

# **Ergänzende Untersuchungen zur Fahrdynamik von Lang-Lkw**

**mit Schwerpunkt auf der Fahrstabilität  
des Typs 2**

Dr. Patrick Seiniger

auf der Grundlage von Vorarbeiten von

Dr. Falk Hecker

Oliver Jundt,

Stefan Hummel

**Bergisch Gladbach, Juni 2017**

**Bundesanstalt für Straßenwesen**



**bast**

# Ergänzende Untersuchungen zur Fahrdynamik von Lang-Lkw mit Schwerpunkt auf der Fahrstabilität des Typs 2

## Inhalt

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Einleitung.....   | 3  |
| 1.1   | Hintergrund.....  | 3  |
| 1.2   | Methodik.....   | 3  |
| 1.2.1 | Bewertungskriterien .....                                 | 4  |
| 1.2.2 | Untersuchungskonzept .....                                | 4  |
| 2     | Werkzeuge .....   | 5  |
| 2.1   | Zugfahrzeuge .....  | 5  |
| 2.2   | Anhänger.....   | 5  |
| 2.3   | Anforderung nach §5 LKWÜberStVAusnV .....                 | 5  |
| 2.4   | Zusätzliche Sicherheitsausrüstung der Testfahrzeuge ..... | 7  |
| 2.5   | Messtechnische Ausrüstung.....                            | 7  |
| 2.6   | Teststrecke.....  | 7  |
| 2.7   | Beladungszustände .....                                   | 8  |
| 3     | Versuchsdurchführung .....                                | 9  |
| 3.1   | J-Turn .....  | 9  |
| 3.2   | Doppelter Spurwechsel nach VDA (ISO 3888-2:2011).....     | 10 |
| 3.3   | Fahrzeugkombinationen .....                               | 11 |
| 3.4   | Versuchsablauf.....                                       | 15 |
| 4     | Ergebnisse .....  | 15 |
| 4.1   | Kippen .....  | 15 |
| 4.2   | Seitliche Auswanderung (Rearward Amplification).....      | 17 |
| 4.2.1 | Relative Abweichung .....                                 | 19 |
| 4.2.2 | Absoluter seitlicher Platzbedarf.....                     | 21 |
| 5     | Zusammenfassung .....                                     | 24 |
| 6     | Literatur .....   | 25 |

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Im Rahmen des Feldversuchs Lang-Lkw wurden vielfältige Aspekte des Inverkehrbringens von Lang-Lkw untersucht, unter anderem auch fahrzeugtechnische Fragestellungen, insbesondere in Bezug auf die Fahrstabilität. Hierzu wurden im Rahmen des Feldversuchs Forschungsprojekte durchgeführt, letztlich sind die dort gewonnenen Erkenntnisse in den Schlussberichten (FÖRG & SÜßMANN, 2014) "Lang-LKW: Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt" und "Fahrzeugtechnische Eigenschaften von Lang-LKW" (FÖRG & SÜßMANN, 2016) enthalten.

Die Fahrstabilität von Fahrzeugkombinationen hängt unter anderem von der Anzahl der Knickpunkte (Kupplungen) und Verteilung der Massen innerhalb einer Fahrzeugkombination, der Fahrzeugbreite (kein Unterschied innerhalb der relevanten Fahrzeugkombinationen), der Achsabstände und Überhänge sowie der Wirkung von elektronischen Stabilisierungssystemen ab.

Mit der vom Forschungsnehmer Förg & Süßmann Ingenieurbüro GbR gewählten Methodik ließ sich nicht zweifelsfrei bestimmen, ob die Fahrstabilität insbesondere des Lang-Lkw des Typs 2 (Sattelzug mit zusätzlichem Zentralachsanhänger) auf dem Niveau herkömmlicher Kombinationen liegt oder darunter abfällt (FÖRG & SÜßMANN, 2016, S. 31). Insbesondere die Wirkungsweise der elektronischen Stabilisierungssysteme konnte nicht ausreichend berücksichtigt werden, da alle Aussagen lediglich basierend auf einem rein die mechanischen Fahrzeugeigenschaften abbildenden Simulationsmodell (FÖRG & SÜßMANN, 2014) sowie Expertengesprächen (FÖRG & SÜßMANN, 2016) getroffen wurden.

Darüber hinaus existiert eine Studie der RWTH Aachen, in der Simulationen mit einem generischen Stabilisierungssystem durchgeführt wurden. Diese Studie kommt zum Schluss, dass das Stabilisierungssystem die in der Tat kritischeren mechanischen Eigenschaften verschiedener Fahrzeugkombinationen wirkungsvoll in Richtung unkritisch verändert (s. WÖHRMANN, 2008). Allerdings ist auch hier das Simulationsmodell nicht ausreichend validiert.

## 1.2 Methodik

Für eine belastbare Aussage zur Fahrstabilität von Lang-Lkw des Typs 2 ist eine vergleichende Bewertung des fahrdynamischen Verhaltens, insbesondere der Querstabilität in Grenzsituationen erforderlich.

### 1.2.1 Bewertungskriterien

Mögliche Gefahren durch neue Fahrzeugkombinationen entstehen, wenn diese Fahrzeuge in Kurvenfahrt leichter kippen könnten oder wenn die hinteren Teile der Fahrzeugkombination in Kurvenfahrt oder beim Spurwechsel weiter auswandern könnten als herkömmliche Fahrzeugkombinationen.

Geeignete Bewertungskriterien für die Beschreibung dieser Gefahren sind danach die Kippgrenze, also die Querbeschleunigung (im Versuch mit konstantem Radius: Fahrgeschwindigkeit), bei der Teile der Fahrzeugkombination kippen, sowie die Auswanderung der Fahrspur (im physikalischen Sinne: Verbindungslinie aller Aufenthaltspunkte eines bestimmten charakteristischen Punktes des Fahrzeugs) des Hecks des letzten Anhängers gegenüber der Fahrspur der Vorderachse der Zugmaschine (sog. Rearward Amplification RA, s. FÖRG & SÜßMANN, 2016).

### 1.2.2 Untersuchungskonzept

Als Arbeitshypothese wird angenommen, dass es keine relevanten Unterschiede in der Stabilität zwischen Lang-Lkw, insbesondere des Typs 2, und konventionellen Fahrzeugkombinationen gibt. Die Untersuchungen zielen darauf, diese Hypothese zu Fall zu bringen. Gelingt dies nicht, hat sie sich bewährt und wird als wahr angesehen. Die Güte der Bewährung steigt mit den Anstrengungen, die unternommen wurden, die Hypothese zu falsifizieren:

Aufgrund des beträchtlichen Einflusses elektronischer Sicherheitssysteme, die in Simulationen nur ungenügend generisch nachgebildet werden können, ist eine belastbare Aussage nur anhand von Fahrversuchen möglich.

Diese Fahrversuche sollen besonders kritische Situationen nachstellen; es wird davon ausgegangen, dass

- der ungebremste, doppelte Spurwechsel das Fahrmanöver ist, das die höchste "Rearward Amplification" (also die weiteste Auswanderung des hinteren Anhängers von der Zugfahrzeug-Fahrspur) erzeugt, und dass
- die Kippneigung im standardisierten J-Turn (Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit und steigender Kurskrümmung) besonders groß ist.
- Die Fahrversuche werden mit als besonders kritisch angesehen Beladungszuständen durchgeführt.

Gelingt es mit diesen Fahrversuchen nicht, Unterschiede zwischen Lang-Lkw Typ 2 (mit verschiedenen Beladungszuständen) und anderen, bereits als unkritisch angesehener Lang-Lkw- oder konventionellen Fahrzeugkombinationen zu identifizieren, dann bestehen aus Sicht der Fahrzeugtechnik keine Bedenken gegen den Einsatz der Fahrzeugkombinationen des Typs 2 im öffentlichen Straßenverkehr.

## **2 Werkzeuge**

### **2.1 Zugfahrzeuge**

Für die Versuche standen folgende Zugfahrzeuge zur Verfügung:

- Sattelzugmaschine 4x2 mit elektronischem Bremssystem Knorr-Bremse EBS7 in der Konfiguration 4 Drehzahlfühler und 4 Bremsdruckmodulatoren (4S4M). Motorleistung 500 PS, Fahrzeugkategorie N3 nach ECE/TRANS/WP.29/78/Rev.5 (R.E.3, 2017),
- Motorwagen 6x2 mit elektronischem Bremssystem Knorr Bremse EBS5 in der Konfiguration 6 Drehzahlfühler und 5 Bremsdruckmodulatoren (6S5M). Die liftbare Nachlaufachse wird hierbei - wie üblich - von einem Modulator angesteuert. Motorleistung 480 PS, Fahrzeugkategorie N3.

Die Beladung wurde mit 20-Fuß-Containern realisiert. Die Beladung sowie Schwerpunkthöhe kann in bestimmten Grenzen variiert werden.

