

Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw

FA 4.254

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. habil. F. Wellner)

Bearbeiter: Wellner, F. / Uhlig, W.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: April 2014

1 Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsprojekts ist es, aus den Informationen des Feldversuchs mit Lang-Lkw eine Abschätzung der Straßenbelastung im Vergleich zur Nutzung konventioneller Fahrzeuge des Schwerverkehrs vorzunehmen, um daraus Schlussfolgerungen hinsichtlich einer Mehr- oder Minderbeanspruchung des Straßenoberbaus durch Lang-Lkw ziehen zu können.

2 Untersuchungsmethodik

Die Bearbeitung des Forschungsprojekts beinhaltet umfangreiche Datenerhebungen mithilfe der am Feldversuch teilnehmenden Transportunternehmen, die Analyse der Fahrzeug- und Transportdaten sowie Vergleichsberechnungen hinsichtlich der Beanspruchungswirkung von Lang-Lkw und konventionellen Lkw auf den Befestigungsaufbau von Straßen. Der Bearbeitungsprozess untergliedert sich in die nachfolgend aufgeführten Arbeitsschritte.

1. Datenerhebung
2. Erstellung einer Datenbank
3. Plausibilitätskontrolle, Datenabgleich
4. Prüfung auf Grenzwertüberschreitungen
5. Datenanalyse Lang-Lkw hinsichtlich straßenbautechnischer Kriterien
6. Ermittlung des äquivalenten konventionellen Fahrzeugkollektivs
7. Ermittlung der äquivalenten Verkehrsstärke des konventionellen Fahrzeugkollektivs
8. Vergleichende Analyse der Transportleistung
9. Vergleichende Analyse des Belastungs-/Beanspruchungsniveaus nach RStO 12 [FGSV, 2012] und RDO Asphalt 09 [FGSV, 2009]

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Erhebungsdaten

Der Gesamterhebungszeitraum erstreckte sich vom 04.03.2013 bis zum 20.09.2013. Von 18 Speditionsunternehmen wurden Achslasten in 2 349 Datensätzen (Fahrten mit Lang-Lkw) dokumentiert. Dies entspricht 31 % der in einem weiteren Teilprojekt (FE 89.273) der wissenschaftlichen Begleituntersuchung parallel durchgeführten Online-Fahrtenerhebung im gleichen Erhebungszeitraum und stellt damit nur eine Stichprobe aus

dem Gesamtkollektiv der im Einsatz befindlichen Lang-Lkw dar. Zu Lang-Lkw Typ 1 [BAST, 2012.1] liegen keine Daten vor, zu Typ 5 lediglich ein Datensatz. Im Ergebnis der Plausibilitätsanalyse wurde ein verwertbarer Datenbestand von 1 746 Datensätzen im Direktverkehr (= 78 %) und 483 Datensätzen im kombinierten Verkehr (= 12 %) ermittelt. Die Gesamtdatenmenge von 2 229 Datensätzen entspricht 95 % des gesamten Datenrücklaufs von den Unternehmen. Die stichprobenartige Kontrolle der Erhebungsdaten durch Datenabgleich mit Dokumentationen anderer Forschungsnehmer von weiteren Teilprojekten der wissenschaftlichen Begleituntersuchung sowie mit Messdaten von zwei stationären Achslastmessstellen im Autobahnnetz ergaben keine nennenswerten Abweichungen.

3.2 Fahrzeuggesamtmassen von Lang-Lkw und Prüfung auf Grenzwertüberschreitung nach der StVZO

Die Verteilungen der Fahrzeuggesamtmassen für Direktverkehr und kombinierten Verkehr sind in Bild 1 und Bild 2 dargestellt. Fahrzeuge im kombinierten Verkehr wurden von drei Unternehmen eingesetzt. Das Maximum der berechneten Fahrzeuggesamtmassen liegt bei 46,4 t im Direktverkehr.

