowohl den doppelten Spurwechsel als auch andere Fahrmanöver mit jeweils deaktiviertem und aktiviertem EVSC-System und auch mit dem nach (Süßmann et al. 2014) kritischsten Beladungszustand (Sattelanhängers leer, Zentralachsanhänger vollbeladen) im Realversuch zu

analysieren. Das Manöver doppelter Spurwechsel, das allgemein als sehr stabilitätskritisch anzusehen ist, wurde im Rahmen der Untersuchungen des unabhängigen Experten noch nicht analysiert. Eine weitere beispielhafte fahrdynamisch relevante Fragestellung wäre, ob die konservativ angelernten Querschleunigungsschwellen auch dann noch korrekt bemessen sind, wenn ein Anhänger beladen wird, zwischen leerem und vollem Beladungszustand jedoch kein Zündungswechsel des Zugfahrzeugs erfolgt. In diesem Fall gilt es zu prüfen, ob die für den leeren Beladungszustand angelernten Querschleunigungsschwellen durch Achslastmessung plausibilisiert und gegebenenfalls korrigiert wurden oder ob diese noch aktiv und dann womöglich zu hoch sind. In diesem Fall würde bis zum erfolgreichen Anlernen einer neuen Querschleunigungsschwelle eine erhöhte Kippgefahr des Fahrzeugs trotz funktionstüchtigem EVSC-Vollsystem bestehen. Diese und weitere empfohlene Realversuche könnten im Rahmen eines weiteren Forschungsprojekts durchgeführt werden.

Abschließend zu resümieren ist, dass die fahrdynamische Stabilität von überlangen Nutzfahrzeugkombinationen mit EVSC und EBS nach Ansicht der Experten als sicher zu bezeichnen ist. Die Fahrdynamikregler der EVSC-Systeme können aufgrund der genannten Fahrzeugvarianz zwar nicht sehr fahrzeugspezifisch ausgelegt werden. Durch Codierung, Adaption und Schätzverfahren können sich die Algorithmen jedoch an das Fahrzeug anpassen, sodass von einer robusten Regelung auszugehen ist, die auf initial konservativ ausgewählten Schwellwerten beruht. Die autark arbeitende Überschlagregelung der Anhängerfahrzeuge trägt hierbei kombinationstypübergreifend zu einer robusten EVSC-Gesamtfunktionalität bei. Durch intensive fahrdynamischen Erprobungen der EVSC-Systeme seitens der Hersteller, auch in Fahrzeugkombinationen mit kritischerer Kinematik und Gesamtgewicht, kann daraus geschlossen werden, dass auch die Lang-Lkw mit EVSC ein stabiles Fahrverhalten aufweisen, auch wenn seitens der Hersteller nicht explizit alle fünf der nach LKWÜberlStVAusV definierten Lang-Lkw-Typen in allen möglichen Beladungszuständen untersucht werden konnten. Nochmals gesondert betrachtet werden sollte nach Auffassung der Autoren dieses Berichts der Lang-Lkw vom Typ 2, um auch den kritischsten aller Lang-Lkw-Typen vollumfänglich und final fahrdynamisch abzusichern.

## 5 AP4 - Änderungsvorschläge zu den fahrzeugtechnischen Anforderungen und deren Dokumentation

Im folgenden Kapitel werden aus den Erkenntnissen der Vorgängerstudie sowie aus dem Untersuchungsablauf der Arbeitspakete 1 bis 3 der aktuellen Studie, deren Ergebnissen und Gesprächen mit Betreibern, Herstellern und der Zulieferindustrie Änderungsvorschläge abgeleitet. Diese umfassen sowohl Vorschläge in Bezug auf die fahrzeugtechnische Ausstattung von Lang-Lkw als auch Anforderungen an deren Dokumentation, Begutachtung durch Sachverständige und ein etwaiges Nachschärfen der Verordnung zur Vermeidung von Interpretationsschwierigkeiten und -fehlern.