### **2.2 Anhänger**

Für die Versuche standen folgende Anhänger beziehungsweise Auflieger zur Verfügung:

- 3-Achs-Auflieger mit elektronischem Bremssystem Knorr-Bremse TEBS2 in der Konfiguration 6 Drehzahlfühler und 3 Modulatoren (6S3M); Fahrzeugkategorie O4.
- 2-Achs-Untersetzachse (Dolly) mit elektronischem Bremssystem Knorr-Bremse TEBS2 in der Konfiguration 4 Drehzahlfühler und 2 Modulatoren (4S2M) mit Gateway-ECU für den Anhänger-CAN-Bus; Fahrzeugkategorie O4.
- 2-Achs-Zentralachsanhänger mit elektronischem Bremssystem Knorr-Bremse TEBS2 in der Konfiguration 4 Drehzahlfühler und 2 Modulatoren (4S2M); Fahrzeugkategorie O4.

Alle Beladungen wurden mit 20“ bzw. 10“ Containern realisiert. Die Beladung sowie Schwerpunkthöhe konnte in bestimmten Grenzen variiert werden.

### **2.3 Anforderung nach §5 LKWÜberlStVAusV**

Die für die Untersuchung eingesetzten Zugfahrzeuge und Anhänger erfüllen alle technischen Anforderungen nach §5 LKWÜberlStVAusV, die Einfluss auf die Fahrdynamik haben. Folgende Anforderungen werden an die Fahrzeuge gestellt:

- „1. der Anhänger einer Fahrzeugkombination mit Spurhalteleuchten nach § 51 Absatz 4 der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung,“  
(✓) für die Fahrdynamik nicht relevant

- „2. Luftfederung außer auf den Lenkachsen der Kraftfahrzeuge,“
  - ✓ erfüllt, Sattelzugmaschine verfügt über Blatt-Luft-Federung (Vorderachse blattgefedert, Hinterachse luftgefedert), der Motorwagen ist voll-luftgefedert.
- „3. Differenzialsperre oder Antriebsschlupfregelung,“
  - ✓ für beide Zugfahrzeuge erfüllt. Antriebsschlupfregelung ist Bestandteil des elektronischen Bremssystems (EBS). Zudem verfügen beide Zugfahrzeuge über eine Differentialsperre.
- „4. Elektronisch gesteuertes Bremssystem (EBS nach UNECE Regelung Nr. 13 Änderungsreihe 11; ABl. L 297/1 vom 13.11.2010, S. 183),“
  - ✓ für beide Zugfahrzeuge erfüllt
- „5. Scheibenbremsen und Retarder (Verlangsamer) im Zugfahrzeug,“
  - ✓ für beide Zugfahrzeuge erfüllt
- „6. Automatische Achslastüberwachung mit sinnfälliger Anzeige der Achslasten für die Achsen mit Luftfederung oder der Gesamtmasse,“
  - (✓) für die Fahrdynamik nicht relevant
- „7. Spurhaltewarnsystem,“
  - (✓) für die Fahrdynamikversuche nicht relevant
- „8. Elektronische Fahrdynamikregelsysteme (nach UNECE Regelung Nr. 13 Änderungsreihe 11; ABl. L 297/1 vom 13.11.2010, S. 183),“
  - ✓ für beide Zugfahrzeuge erfüllt. Die elektronischen Bremssysteme EBS5 und EBS7 verfügen über eine integrierte Fahrdynamikregelung. Sie besteht wie gefordert aus den Teilfunktionen directional control und roll-over control. Alle Anhänger verfügen über ein elektronisches Bremssystem mit integrierter Fahrdynamikregelung. Wie mindestens gefordert, besteht die Fahrdynamikregelung im Anhänger aus roll-over control.
- „9. Automatisches Abstandsregelsystem (Abstandstempomat) oder Notbremsassistentensystem,“
  - (✓) für die Fahrdynamik nicht relevant
- „10. 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,“
  - (✓) für die Fahrdynamik nicht relevant

- „11. Kamera-System am Heck des Fahrzeugs oder der Fahrzeugkombination sowie einem zugehörigen Monitor im Blickfeld des Fahrers für die Sicht nach hinten,“  
(✓) für die Fahrdynamik nicht relevant
- 12. Konturmarkierungen aus retroreflektierendem Material nach UNECE Regelung Nr. 48 (ABl. L 137 vom 30.5.2007, S. 1),  
(✓) für die Fahrdynamik nicht relevant
- „13. rückwärtige Kenntlichmachung durch ein Schild aus retroreflektierendem Material in Anlehnung an die UNECE Regelung Nr. 70 (BGBl. 1994 II S. 970) mit der Aufschrift „Lang-Lkw“ (Schriftgröße 130 mm),“  
(✓) für die Fahrdynamik nicht relevant.

## **2.4 Zusätzliche Sicherheitsausrüstung der Testfahrzeuge**

Um die Sicherheit während der Fahrversuche zu gewährleisten, sind alle Kupplungspunkte zwischen Zugfahrzeugen und Anhängern sowie bei mehreren Anhängern die Kupplungspunkte zwischen den Anhängern mit Knickschutzseilen gesichert. Alle Beladungen mit 20“ bzw. 10“ Containern verfügen zum Verhindern des Umkippen über Stützräder.

Die Sicherheitsausrüstung führte dazu, dass in Einzelfällen die Masse der Fahrzeugkombination 40 Tonnen überstieg. Im kombinierten Verkehr mit Lang-Lkw-Kombinationen (Container) darf die Gesamtmasse einer Fahrzeugkombination unter bestimmten Voraussetzungen 44 Tonnen betragen, so dass auch diese schwereren Fahrzeuge keine unrealistischen Situationen darstellen.

## **2.5 Messtechnische Ausrüstung**

Die folgenden fahrdynamisch relevanten Daten werden messtechnisch erfasst:

- Position und Orientierung der Zugfahrzeuge mit differentiellm Satellitennavigationssystem (DGPS) und Inertialmesssystem in den Zugfahrzeugen (kombinierte Positionsgenauigkeit ca. 1 cm)
- Gierrate der bis zu zwei Anhänger über Drehratensensoren (Bestimmung des Knickwinkels der Anhänger durch Integration von Drehratendifferenzen)
- Bremssystem-interne Größen wie Radgeschwindigkeiten, Bremsdrücke, Drehrate, Querschleunigung und Lenkwinkel in den Zugfahrzeugen
- Radgeschwindigkeit und Bremsdrücke in allen Anhängern

## **2.6 Teststrecke**

Die Versuche wurden auf der Fahrdynamikfläche der Bosch Teststrecke in Boxberg an mehreren Tagen im Mai 2017 auf trockenem Asphalt durchgeführt (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Fahrspuren des Zugfahrzeugs für alle durchgeführten Fahrversuche

## 2.7 Beladungszustände

Um realistische Beladungszustände herzustellen, wurden Anhänger und Motorwagen mit Ballast-Containern beladen. Nimmt man die Beladung im Container bis zu einer bestimmten Höhe als homogen an, so kann vereinfachend von einem Quader homogener Dichte ausgegangen werden, dessen Schwerpunkthöhe mittig liegt.

Nach StVZO darf bei Kraftfahrzeugen, Fahrzeugkombinationen und Anhängern einschließlich mitgeführter austauschbarer Ladungsträger die höchstzulässige Höhe über alles 4,00 m nicht überschreiten (§32). Die Containerschlösser befinden sich auf einer Höhe über Grund von 1,2 m.

Der Beladungsquader hat für diesen Fall somit eine maximal mögliche Höhe von 2,8 m und bei homogener Beladung bis zu dieser Höhe ergibt sich eine maximal mögliche Beladungsschwerpunkthöhe von 1,4 m über den Schlössern, siehe Abbildung 2. Die im Folgenden verwendete relative Beladungshöhe ist dann so zu verstehen, dass bei größtmöglicher homogener Beladung der Schwerpunkt bei 2,6 m über Grund = 100% liegt. Die Schwerpunkthöhe bei kleinstmöglicher Beladung wäre dann 1,2 m über Grund = 0%.