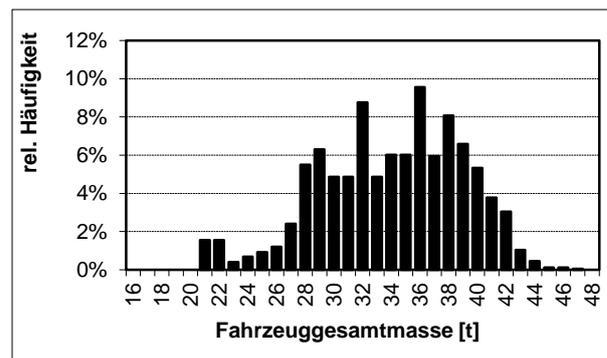


Bild 1: Verteilung der Fahrzeuggesamtmassen von Lang-Lkw im Direktverkehr

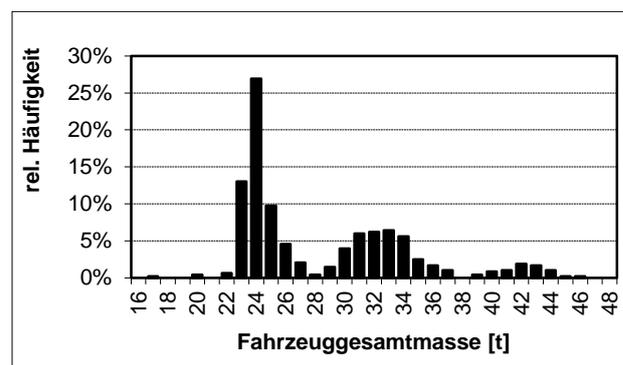


Bild 2: Verteilung der Fahrzeuggesamtmassen von Lang-Lkw im kombinierten Verkehr

Es zeigt sich, dass die Fahrzeuggesamtmassen der Lang-Lkw relativ niedrige Werte aufweisen. Im Direktverkehr beträgt das arithmetische Mittel 33,6 t bei einer Standardabweichung von 5,0 t. Im kombinierten Verkehr ist ein arithmetisches Mittel von 28,0 t mit einer Standardabweichung von 5,6 t zu verzeichnen. Aus den vergleichsweise geringen Fahrzeuggesamtmassen

resultieren entsprechend niedrige Ladungsmassen. Im Direktverkehr ergibt sich eine mittlere Ladungsmasse von 11,6 t bei einer Standardabweichung von 4,7 t. Im kombinierten Verkehr beträgt das arithmetische Mittel der Ladungsmasse 8,5 t bei einer Standardabweichung von 5,8 t. Unter der Annahme, dass die Ladevolumina der Fahrzeuge in der Regel ausgelastet werden, ist also grundsätzlich von vergleichsweise leichten Transportgütern auf Lang-Lkw auszugehen.

Die gemäß § 34 StVZO zulässige Fahrzeuggesamtmasse beträgt für Fahrzeugkombinationen mit mehr als vier Achsen 40 t, für Fahrzeugkombinationen im kombinierten Verkehr 44 t. Im Direktverkehr sind rund 9 %, im kombinierten Verkehr rund 0,5 % der Fahrzeuge überladen gefahren. Für alle Lang-Lkw gesamt betrachtet ergibt sich ein Überladungsanteil von ca. 7 %, der markant niedriger als der Wert für konventionellen Schwerverkehr auf Autobahnen ist. Das Niveau der Überladungen von Lang-Lkw liegt im Direktverkehr zu 91 % bei ≤ 3 t. Im kombinierten Verkehr wurden lediglich zwei Überladungen mit maximal 2 t festgestellt. Die Überladungen sind im Wesentlichen auf 5 der 18 Unternehmen verteilt. Eine Überschreitung von Achslasten tritt nur in einem Fall auf. Diese Achslast stellt gleichzeitig das Maximum aller Achslasten des vorliegenden Datenbestands dar und beträgt 11,7 t. Die Höhe der Achslastüberschreitung beläuft sich demnach auf 0,2 t. Der Einfluss gelifteter Achsen an Lang-Lkw auf die Überschreitung von Grenzwerten nach StVZO ist nicht signifikant. Es waren insgesamt nur 1,4 % der Fahrzeugachsen geliftet, die sich auf drei Unternehmen verteilen. Den größten Anteil gelifteter Achsen an seinen Lang-Lkw hat mit 8 % ein Unternehmen mit Fahrzeugen im kombinierten Verkehr.