- **Retarder**

Wie im Kapitel 2.5.5 beschrieben, verlangt der Wortlaut der LKWÜberlStVAusnV explizit die Ausstattung eines „Retarders“ als spezielle Form einer Dauerbremse. Es wird vorgeschlagen, diese Vorgabe zu prüfen und ggf. eine technologieneutrale Formulierung zu wählen und äquivalente Dauerbremssysteme nach UN-R 13 zuzulassen.

- **Achslastüberwachung**

Die Achslastüberwachung und Bestimmung der Gesamtmasse des Lang-Lkw standen im Verdacht, je nach Fahrzeugausstattung, sehr aufwendig, zeitintensiv und fehleranfällig zu sein, sowie dadurch im praktischen Arbeitsalltag vermieden zu werden. Dies konnte im Verlauf der Untersuchung nicht bestätigt werden. Auch bei fehlender Anzeige der Vorderachslast oder dem Ablesen einzelner Achslasten an eigenen Achslastmonitoren an den Fahrzeugeinheiten stellt die Achslastbestimmung aus Sicht der Betreiber und der praktischen Einschätzung der Fahrer kein Problem dar und kann zumeist in wenigen Minuten fehlerfrei und ohne aufwendige Umrechnungen durchgeführt werden.

Für die Art und Weise der rechnerischen Berücksichtigung einer nicht angezeigten Vorderachslast wird jedoch die Definition eines Standardvorgehens vorgeschlagen (z.B. Wiegen des Fahrzeugs oder der einzelnen Achse).

Die automatische Anzeige aller Achslasten sowie des Gesamtgewichts im Fahrerhaus stellt einen Komfort- und Zeitvorteil dar, schließt Bedien-, Ablese- und Rechenfeh-

ler weitestgehend aus, rechtfertigt so jedoch keine Aufnahme als verpflichtende Anforderung in die LKWÜberlStVAusnV.

- **Spurhaltewarnsystem**

Für die Anforderung der Ausstattung von Lang-Lkw mit einem Spurhaltewarnsystem wird seitens der Autoren vorgeschlagen, hierfür in der LKWÜberlStVAusnV direkt auf die bereits bestehende UN/ECE-Regelung Nr. 130 Bezug zu nehmen.

- **Notbremsassistent (AEBS)**

Die LKWÜberlStVAusnV verlangt lediglich die wahlweise Ausstattung mit einem Abstandsregelsystem oder einem Notbremsassistenten. Während 93% aller Fahrzeuge über ein Abstandsregelsystem verfügen, sind nur 23% der Fahrzeuge mit einem Notbremsassistenten ausgestattet.

Um ein Höchstmaß an Sicherheit auch bei einer z.B. durch Müdigkeit bedingten Unaufmerksamkeit des Fahrers zu gewährleisten, erscheint die verpflichtende Ausstattung mit einem Notbremsassistenten für Lang-Lkw sinnvoll. Die Bremswege von Lang-Lkw bewegen sich bei voller gravimetrischer Auslastung zwar auf gleichem oder leicht besserem Niveau gegenüber Standard-Sattelkraftfahrzeugen (Süßmann et al. 2014), sind jedoch im „Substitutions“-Szenario gegenüber dem dann gravimetrisch nicht ausgelasteten Standard-Sattelkraftfahrzeug wenige Meter länger (siehe Kapitel 3). Zudem werden Lang-Lkw aufgrund der Streckenbegrenzung mit noch höherem Anteil als Standard-Sattelkraftfahrzeuge im Autobahnverkehr zwischen größeren Logistikzentren eingesetzt, wobei folgenschwere Auffahrunfälle aufgrund von Unaufmerksamkeit des Fahrers (z.B. Monotonie, Müdigkeit) unbedingt vermieden werden müssen. Darüber hinaus besteht bereits die Pflicht, dass alle neuen schweren Lkw ab November 2015 mit AEBS nach UN-R 131 ausgestattet sein müssen.