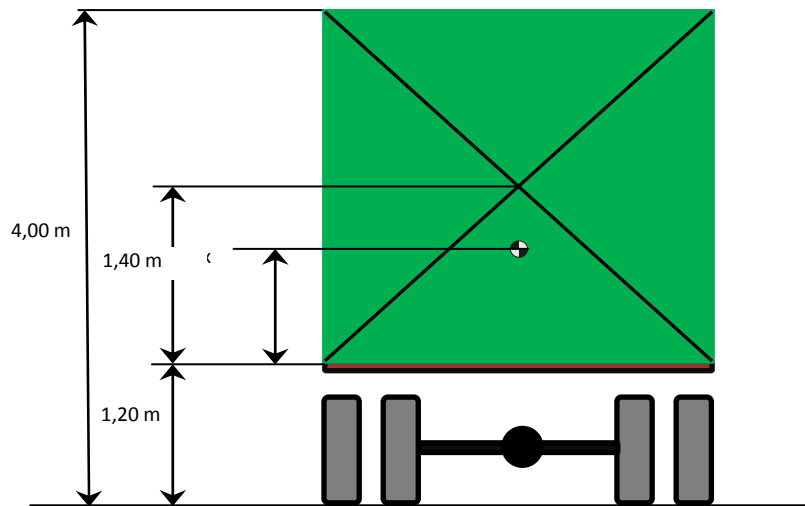


Abbildung 2: Beladungsschwerpunkthöhe

### 3 Versuchsdurchführung

Die Beurteilung der Fahrsicherheit wurde an Hand von zwei Manövern durchgeführt. Der Pfad aller Manöver wurde durch einen Lenkroboter Typ ADB SR150 eingestellt. Die Pfade wurden zuvor aufgezeichnet und konnte bei jedem Versuch reproduzierbar abgerufen werden. Die Geschwindigkeit wurde vom Fahrer eingestellt. Bei den beiden Manövern handelt es sich um die Einfahrt in eine Kurve (sog. J-Turn) und einen doppelten Spurwechsel.

#### 3.1 J-Turn

Der sogenannte J-Turn bildet die Einfahrt eines Fahrzeugs in eine Kurve mit steigender Krümmung nach. Ausgehend von der Geradeausfahrt steigt die Querbeschleunigung (bei 60 km/h Fahrgeschwindigkeit) mit  $1 \text{ m/s}^3$  an, bis das Manöver bei Erreichen von  $6 \text{ m/s}^2$  Querbeschleunigung wieder in eine Gerade übergeht, siehe Abbildung 3.

Der J-Turn liefert hauptsächlich eine Aussage über die Kippstabilität der Fahrzeugkombination. Er wird nach ECE-R 13 als Testmanöver für kippvermeidende Systeme (sog. Roll Stability Program RSP) herangezogen (UN-R 13, 2014, Annex 21, 2.1.3).

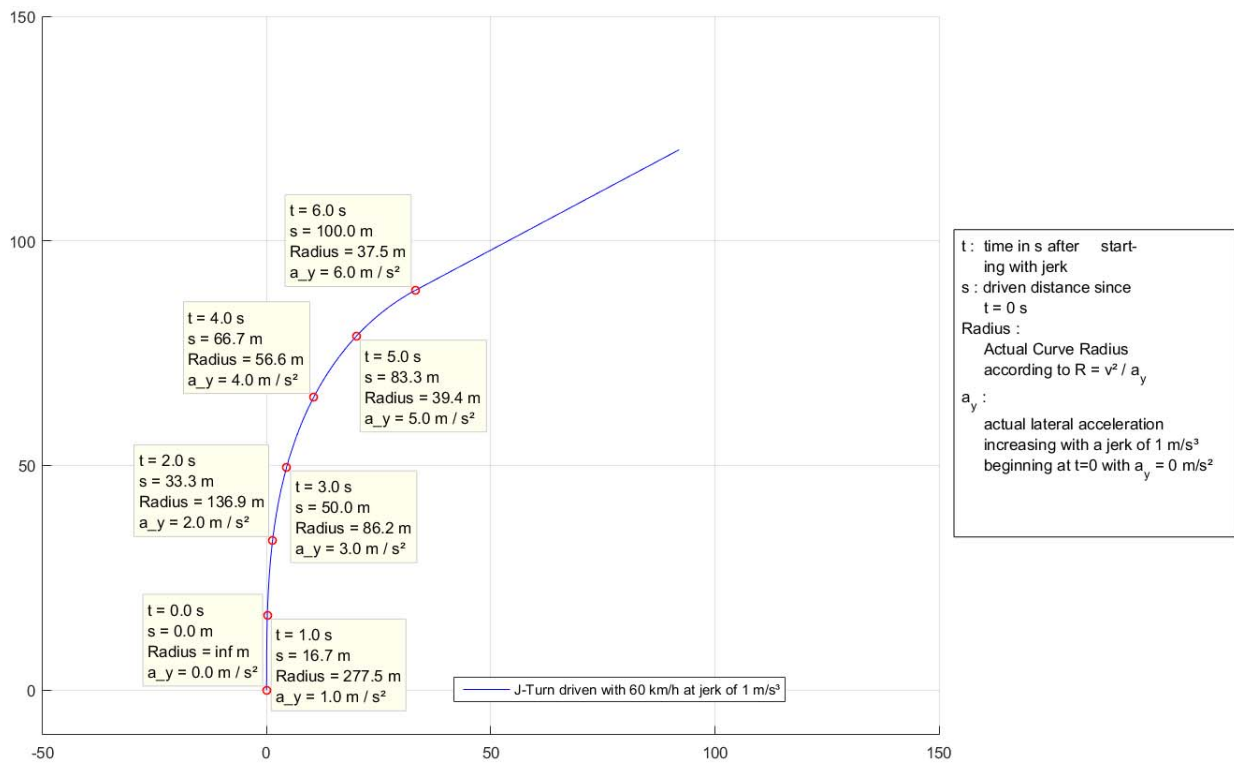


Abbildung 3: J-turn

### 3.2 Doppelter Spurwechsel nach VDA (ISO 3888-2:2011)

Beim doppelten Spurwechsel ist eine Fahrgasse (Pfad) so markiert, dass zunächst ein Versatz nach links und dann ein zweiter Versatz nach rechts zurück in den ursprünglichen Fahrstreifen erfolgt (siehe Abbildung 4), als ob einem Hindernis plötzlich ausgewichen werden müsste.

Der doppelte Spurwechsel liefert hauptsächlich eine Aussage über die Richtungsstabilität. Er wird nach ECE-R 13 als Testmanöver für Directional Control vorgeschlagen (UN-R 13, 2014, Annex 21, 2.1.3).

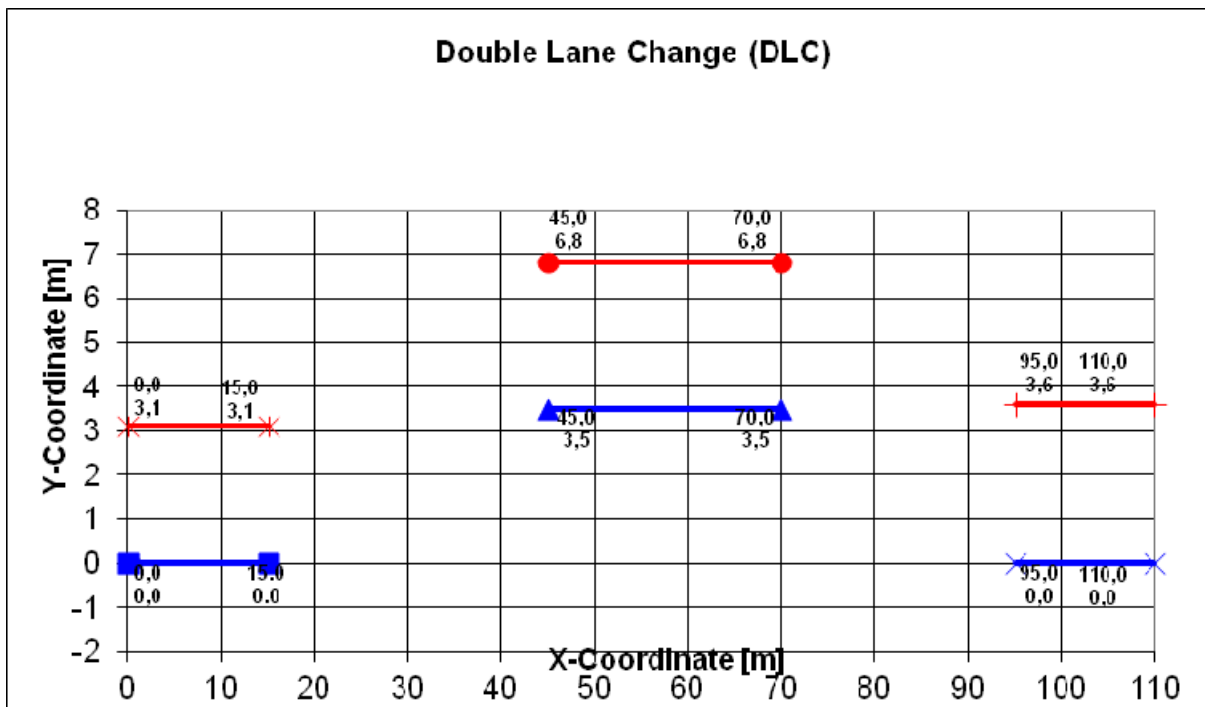


Abbildung 4: Doppelter Spurwechsel

### 3.3 Fahrzeugkombinationen

Als Versuchsfahrzeugkombinationen wurden aus den in Abschnitt 2.1 und 2.2 beschriebenen Fahrzeugen die in Tabelle 1 dargestellten Kombinationen gebildet. Die Achslasten aller Fahrzeuge wurden mit Achsmessplatten gemessen und die Schwerpunkthöhe wurde berechnet.