3.3 Achslastverteilung von Lang-Lkw

Das Säulendiagramm in Bild 3 verdeutlicht die relative Verteilung der Achslastklassen der Lang-Lkw im Direktverkehr, die durch einen logarithmisch normalverteilten Funktionsverlauf mit ausgeprägtem Maximum in Achslastklasse 4 t geprägt ist. Die Verteilung der dokumentierten Achslasten von Lang-Lkw im kombinierten Verkehr gemäß Bild 4 zeigt ein ausgeprägtes Maximum in der Achslastklasse 3 t, ein lokales Minimum in Achslastklasse 5 t sowie vergleichsweise geringere Häufigkeiten in den oberen Achslastklassen ≥ 7 t.

Der Vergleich beider Verteilungen weist auf die Notwendigkeit einer prinzipiell unterschiedlichen Betrachtungsweise für Lang-Lkw im Direktverkehr und Lang-Lkw im kombinierten Verkehr hin. Aufgrund der Funktionsverläufe ist von einem geringeren Achslastniveau der Lang-Lkw im kombinierten Verkehr auszugehen.

Unter Zugrundelegung der Achslastklassenverteilungen konventioneller Fahrzeuge nach Anlage 1 der RDO Asphalt 09 kann davon ausgegangen werden, dass das Achslastniveau der Lang-Lkw vordergründig der Teilmenge äquivalenter konventioneller Fahrzeuge entspricht, welche innerhalb des Lkw-Gesamtkollektivs dem niedrigeren Achslastbereich zuzuordnen ist.

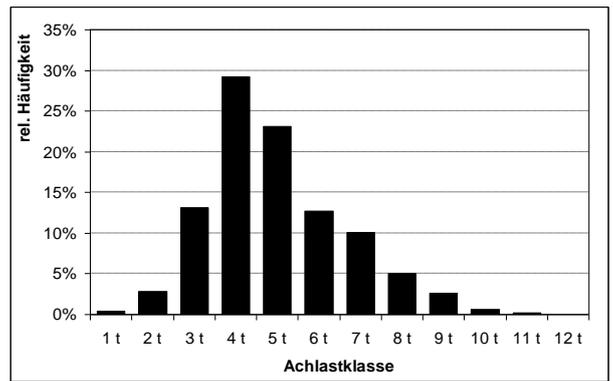


Bild 3: Achslastklassen und zugeordnete Häufigkeiten von Lang-Lkw im Direktverkehr

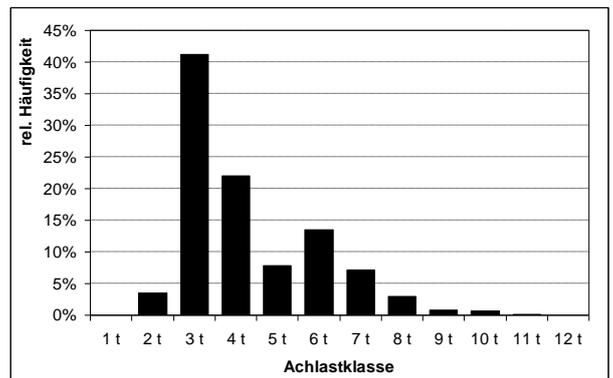


Bild 4: Achslastklassen und zugeordnete Häufigkeiten von Lang-Lkw im kombinierten Verkehr

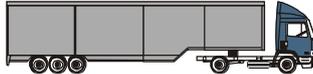
3.4 Dimensionierungsrelevante Kenngrößen nach den RStO 12 für Lang-Lkw