- **Kamera-Monitor-System**

Dem Kamera-Monitor-System wird vom überwiegenden Teil der Betreiber ein großer Mehrwert als Rückfahrhilfe beigemessen (77% Benotung mit 1 oder 2). Offensichtlich stellen die gebräuchlichen technischen Umsetzungen des Systems aktuell diesen praktischen Nutzen sicher. Um dies jedoch auch in Zukunft für weitere Betreiber und andere Kamera-Monitor-Systeme sicherzustellen, wird empfohlen, eine lö-

sungsneutrale Anforderung an das System zu formulieren.

So sollten die folgenden Kamera-seitigen Parameter bezüglich des Standes der Technik analysiert und die praktische Einbausituation an den Fahrzeugen untersucht werden:

- Anbringungsort
- abgedeckter Blickwinkel
- Ausleuchtung/Nachtsicht
- Aufzeichnungsqualität
- Schutz vor Witterung, Verschmutzung, Beschädigung
- Robustheit und Beschädigungsanfälligkeit der Umsetzung der Datenübertragung ins Fahrerhaus (kabelgebunden/kabellos)

Aus den Erkenntnissen sollten lösungsneutrale Anforderungen formuliert und in eine entsprechende Ergänzung der LKWÜberlStVAusnV einfließen.

In gleicher Weise sollten aus ergonomischen Untersuchungen zur Umsetzung des Monitorsystems lösungsneutrale Anforderungen bezüglich folgender Parameter resultieren:

- Anbringungsort
- Größe des Monitors
- Monitorauflösung/Anzeigequalität
- Bedienkomfort/Intuitivität
- Anzeigemodus (temporär/permanent)
- Risiken durch Blickablenkung

Ergebnisse solcher Forschungsarbeiten könnten beispielsweise in die Anforderungen für Kamera-Monitor-Systeme in UN-Regelung Nr. 46 einfließen.

#### • **Heckkennzeichnung**

Zur Kennzeichnung des Lang-Lkw kommt in 95 % der Fälle ausschließlich das vorgeschriebene retroreflektierende Schild mit der Aufschrift „Lang-Lkw“ am Heck zum Einsatz. In der Vorgängerstudie (Süßmann et al. 2014) wurde im Rahmen einer einfachen Probandenbefragung bereits festgestellt, dass eine symbolische Lang-Lkw-Darstellung eine intuitivere Wahrnehmung der außergewöhnlichen Fahrzeuglänge durch andere Verkehrsteilnehmer ermöglicht.

#### • **Kombinierter Verkehr**

Die Anforderungen an die KV-Tauglichkeit sollten eindeutig in der LKWÜberlStV-AusnV definiert und die Erfüllung und Art der Umsetzung auch im Übereinstimmungsnachweis in die Begutachtung aufgenommen werden. Zum Beispiel sollte die Feststellung des Ordnungsgebers angeführt werden, dass es für die Begründung der KV-Tauglichkeit erforderlich ist, dass mindestens ein Teil der Fahrzeugkombination eine mit Geräten umschlagbare Ladeinheit transportieren kann.

#### • **Kurvenlaufeigenschaften**

Die Einhaltung der Kurvenlaufeigenschaften nach § 32d StVZO stellt eine relevante Auslegungsgröße bei der Konfiguration von Lang-Lkw dar. Dennoch erfolgt die Prüfung im Rahmen der Begutachtung in den Übereinstimmungsnachweisen meist nur für eine repräsentative Fahrzeugkonfiguration und deckt nicht alle zulässigen Fahrzeugkonfigurationen ab, die aufgrund nicht-baugleicher Fahrzeugmodule möglich und zulässig sind. So ermöglichen die im Übereinstimmungsnachweis aufgeführten Fahrzeugmodule beispielsweise die Zusammenstellung eines 6-, 7- oder 8-achsigen Lang-Lkw, obwohl die Kurvenlaufeigenschaften nur für den 8-achsigen Zug praktisch nachgewiesen werden.