Wie bereits in Abschnitt 2.4 ausgeführt, führte die Sicherheitsausrüstung dazu, dass in Einzelfällen (Konfigurationen 2, 4 und 5) die Masse der Fahrzeugkombination 40 Tonnen überstieg. Im kombinierten Verkehr mit Lang-Lkw-Kombinationen (Container) darf die Gesamtmasse einer Fahrzeugkombination unter bestimmten Voraussetzungen 44 Tonnen betragen, so dass auch diese schwereren Fahrzeuge keine unrealistischen Situationen darstellen.

Als Referenz (Konfiguration 1) wurde eine Sattelzugmaschine mit Auflieger - also eine konventionelle Kombination - herangezogen. Als Beladung wurde ein Gesamtkombinationsgewicht von 38 t gewählt. Die Höhe der Beladung wurde so eingestellt, dass sich eine Schwerpunkthöhe für den Auflieger von 1,95 m ergibt, was 75% der maximal möglichen Beladungsschwerpunkthöhe entspricht. Verglichen mit im Straßenverkehr üblichen Beladungsvarianten ist dies eine hohe Beladung. Bei Ausladung auf im kombinierten Verkehr maximal erlaubte 44 t würde eine Aufliegerschwerpunkthöhe von 1,95 m 71% des maximalen Wertes entsprechen.

An diese Fahrzeugkonfiguration konnte weiterhin ein leerer Deichselanhänger hinter diese Kombination gehängt werden, ohne die im kombinierten Verkehr erlaubten 44 t zu überschreiten (Konfiguration 2, Lang-Lkw Typ 2).

Durch Beladen lediglich des Zentralachsanhängers ergibt sich Konfiguration 3, ebenfalls Lang-Lkw Typ 2. Die Beladungsschwerpunkthöhe wurde auf 70% eingestellt, was wie beim Sattelaufleger zu einer Schwerpunkthöhe von Anhänger und Beladung von 1,94 m führt. Die 70% wurden auch bei allen weiteren Versuchen als Beladungsschwerpunkthöhe annähernd eingestellt, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

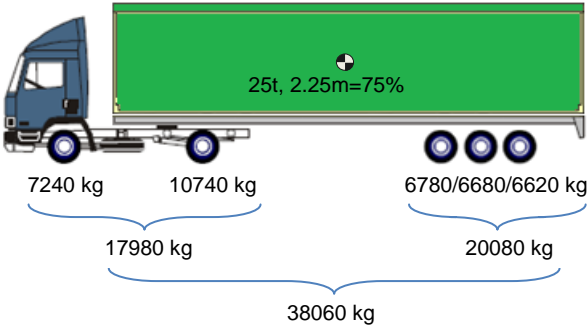
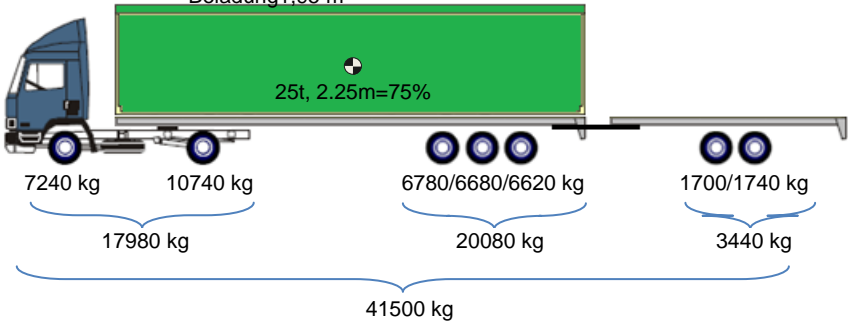
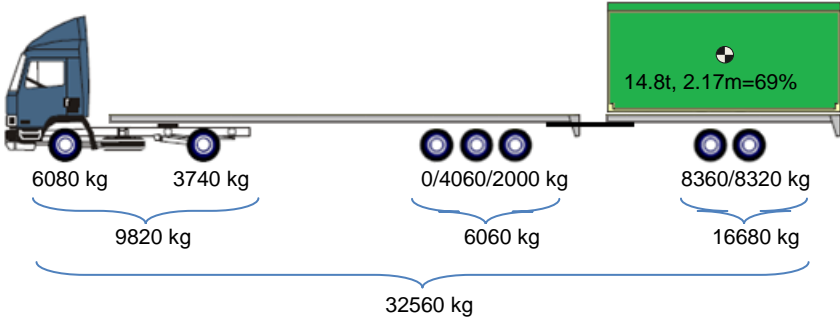
Als vierte Fahrzeugkonfiguration wurde bei einem Lang LKW Typ 2 die Beladung gleichmäßig auf Auflieger und Zentralachsanhänger verteilt. Bei identischer prozentualer Beladungsschwerpunkthöhe sinkt die Schwerpunkthöhe von Beladung und Auflieger bzw. Anhänger durch das geringere Gewicht auf 1,80 m bzw. 1,82 m.

Damit wurden die wesentlichen in der Praxis auftretenden Extrembeladungen im Containerbetrieb mit Lang LKW Typ 2 abgedeckt.

Als Vergleich wurde zusätzlich ein Lang-LKW Typ 3 (Konfiguration 5) untersucht. Die Kombination wurde mit 44 t ausgeladen. Der Auflieger hatte die gleiche Beladung wie bei der vierten Fahrzeugkonfiguration (Lang LKW Typ 2), lag jetzt aber auf einem Dolly und wurde von einem beladenen LKW gezogen. Durch die geringe Zuladung im Zugfahrzeug (die 44 t Gesamtzuggewicht sollten nicht überschritten werden) konnten technisch bedingt mit 66% die bei den anderen Versuchen verwendeten 70% prozentuale Beladungsschwerpunkthöhe nicht ganz erreicht werden, was zu einem leichten Vorteil für diese Fahrzeugkombination führt.

Als sechste Fahrzeugkonfiguration - wie Konfiguration 1 eine konventionelle Konfiguration - wurde der beladene Zentralachsanhänger von einem leeren LKW gezogen. Dies sollte als Vergleich zu der Fahrzeugkonfiguration 3 dienen, bei der der beladene Zentralachsanhänger hinter einem leeren Auflieger gezogen wurde (Lang-LKW Typ 2). Wegen der besseren Vergleichbarkeit mit Lang-LKW Typ 2 wurde kein Deichselanhänger mit Drehschemel verwendet.

Tabelle 1: Fahrzeugkombinationen und Massen

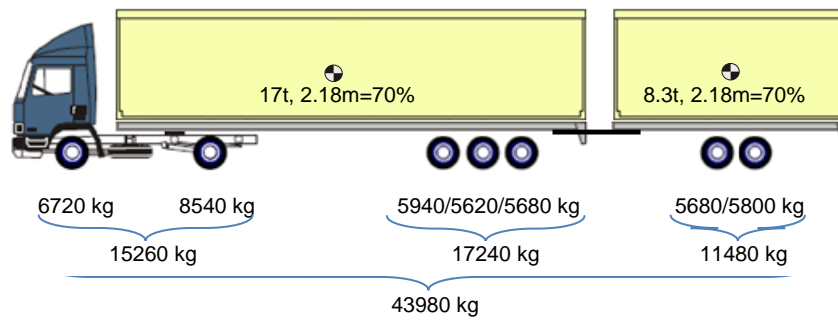
| Nr. | Beschreibung  |
|-----|---|
| 1   | <p><b>Konventionell: Sattelkraftfahrzeug (5 Achsen), beladen</b></p> <p>Schwerpunkthöhe Auflieger inkl. Beladung 1,95 m</p>  <p>25t, 2.25m=75%</p> <p>7240 kg    10740 kg    6780/6680/6620 kg</p> <p>17980 kg    20080 kg</p> <p>38060 kg</p>  |
| 2   | <p><b>Typ 2: Sattelkraftfahrzeug (7 Achsen), beladener Auflieger + leerer ZA</b></p> <p>Schwerpunkthöhe Auflieger inkl. Beladung 1,95 m</p>  <p>25t, 2.25m=75%</p> <p>7240 kg    10740 kg    6780/6680/6620 kg    1700/1740 kg</p> <p>17980 kg    20080 kg    3440 kg</p> <p>41500 kg</p> |
| 3   | <p><b>Typ 2: Sattelkraftfahrzeug (7 Achsen), leerer Auflieger + beladener ZA</b></p> <p>Schwerpunkthöhe Anhänger inkl. Beladung 1,94 m</p>  <p>14.8t, 2.17m=69%</p> <p>6080 kg    3740 kg    0/4060/2000 kg    8360/8320 kg</p> <p>9820 kg    6060 kg    16680 kg</p> <p>32560 kg</p>     |