Auf der Grundlage der dokumentierten Fahrzeugdaten ergibt sich für Lang-Lkw im Direktverkehr ein Achszahlfaktor von $f_A = 7,40$ und im kombinierten Verkehr von $f_A = 7,24$. Betreffend der durchschnittlichen Anzahl täglicher äquivalenter 10 t-Achsübergänge EDTA^(SV) errechnet sich unter Ansatz identischer Bedingungen und Faktoren nach RStO 12 für Lang-Lkw im Direktverkehr ein um 52 % höherer Wert als für Lang-Lkw im kombinierten Verkehr.

3.5 Äquivalentes konventionelles Fahrzeugkollektiv

Zur Definition des äquivalenten konventionellen Fahrzeugkollektivs, das zur Erbringung der gleichen Transportleistung der dokumentierten Lang-Lkw-Fahrten erforderlich ist, wurden die Angaben in der Datenbank des Teilprojekts FE 89.273 analysiert sowie Befragungen der beteiligten Unternehmen durchgeführt. Im Ergebnis wurden gemäß Tabelle 1 die fünfachsigen Fahrzeugtypen 41, 42 und 98 nach TLS 2012 [BASt, 2012.2] als äquivalente konventionelle Fahrzeugtypen ermittelt, wobei Typ 98 mit einem Anteil von 82 % im Direktverkehr und 73 % im kombinierten Verkehr deutlich überwiegt.

Tabelle 1: Äquivalente konventionelle Fahrzeugtypen

FZTYP	Symbol
41	
42	
98	

Die Anzahl äquivalenter konventioneller Lkw errechnet sich aus dem Verhältnis des Ladevolumens der Lang-Lkw zum Ladevolumen der äquivalenten konventionellen Lkw. Der Einsatz eines Lang-Lkw bedingt in Abhängigkeit der Fahrzeugtypen den äquivalenten Einsatz von rechnerisch 1,30 bis 1,69 konventionellen Lkw. In Gesamtbetrachtung der Lang-Lkw ergibt sich im Direktverkehr ein Verkehrsstärkefaktor von $f_{DTVSV} = 1,53$ und im kombinierten Verkehr ein Wert von $f_{DTVSV} = 1,49$. Die Anzahl der Achsübergänge reduziert sich bei Einsatz von Lang-Lkw im Direktverkehr um 3 %, im kombinierten Verkehr erhöht sie sich um 2 %.

3.6 Vergleich der Achslastkollektive von Lang-Lkw und äquivalenten konventionellen Lkw

Die Ermittlung des Achslastkollektivs äquivalenter konventioneller Lkw umfasst die rechnerische Verteilung der Lang-Lkw-Ladungen auf äquivalente konventionelle Lkw sowie die anschließende Berechnung und Klassifizierung der resultierenden Achslasten. Gemäß Bild 5 liegt im Direktverkehr das Niveau der Achslastklassen von Lang-Lkw im höheren Bereich ab 9 t leicht über dem der konventionellen Lkw. In Achslastklasse 7 t haben konventionelle Lkw deutlich höhere Anteile. Deren Verteilungsfunktion zeigt einen bimodalen Verlauf mit lokalen Maxima in den Achslastklassen 4 t und 7 t. Diese Maxima resultieren im Wesentlichen aus der spezifischen Achslastverteilung des Fahrzeugtyps 98. Dabei werden das lokale Maximum bei 4 t durch die drei Achsen des Aufliegers und das lokale Maximum bei 7 t durch die beiden Achsen des Zugfahrzeugs hervorgerufen. Bild 6 zum kombinierten Verkehr zeigt bimodale Verläufe beider Verteilungsfunktionen, wobei im Bereich des rechtsseitigen lokalen Maximums bei Achslastklasse 6 t sowie in nachfolgender Achslastklasse 7 t signifikant höhere Anteile der Achslasten konventioneller Fahrzeuge zu verzeichnen sind. In Achslastklasse 8 t überwiegt der Anteil von Lang-Lkw-Achsen, die höheren Achslastklassen weisen keine ausgeprägten Unterschiede auf.