Um die optimalen Kurvenlaufeigenschaften auch bei größerem Konfigurationsspielraum mit mehreren alternativen Fahrzeugmodulen (z.B. Anhänger unterschiedlicher Achszahl, Dollys unterschiedlicher Hersteller) sicherzustellen, wird eine vollständige Prüfung aller Varianten durch einen amtlich anerkannten Sachverständigen mit einer zertifizierten Software empfohlen. Die Bedatung muss alle relevanten Fahrzeugcharakteristika und Abmessungen beinhalten und ein Konfigurationsindividuelles Ergebnis für die Kurvenlaufeigenschaften liefern. Die Anwendbarkeit mit hinreichend genauen Ergebnissen wurde bereits in der Vorgängerstudie durch die Spezifikation und funktionale Umsetzung einer derartigen Software demonstriert (Süßmann et al. 2014).

#### • **Gutachtenstruktur**

Die Dokumentationsstruktur der eingesetzten Fahrzeugkombinationen eines Betreibers wird bei einer höheren Zahl alternativer verwendbarer Fahrzeugmodule sehr komplex und in der Praxis intransparent. So

existieren mehrere, zeitlich aufeinanderfolgende Übereinstimmungsnachweise, die Überschneidungen bei den enthaltenen Fahrzeugmodulen beinhalten und unabhängig voneinander durch Abmeldung einzelner Fahrzeuge ihre Gültigkeit verlieren können.

In der Praxis führt dies bei einigen Betreibern zu einer nachweislichen Intransparenz, sodass nicht exakt bekannt ist, welche Module miteinander kombiniert werden dürfen bzw. wo es Ausschlüsse gibt.

Es wird daher vorgeschlagen, die Begutachtung der Fahrzeugkombinationen eines Betreibers in einer jeweils aktuell fortgeschriebenen Dokumentation zusammenzufassen und die zulässige Kombinatorik eindeutig und transparent (z.B. über Variantenbäume) zu beschreiben.

- **ABS bzw. EVSC**

Alle auf 40 t Gesamtmasse beladenen Lang-Lkw weisen einen geringfügig längeren Bremsweg im Vergleich zu den durch sie substituierten Sattelkraftfahrzeugen auf. Bei ganzheitlicher Betrachtung sowohl der Vorgängerstudie (Süßmann et al. 2014) als auch dieser Studie kann jedoch von vergleichbaren Bremswegen von Lang-Lkw im Vergleich zu Lkw herkömmlicher Bauart ausgegangen werden.

Ein Bremssystemhersteller empfiehlt zur Verkürzung der Bremswege eine Sensierung und Druckregelung von 2/3 aller Achsen der Sattelanhänger. Diese Empfehlung gilt für Lang-Lkw und konventionelle Sattelkraftfahrzeuge gleichermaßen. Um den geringfügig längeren Bremswegen von Lang-Lkw gegenüber Lkw herkömmlicher Bauart im „Substitutions-Szenario“ entgegenzuwirken, könnte nach vorheriger Potentialanalyse eine entsprechende Vorschrift in der LKWÜberlStVAusnV ergänzt werden. Im Rahmen dieser Studie durchgeführte Bremsweguntersuchungen ließen jedoch keinen Rückschluss unterschiedlicher ABS-Konfigurationen auf Bremswege zu.

Hersteller sehen durch ihre konservativ ausgelegten Regelungen keine Probleme bezüglich der Fahrsicherheit, wenn Lang-Lkw wie vorgeschrieben durchgängig mit EVSC, EBS in allen Anhängern und sichergestellter Kommunikation ausgestattet sind. Dennoch wünschen sich die Hersteller Verbesserungen der technischen

Randbedingungen, um die Performanz ihrer Systeme verbessern zu können:

- Sicherstellen der Verlässlichkeit spezifizierter und kommunizierter CAN-Daten
- Gierratensensoren in den Anhängern

Die Aspekte könnten ebenfalls nach einer vorher durchgeführten Potentialanalyse in die LKWÜberlStVAusnV aufgenommen werden, um die Fahrzeugsicherheit weiter zu erhöhen.

Darüber hinaus ist zu empfehlen, erwartete Prüfvorschriften des erwähnten UN/ECE Expertengremium zu „Modular Vehicle Combinations“ auch für Lang-Lkw zu übernehmen.