4

**Typ 2: Sattelkraftfahrzeug (7 Achsen), Auflieger und Zentralachsanhänger gleichmäßig beladen**

Schwerpunkthöhe Auflieger inkl. Beladung 1,80 m

Schwerpunkthöhe Anhänger inkl. Beladung 1,82 m

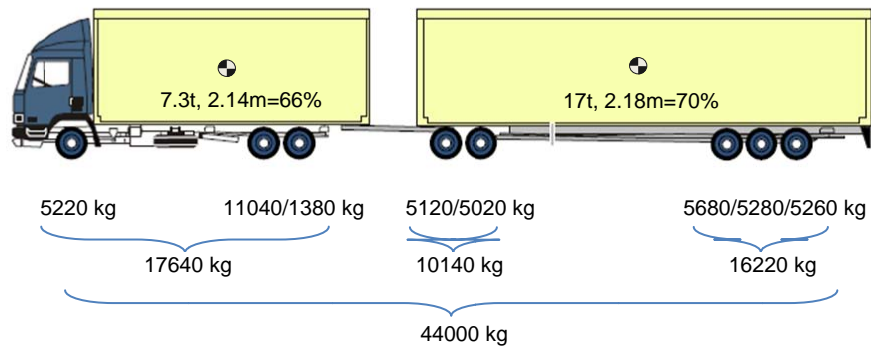


5

**Typ 3: LKW + Dolly + Auflieger gleichmäßig beladen**

Schwerpunkthöhe technisch bedingt nicht höher realisierbar

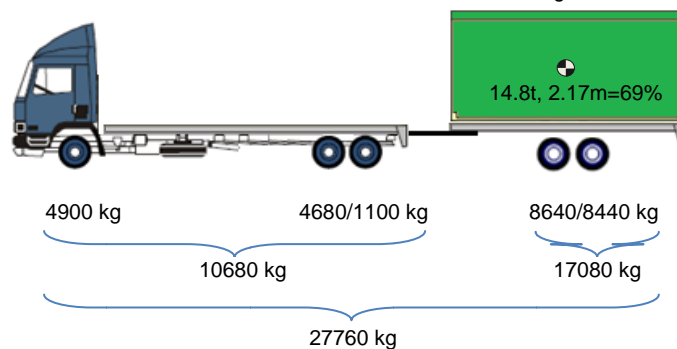
Schwerpunkthöhe Auflieger inkl. Beladung 1,80 m



6

**Konventionell: Motorwagen (leer) + Zentralachsanhänger (beladen)**

Schwerpunkthöhe Anhänger inkl. Beladung 1,94 m



### 3.4 Versuchsablauf

Beim Manöver J-Turn wurde die Einfahrtgeschwindigkeit langsam gesteigert (zunächst um 5 km/h, nahe der Kippgrenze um 1-3 km/h), um zunächst die Kippgrenze zu ermitteln. Als zweites Manöver wurde überprüft, ob mit Kippgrenzengeschwindigkeit auch ein doppelter ungebremsster Spurwechsel stabil gefahren werden kann. Alle Versuche wurden mindestens zweimal durchgeführt.

Bei allen Versuchen war die Rollstabilisierungsfunktion in allen Anhängern aktiviert. Bei allen Lang-Lkw-Varianten war das Stabilisierungssystem ESC immer aktiviert; bei einzelnen Versuchen der konventionellen Fahrzeuge wurde es deaktiviert (in Tabelle 2 jeweils explizit vermerkt). Fahrzeuge ohne ESC sind nicht mehr als Neufahrzeuge zu erwerben, der Betrieb von Alt-Fahrzeugen ohne ESC ist aber weiterhin möglich. Bei Lang-LKW dagegen ist der Fall "ohne ESC" durch die Ausnahmeverordnung ausgeschlossen.

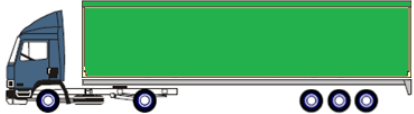
Die zur Verfügung stehende Strecke erlaubte je nach Motorleistung und Zuggewicht nur Geschwindigkeiten bis maximal 78 km/h, in der Regel 75 km/h, was zur Bestimmung der Kippgrenze und der Fahrstabilität in der Regel ausreichend war.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Kippen

Die Fahrzeugkombination gilt als gekippt, wenn innerhalb des Fahrversuchs bei mindestens einem der Stützräder (zwei Stützräder je Anhänger, keine Stützräder für die Dolly-Achsen) den Boden berührt hat (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Ergebnisse Kippen

|   | Fahrzeugkonfigurationen  | Kippgrenze<br>[km/h]<br>noch nicht gekippt<br>(gekippt) | Doppelter<br>Spur-<br>wechsel<br>bei 75 km/h |
|---|--|---|--|
| 1 | <u>Konventionell:</u><br>SZM + AF (fast voll beladen)<br> | 53 (55) ohne ESC<br>75 (78)                             | stabil                                       |

|   |   |  |  |
|---|---|--|--|
| 2 | <u>Typ 2:</u><br>SZM + AF (voll bel.) + Zentralachsanhänger<br>(leer) | 75<br>(höhere<br>Geschwindigkeiten<br>nicht getestet)    | stabil   |
| 3 | <u>Typ 2:</u><br>SZM + AF (leer) + Zentralachsanhänger<br>(voll bel.) | 72 (75)  | stabil   |
| 4 | <u>Typ 2:</u><br>SZM+AF+Zentralachsanhänger gleichmäßig<br>bel. 44 t  | 75<br>(höhere<br>Geschwindigkeiten<br>nicht erreicht)    | stabil   |
| 5 | <u>Typ 3:</u><br>LKW + Dolly + AF gleichmäßig beladen 44 t            | 75<br>(höhere<br>Geschwindigkeiten<br>nicht<br>erreicht) | stabil   |
| 6 | <u>Konventionell:</u><br>Lkw (leer) + Zentralachsanhänger (voll)      | 63 (65)  | stabil bis<br>70 km/h<br>(ohne ESP<br>55 km/h) |

Durch Einsatz des Stabilisierungssystems ESC erhöht sich bei einer Sattelzugmaschine mit beladenem Auflieger (Fahrzeugkonfiguration 1) die maximale Einfahrtgeschwindigkeit in dem modifizierten J-Turn Manöver von 53 km/h (55 km/h bei erster Bodenberührung der Stützräder) auf 75 (78) km/h. Auch der Lang-LKW



Typ 2 in Konfiguration voll (Trailer) und leer (Zentralachsanhänger) war bei 75 km/h Einfahrgeschwindigkeit stabil.

Mit voll ausgeladenem Zentralachsanhänger hinter einer Sattelzugmaschine mit leerem Auflieger (Fahrzeugkonfiguration 3) sinkt die Kippgrenze leicht; die Fahrzeugkombination bleibt stabil bis zu einer Einfahrgeschwindigkeit von 72 km/h (beginnendes Kippen bei 75 km/h).

Der Lang-Lkw Typ 3 (gleichmäßig beladen) bleibt stabil bis 75 km/h; höhere Geschwindigkeiten konnten nicht erreicht werden). Alle diese Fahrzeugkombinationen waren im doppelten Spurwechsel kippstabil bis 75 km/h.

Einen Sonderfall stellt die konventionelle, bereits heute zugelassene Fahrzeugkombination leerer Motorwagen und beladener Zentralachsanhänger dar: Hier ist die Einfahrgeschwindigkeit in den J-Turn ohne Kippen nur 63 km/h, beginnendes Kippen tritt auf bei 65 km/h, und im doppelten Spurwechsel war die Kombination nur bis 70 km/h stabil (ohne ESC 55 km/h).

In Bezug auf Kippen zeigt der Lang-Lkw Typ 2 mit ESC damit kein schlechteres fahrdynamisches Verhalten als andere Fahrzeugkombinationen.

## 4.2 Seitliche Auswanderung (Rearward Amplification)

Aus den je Versuch vorhandenen Fahrzeugmessdaten ergibt sich direkt die Position des Zugfahrzeugs (Sattelzugmaschine oder Motorwagen) sowie die Orientierung:

$$[\varphi_{Long}; \varphi_{Lat}; \psi] \text{ (Längengrad, Breitengrad und Gierwinkel).}$$

Das erste Segment jeder Fahrt ist eine Gerade; unter Kenntnis eines - stets konstant gehaltenen - Punktes auf dieser Gerade und dem Gierwinkel der Geraden werden die Koordinaten in ein lokales System (Einheit Meter und °) mit der Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$  für den Verdrehwinkel  $\varphi$  überführt:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix},$$

$$[x_0, y_0, \psi_{relativ}] = \mathbf{T} \cdot [\varphi_{Long}; \varphi_{Lat}; \psi].$$

Die zum Zugfahrzeug (Index 0) relativen Knickwinkel des ersten  $\varphi_{01}$  und eventuell zweiten Anhängers  $\varphi_{12}$  ergeben sich aus der zeitlichen Integration der Differenz der jeweils bekannten Drehraten  $\dot{\psi}_i$  (unter Korrektur des eventuell vorhandenen Offsets während der Geradeausfahrt):

$$\varphi_{01} = \int \dot{\psi}_0 - \dot{\psi}_1 dt,$$

$$\varphi_{12} = \int \dot{\psi}_1 - \dot{\psi}_2 dt.$$

Die Gierwinkel  $\psi$  der Anhänger im lokalen, ortsfesten x-y-System sind dann

$$\psi_1 = \psi_0 + \varphi_{01},$$

$$\psi_2 = \psi_1 + \varphi_{12} = \psi_0 + \varphi_{01} + \varphi_{12}.$$

Im lokalen x-y-System ergeben sich die Endpunkte der jeweiligen Fahrzeuge aus einer Koordinatentransformation der fahrzeugbezogenen Ortsvektoren mit der relevanten Länge zwischen Kupplungspunkt und Fahrzeugheck  $l_i$ :

$$[x_1, y_1] = [x_0, y_0] + \mathbf{T} \cdot [l_{\text{Zugfahrzeug}}, 0],$$

$$[x_2, y_2] = [x_1, y_1] + \mathbf{T} \cdot [l_{\text{Anhänger,1}}, 0],$$

$$[x_3, y_3] = [x_2, y_2] + \mathbf{T} \cdot [l_{\text{Anhänger,2}}, 0].$$

Die relevanten Größen sind in Abbildung 5 dargestellt.

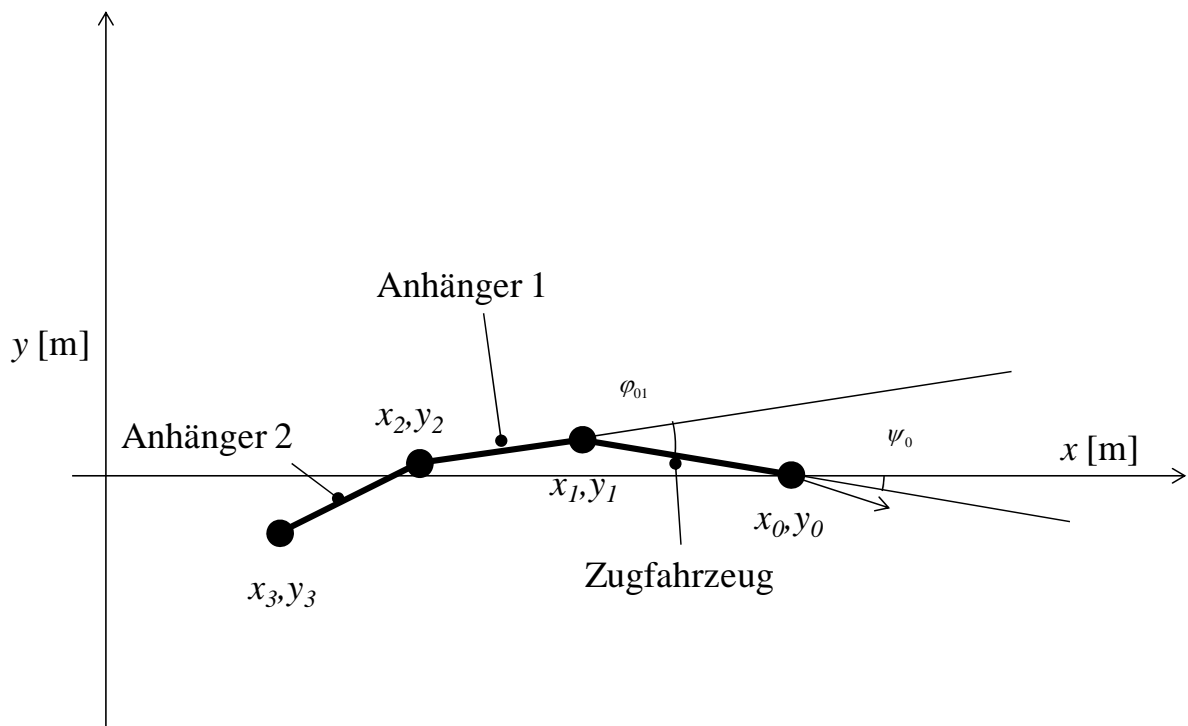


Abbildung 5: Koordinaten im lokalen x-y-System

Daraus ergeben sich die Linien der von den Punkten 0 bis 3 überstrichenen Punkte, beispielhaft dargestellt in Abbildung 6. Zu erkennen ist, dass sowohl die Spurlinien Mitte Vorderachse des Zugfahrzeugs und Kupplungspunkt (Hinterachse SZM beziehungsweise Heck des Motorwagens) nahezu identisch sind. Das Heck des Sattelauflegers (bei Sattelzug und Typ 3, schwarz gepunktete Linie) wandert z. B. bei Einleitung der Kurvenfahrt, (1), um etwa 40 cm aus.

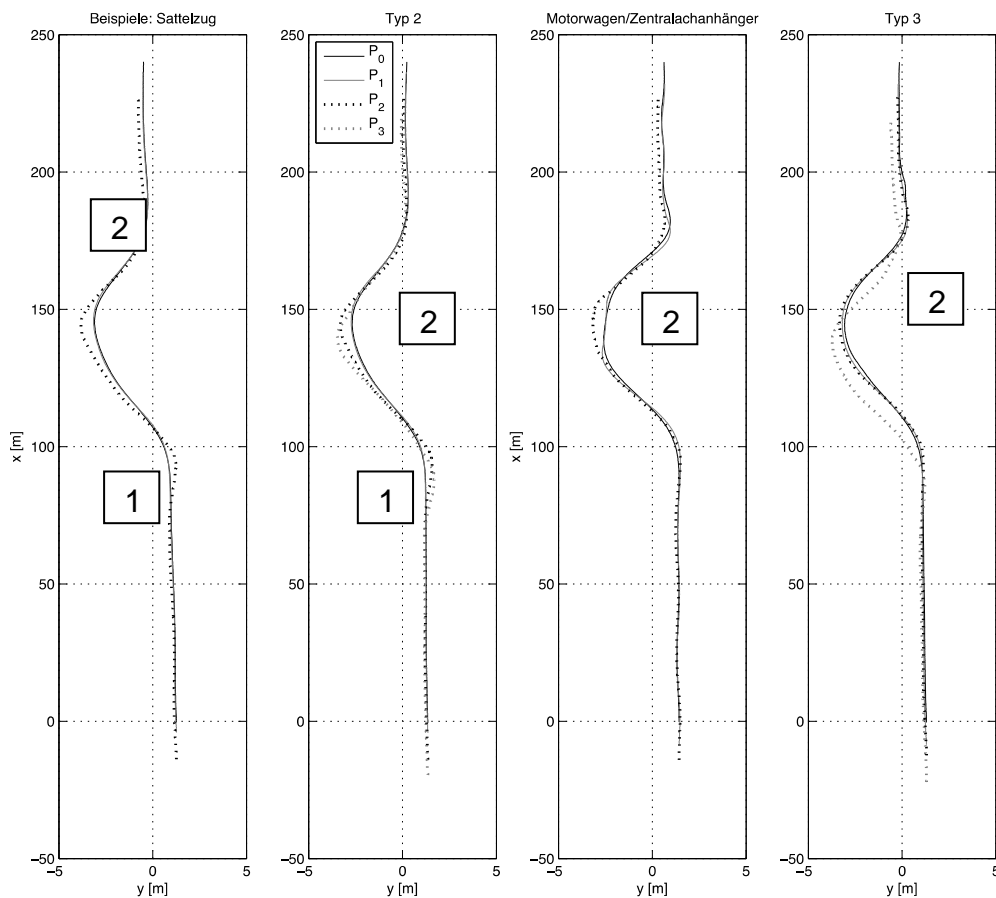


Abbildung 6: Spurlinien der Punkte P0 bis P3 (P3 nicht für die konventionellen Kombinationen) verschiedener Fahrzeugkombinationen. P0: Vorderachse Zugfahrzeug, P1: Heck / Kupplungspunkt Zugfahrzeug, P2: Kupplungspunkt (Dolly) oder Heck erster Anhänger, P3: Heck zweiter Anhänger. Der mit „1“ gekennzeichnete Punkt liegt bei Einleitung des Spurwechsels, „2“ am Ort des maximalen Spurversatzes.