## 6 Zusammenfassung

Im Verlauf des Feldversuchs mit Lang-Lkw auf Basis der LKWÜberlStVAusnV nahm die Anzahl der Betreiber und Fahrzeugkombinationen stark zu. Wurden in der Vorgängerstudie von Süßmann et al. (2014) noch 43 Lang-Lkw von 23 Betreibern untersucht, so waren zum Zeitpunkt der Berichtslegung zu dieser Studie der Abschlussphase schon 147 Lang-Lkw von 58 Betreibern bei der BASt gemeldet.

Die Dokumentation der technischen Fahrzeugeigenschaften der teilnehmenden Fahrzeugkombinationen wurde im Rahmen dieser Studie entsprechend aktualisiert und erweitert. Hierzu wurden sämtliche zur Verfügung gestellten Daten gesichtet und in Kontinuität mit der Vorgängerstudie (Süßmann et al. 2014) tabelliert und aggregiert ausgewertet. Zu den Themen Achslastbestimmung, Kamera-Monitor-System und KV-Tauglichkeit fand eine erweiterte Datenakquise in Form eines Fragebogens statt.

Die beiden Kombinationstypen 2 und 3 stellen weiterhin die häufigsten Lang-Lkw-Typen dar (zusammen über 80%), wobei im Vergleich zur Vorgängerstudie insbesondere der fahrdynamisch weniger stabile Lang-Lkw vom Typ 2 stark zugenommen hat. Insgesamt lässt sich zudem eine leichte Tendenz zu geringeren Achszahlen feststellen, die 7- und 8-achsigen Lang-Lkw stellen aber immer noch den Standardfall dar (zusammen über 65%).

In Bezug auf die Achslastüberwachung wurde festgestellt, dass im überwiegenden Teil der Fahrzeugkombinationen (>80 %) alle Achslasten komfortabel im Kombiinstrument im Fahrerhaus abgelesen und zur Fahrzeuggesamtmasse addiert werden können. Im Falle der fehlenden Anzeige der Last einer blattgefederten Vorderachse wird diese relativ aufwandsarm rechnerisch berücksichtigt. In den wenigen Fällen, die das Ablesen der einzelnen Achslasten der einzelnen Fahrzeugmodule am jeweiligen Achslastmonitor („Smartboard“) erfordern, werden von den Betreibern klar die Komfortnachteile und die höhere Gefahr von Ablesefehlern erkannt, jedoch insgesamt keine größeren Schwierigkeiten festgestellt.

Das Kamera-Monitor-System wird von den Betreibern überwiegend als praxistauglich in Bezug auf die Robustheit und Verschmutzungsanfälligkeit bewertet. Insbesondere als Rangierhilfe wird es positiv aufgenommen, der Mehrwert und Bedarf zur Beobachtung des rückwärtigen Verkehrs wird gemischt mit einer Tendenz zu negativ bewertet.

In Bezug auf die KV-Tauglichkeit im Feldversuch mit Lang-Lkw wurde vom Ordnungsgeber

festgelegt, dass nur die Transportierbarkeit von mit Geräten umschlagbaren Ladeeinheiten die KV-Tauglichkeit begründet. Lang-Lkw im Feldversuch sind hierzu überwiegend mit Greifkanten für die Bahnverladung und Twistlocks zur Aufnahme von Containern und Wechselchassis ausgestattet.

Die Bremsweguntersuchungen in AP3 zeigten im „Substitutions“-Szenario einen geringfügig längeren Bremsweg als Lkw herkömmlicher Bauart. Der Lang-Lkw vom Typ 3 mit 6 Achsen zeigt in den Messungen etwa gleich lange Bremswege wie der vom Typ 3 mit 8 Achsen. Bei ganzheitlicher Betrachtung sowohl der Vorgängerstudie (Süßmann et al. 2014) als auch dieser Studie kann jedoch von vergleichbaren Bremswegen von Lang-Lkw im Vergleich zu Lkw herkömmlicher Bauart ausgegangen werden.