#### 4.2.1 Relative Abweichung

Als Kennwert zur Beschreibung der Auswanderung der Fahrspur werden zunächst die maximalen Abweichungen in Punkt 1 (Einleitung der Kurvenfahrt) und Punkt 2 (Scheitelpunkt des Spurwechsels) als Funktion der zurückgelegten Strecke in x-Richtung herangezogen:

$$RA1 = \min[y_0(x) - y_3(x)],$$

$$RA2 = \max[y_0(x) - y_3(x)].$$

Diese Kenngrößen sind beispielhaft in Abbildung 7 dargestellt.

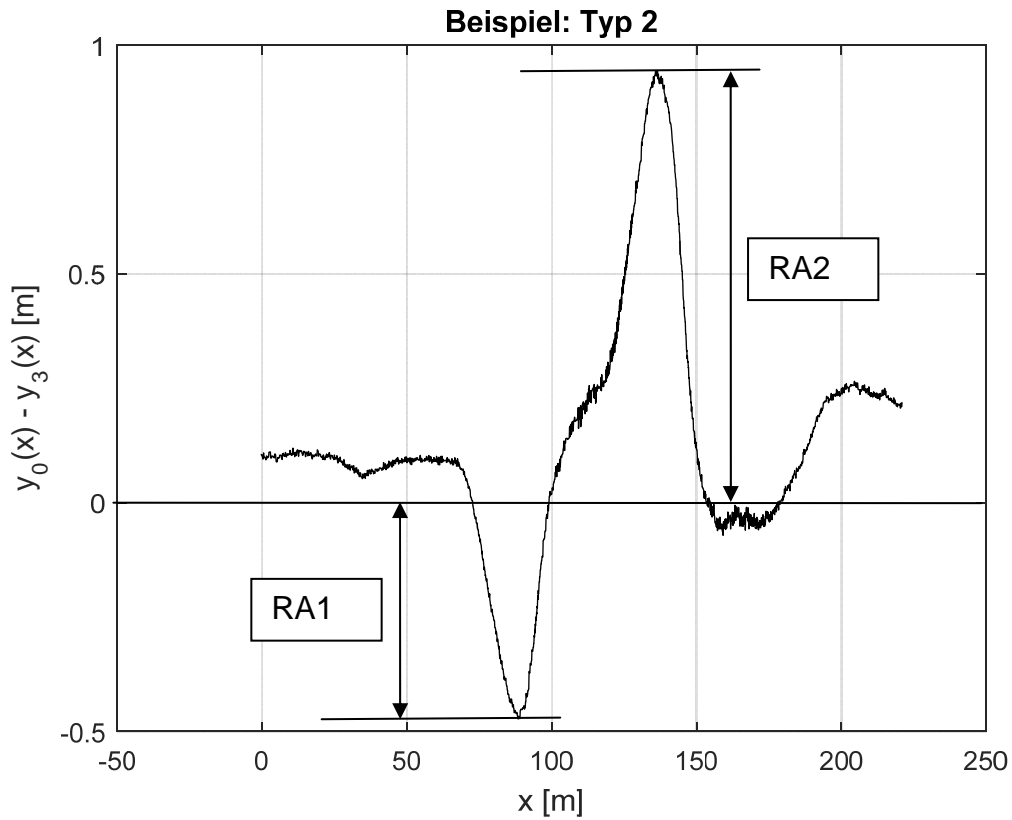


Abbildung 7: Relative Abweichung der Spurlinien von Vorderachse und Heck der Fahrzeugkombination am Beispiel einer Messung des Typs 2.

Im Ergebnis zeigt sich folgendes Bild für RA1 und RA2 (siehe Abbildung 8):

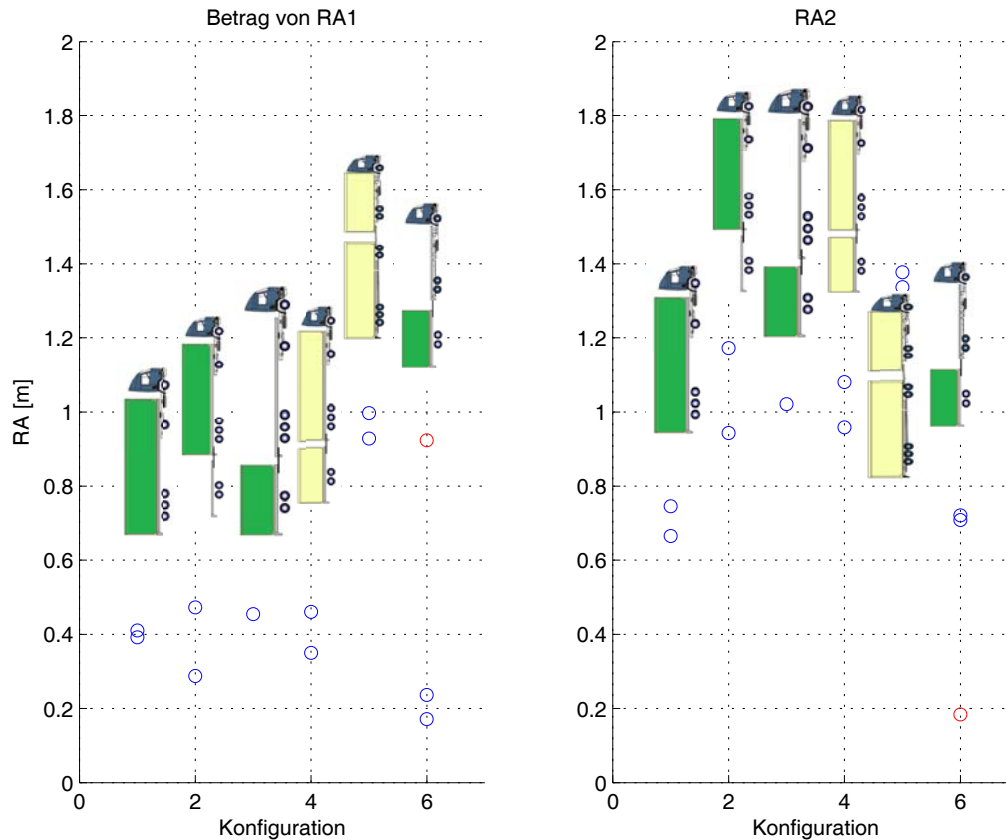


Abbildung 8: Relative Abweichungen zum Zeitpunkt des eingeleiteten Spurwechsels (links, RA1) und am Scheitelpunkt des Spurwechsels (rechts, RA2) als Funktion der Konfiguration. Konfigurationen analog zu Tabelle 1 und Tabelle 2. Rot gekennzeichnet sind die Versuche mit deaktiviertem ESC.

Es zeigt sich (s. Abbildung 8), dass die relative Abweichung des Lang-Lkw Typ 2 stets unterhalb der Abweichung des Lang-Lkw Typ 3 bleibt (bei eingeleitetem Spurwechsel auch unterhalb des Wertes einer Messung eines konventionellen Motorwagens mit Zentralachsanhänger, es handelt sich hierbei um die Fahrt mit abgeschaltetem ESC).

#### 4.2.2 Absoluter seitlicher Platzbedarf

Die absoluten Werte für RA2 von bis zu 1,4 Meter für den Lang-Lkw Typ 3 erscheinen zunächst relativ groß. Zu beachten ist hierbei aber, dass Phasenverschiebungen zum Teil dafür sorgen, dass die Werte für RA2 größer sind als der reale zusätzliche seitliche Platzbedarf bei Spurwechselmanövern. Die Ermittlung des tatsächlichen zusätzlichen seitlichen Platzbedarfs durch Auswandern der Anhänger einer Fahrzeugkombination ist in Abbildung 9 dargestellt.