Die Untersuchungen zur Wirksamkeit von EVSC zeigten auf, dass zwar keine Lang-Lkw-spezifischen EVSC-Systeme entwickelt wurden, aber die Hersteller aufgrund ihrer Erfahrung in der Lage sind, durch konservative Abstimmung der Fahrdynamikregelung sichere Systeme abzubilden. Die Applikation und Absicherung der Systeme erfolgte nicht für alle, sondern nur für erfahrungsgemäß kritische Lang-Lkw-Typen und Zustände. Beide befragten Hersteller sehen keine Probleme bezüglich Fahrsicherheit, wenn Lang-Lkw wie vorgeschrieben durchgängig mit EVSC, EBS in allen Anhängern und einer sichergestellten Kommunikation zum ziehenden Fahrzeug ausgestattet sind. Die Autoren dieses Berichts empfehlen jedoch eine vollumfängliche fahrdynamische Absicherung des Lang-Lkw vom Typ 2 im Realversuch.

## 7 Literaturverzeichnis

Bendel, Walter; Pflug, Hans-Christian; Schoch, Dieter; Schröter, Hartmut (2009): Endbericht zum Pilotversuch „Ecocombi“. Hg. v. Landtag von Baden-Württemberg. Daimler AG. Stuttgart.

Bendix Commercial Vehicle Systems LCC (Hg.) (2009): The Air Brake Handbook.

BMVBS; Leyendecker, Jochen (2012): KV-Tauglichkeit im Feldversuch mit Lang-Lkw. Bonn, 30.11.2012. E-Mail an Thomas Uhl (Kögel Trailer GmbH & Co KG).

BMVI (2016): KV-Tauglichkeit im Feldversuch mit Lang-Lkw. Berlin, 05.04.2016. E-Mail an Marco Irzik.

Braun, Folkher (2012): Darf's eine Tonne weniger sein? In: *KFZ-Anzeiger* (14/2012), S. 38–42. Online verfügbar unter [http://kfz-anzeiger.com/images/stories/testberichte/trailer/krone\\_aper\\_liner\\_1412.pdf](http://kfz-anzeiger.com/images/stories/testberichte/trailer/krone_aper_liner_1412.pdf).

Die Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) (30.01.2011): Regelung Nr. 48 Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen.

Die Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) (13.02.2014): Regelung Nr. 131 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Notbremsassistentensystems (AEBS).

Ei-Gindy, M.; Mrad, M.; Tong, X. (2001): Sensitivity of rearward amplification control of a truck/full trailer to tyre cornering stiffness variations (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 215 Jg., Nr. 5).

Ellis, J. R. (1994): Vehicle handling dynamics. London: Mechanical Engineering Publications.

Europäische Kommission (13.07.2009): VERORDNUNG (EG) Nr. 661/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. Juli 2009 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen, Kraftfahrzeuganhängern und von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer allgemeinen Sicherheit. EG Nr. 661/2009. Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:200:0001:0001:DE:PDF>.

Fahrzeugwerk Bernard Krone GmbH (2012): Mega Dolly with steering axles. Tpe:ZZB 188 eLZ. Online verfügbar unter <http://www.krone->

[trailer.com/fileadmin/contentmedia/pdf/datenblaetter/zb18elzm\\_en.pdf](http://www.krone-trailer.com/fileadmin/contentmedia/pdf/datenblaetter/zb18elzm_en.pdf).

Fancher, P.; Winkler, C. (1992): A methodology for measuring rearward amplification (Proceedings: International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. National Highway Traffic Safety Administration).

Fancher, P.; Winkler, C. (2007): Directional performance issues in evaluation and design of articulated heavy vehicles (Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 48).

Fancher, P.; Winkler, C.; Ervin, R.; Zhang, H. (2008): Using braking to control the lateral motions of full trailers (Vehicle System Dynamics, 29. Jg., Nr. 1).

Gerum, Eduard; Palkovics, Laszlo; Semsey, Akos; Barta, Gabor (2003): Verfahren zur Fahrstabilitäts-erhöhung. Angemeldet durch Knorr-Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH. Veröffentlichungsnr: DE69618337 T2.

Haldane, Mandy; Bunker, Jonathan (2007): Assessing the impacts of multi-combination vehicles on traffic operations and safety. Online verfügbar unter <http://eprints.qut.edu.au/7845/1/7845.pdf>.