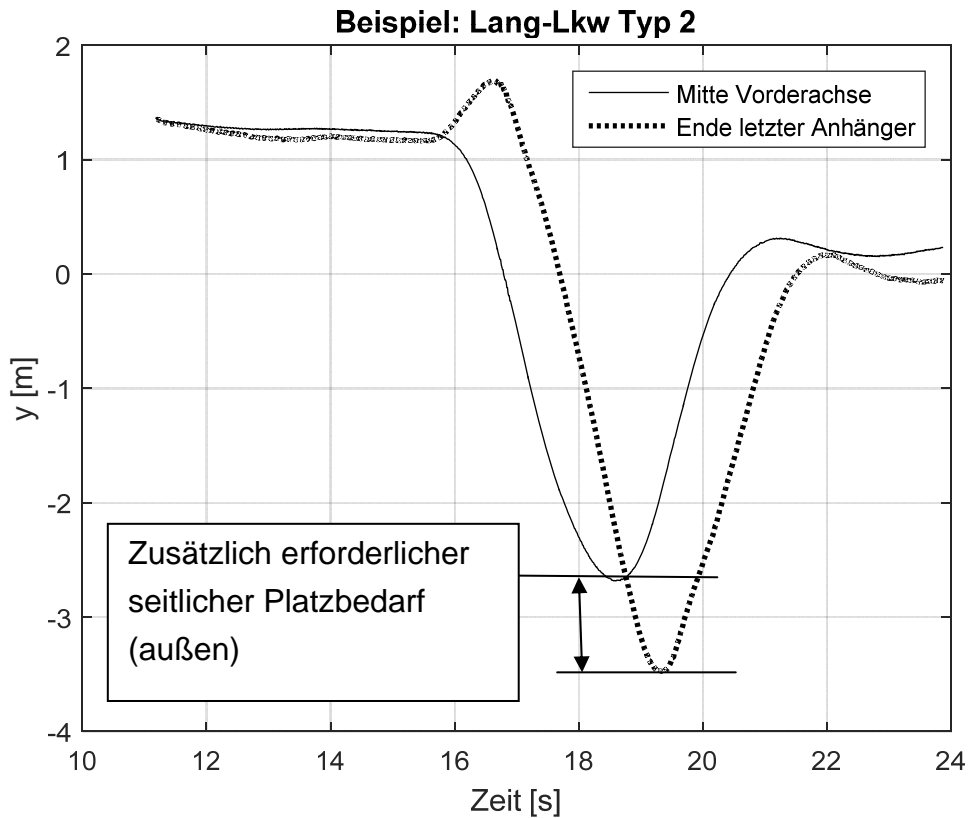


Abbildung 9: Seitliche Positionen als Funktion der Zeit zur Beurteilung des zusätzlich erforderlichen seitlichen Platzbedarfs

Der Vergleich aller getesteten Kombinationen ist in Abbildung 10 dargestellt. Im Ergebnis beträgt der zusätzlich erforderliche seitliche Platzbedarf bei schnellen Ausweichmanövern des Lang-Lkw Typ 2 maximal 1,03 m (Abbildung 10) gegenüber dem konventionellen Sattelzug von maximal 0,73 m. Der Unterschied ist dementsprechend 30 cm oder 30%.

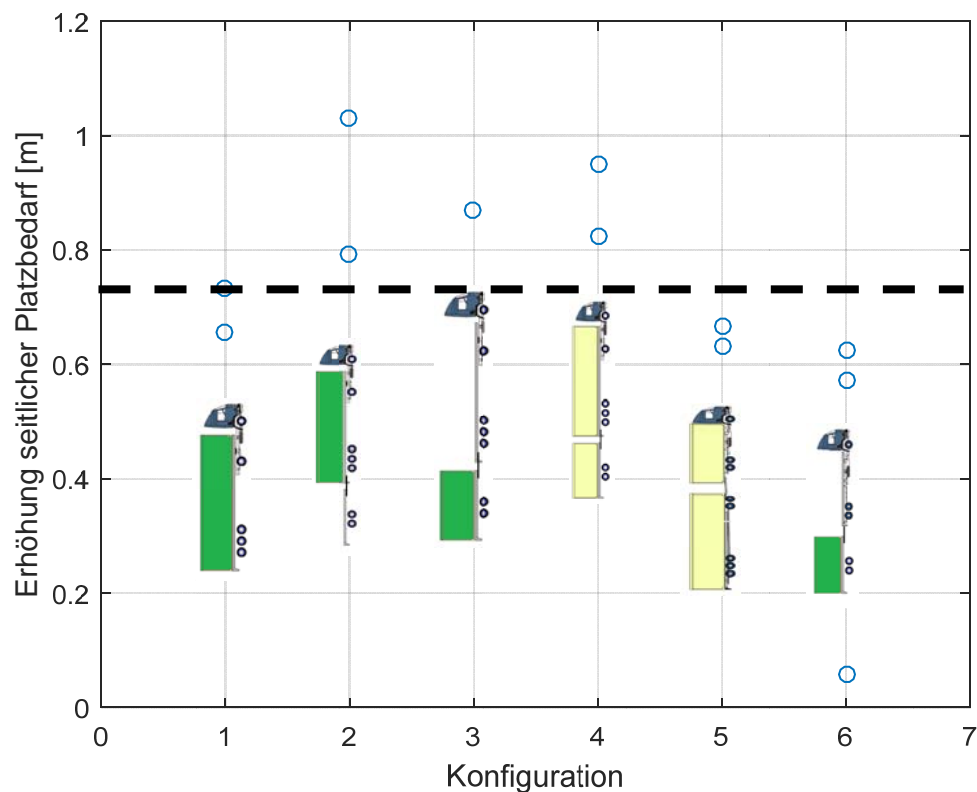


Abbildung 10: Zusätzlicher seitlicher Platzbedarf als Funktion der Fahrzeugkonfiguration (seitlicher Platzbedarf des bereits heute zugelassenen Sattelzugs durch gestrichelte Linie gekennzeichnet)

Die relative Abweichung des Hecks von Lang-Lkw des Typs 2 liegt bei beginnendem Spurwechsel in etwa auf dem Niveau konventioneller Sattelzüge, am Scheitelpunkt des Spurwechsels etwa ein Drittel höher, aber immer noch unter dem Wert des Lang-Lkw Typ 3. Die relative Abweichung aller Kombinationen liegt stets unter 1,4 Meter.

In Bezug auf die relative und absolute Auswanderung des jeweils letzten Anhängers gegenüber dem Zugfahrzeug liegt der Lang-Lkw Typ 2 insbesondere im Kriterium des zusätzlich erforderlichen Platzbedarfs leicht über den anderen untersuchten Fahrzeugkombinationen.

## 5 Zusammenfassung

Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat im Zeitraum 2012 bis 2016 den Feldversuch Lang-Lkw wissenschaftlich begleitet (vgl. IRZIK et al., 2016). In diesem Feldversuch konnten Fragen der fahrdynamischen Stabilität von Lang-Lkw des Typs 2 (konventioneller Sattelzug mit zusätzlichem Zentralachsanhänger; maximale Gesamtmasse des Zugs im kombinierten Verkehr 44 Tonnen) zunächst nicht abschließend beantwortet werden.

Eine belastbare Aussage zur Fahrstabilität ist aufgrund des enormen und in Fahrdynamiksimulationen nicht quantifizierbaren Einflusses des verbauten elektronischen Stabilitätssystems ESC nur anhand von Fahrversuchen möglich.

Als potentiell besonders kritische Faktoren wurden das Kippen des Zugs infolge eingeleiteter Kreisfahrt oder infolge eines hochdynamischen Spurwechsels sowie die vergrößerte relative oder absolute Auswanderung des Zug-Hecks gegenüber des Zugfahrzeugs beim hochdynamischen Spurwechsel identifiziert.

Hierzu wurden Fahrversuche mit verschiedenen beladenen Kombinationen des Typs 2, ergänzend mit konventionellem Sattelzug, Motorwagen mit Zentralachsanhänger und Lang-Lkw des Typs 3 (Motorwagen, Dolly und Sattelaufleger) durchgeführt.

Die Fahrversuche zeigen keine erhöhte Gefährdung des Kippens. Der zusätzliche seitliche Platzbedarf (außen, bei hochdynamischem Spurwechsel) des Lang-Lkws Typ 2 liegt maximal 30 cm über dem größten Wert einer konventionellen Kombination (konventioneller Sattelzug).

Aus wissenschaftlicher Sicht bestehen damit unter fahrdynamischen Gesichtspunkten keine Bedenken gegen eine Fortführung des Betriebs von Lang-Lkw-Kombinationen des Typs 2.



## 6 Literatur

FÖRG & SÜßMANN, 2014: Förg, A., Süßmann, A., Wenzelis, A.: "Lang-LKW: Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt", München.

FÖRG & SÜßMANN, 2016: Förg, A., Süßmann, A., Wenzelis, A., Schmeiler, S.: "Fahrzeugtechnische Eigenschaften von Lang-LKW", München.

IRZIK et al., 2016: Irzik, M., Kranz, T., Bühne, J.-A., Glaeser, K.-P., Limbeck, S., Gail, J., Bartolomaeus, W., Wolf, A., Sistenich, C., Kaundinya, I., Jungfeld, I., Ellmers, U., Kübler, J., Holte, H., Kaschner, R.: „Feldversuch mit Lang-Lkw“, Bergisch Gladbach.

LKWÜberlStVAusnV, 2011: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Verordnung über Ausnahmen von straßenverkehrsrechtlichen Vorschriften für Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge.

R.E.3, 2017: Die Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen: "Consolidated Resolution on the Construction of Vehicles", ECE/TRANS/WP.29/78/Rev.5.

StVZO, 2016: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung.

UN-R 13, 2014: "Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking", UN Regulation No. 13, Annex 21, 2.1.3.

WÖHRMANN, 2008: Wöhrmann, M.: "Fahrdynamische Analyse innovativer Nutzfahrzeugkonzepte", Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., FAT Schriftenreihe Nr. 220.