ISO 11992-2:2014 (E): Road vehicles - Interchange of digital information on electrical connections between towing and towed vehicles - Part 2: Application layer for brakes and running gear.

Kang, Xiaodi; Deng, Weiwen (2007): Vehicle-Trailer Handling Dynamics and Stability Control - an Engineering Review (SAE Technical Paper, 2007-01-0822).

Knorr Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH (Hg.) (2015): Trailer EBS - Anti-Lock Braking. Product Data.

Mueller, T. H.; de Pont, J. J.; Baas, P. H. (1999): Heavy Vehicle Stability versus Crash Rates. A Report Prepared for The Land Transport Authority. Online verfügbar unter <http://www.ternz.co.nz/Publications/Heavy%20Vehicle%20Stability%20Versus%20Crash%20Rates.pdf>.

Pinxteren, M. (2009): Brake and roll-over performance of longer heavier vehicle combinations. Master Thesis. Eindhoven University of Technology.

Prem, H.; Ramsay, E.; McLean, J.; Pearson, B. (2001): DEFINITION OF POTENTIAL PERFORMANCE MEASURES AND INITIAL STANDARDS (PERFORMANCE BASED STANDARDS: NRTC/AUSTROADS PROJECT A3 AND A4): DISCUSSION PAPER.

Schänker, H.; Zänker, Dietmar (2001): Knickschutz für LKW-Gliederzug am 2001. Veröffentlichungsnr: DE10045078A1.

Sparks, G. A.; Berthelot, C. (1989): The Cost/Benefit Analysis of a Rollover Warning Device for Large Trucks. Sparks and Associates Ltd.

Süßmann, Alexander; Förg, Armin; Wenzelis, Andreas (2014): Lang-Lkw: Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt. Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Online verfügbar unter [http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-lang-lkw/Berichte/820543.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-lang-lkw/Berichte/820543.pdf?__blob=publicationFile&v=2).

TBJ-Dynamische Messtechnik (Hg.) (2016): GPS100Pro. Datenblatt. Online verfügbar unter [http://www.tbj-messtechnik.com/de/gps100PRO\\_DB\\_DE.pdf](http://www.tbj-messtechnik.com/de/gps100PRO_DB_DE.pdf).

UN/ECE (2010): Änderungsserie 11 der Regelung Nr. 13 Einheitliche Vorschriften für die Typgenehmigung von Fahrzeugen der Klassen M, N, und O hinsichtlich der Bremsen. UN/ECE R13.

UN/ECE (Hg.) (2016): Modular Vehicle Combinations, Working Party on Brakes and Running Gear. Online verfügbar unter <https://www2.unece.org/wiki/display/trans/MVC+1st+session>, zuletzt geprüft am 26.06.2016.

van de Molengraft-Luijten, M. F. J.; Besselink, I. J. M.; Verschuren, M. A. F.; Nijmeijer, H. (2012): Analysis of the lateral dynamic behaviour of articulated commercial vehicles (Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 50).

WABCO (2010): Trailer EBS C / D Systembeschreibung. 2. Ausgabe. Online verfügbar unter <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/20/8150200203t1.pdf>.

WABCO (2013): Trailer ABS for Multiple Trailer Combinations. Online verfügbar unter <http://inform.wabco-auto.com/intl/scripts/download.php?from=/intl/de/informpm.php&lang=&keywords=&file=./intl/pdf/815/02/00/8150102003.pdf>.

WABCO (2016): EBS3 - Elektronisches Bremssystem. Systembeschreibung. WABCO Europe BVBA. Online verfügbar unter <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/02/08/8150202083.pdf>, zuletzt geprüft am 20.03.2016.

Winkelbauer, Martin (2009): Sicherheitsaspekte Gigaliner. Studie im Auftrag des. Hg. v. KfV.

Wöhrmann, Mark (2008): Fahrdynamische Analyse innovativer Nutzfahrzeugkonzepte. FAT-

Schriftenreihe 220. Hg. v. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. Verband der Automobilindustrie.