Die unternehmensbezogene Analyse der Achslastklassenverteilung ergab teilweise signifikante Unterschiede, wobei sich besonders am einzigen im Feldversuch vorhandenen neunachsigen Lang-Lkw mit Dreifachachse am Antriebsaggregat ein deutlich niedrigeres Achslastniveau als bei konventionellen Lkw zeigte.

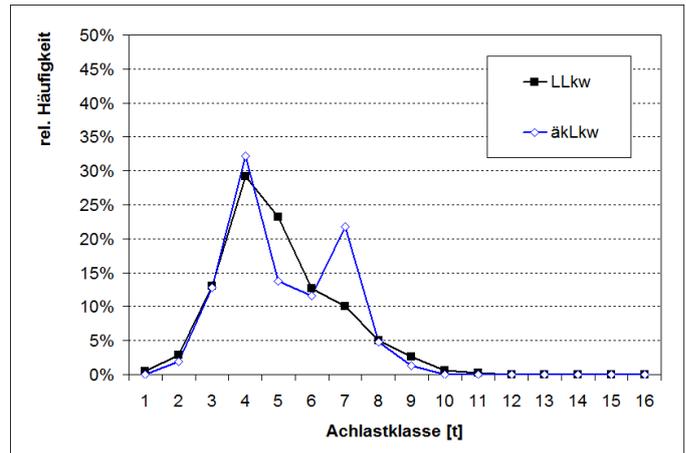


Bild 5: Achslastklassenverteilung von Lang-Lkw und äquivalenten konventionellen Lkw im Direktverkehr

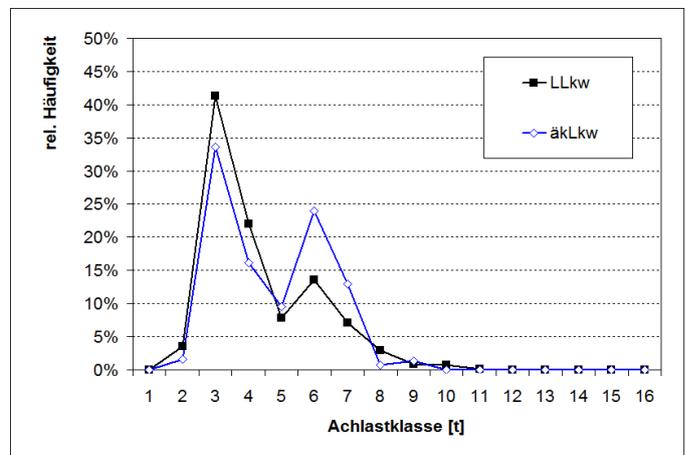


Bild 6: Achslastklassenverteilung von Lang-Lkw und äquivalenten konventionellen Lkw im kombinierten Verkehr

3.7 Beanspruchungswirkung von Lang-Lkw und konventionellen Lkw auf die Straßenbefestigung nach den RStO 12

Die Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse für $EDTA^{(SV)}$ in Tabelle 2 zeigt, dass die Anzahl der äquivalenten 10 t-Achsübergänge für Lang-Lkw kleiner als die der zugehörigen konventionellen Lkw ist.

Tabelle 2: Verhältnis der Anzahl äquivalenter 10 t-Achsübergänge $EDTA^{(SV)}$ von Lang-Lkw und äquivalenten konventionellen Lkw

Direktverkehr		kombinierter Verkehr	
LLkw	äkLkw	LLkw	äkLkw
95 %	100 %	84 %	100 %

Im Direktverkehr liefert die Berechnung für Lang-Lkw einen um 5 % niedrigeren Wert für $EDTA^{(SV)}$, im kombinierten Verkehr einen um 16 % niedrigeren $EDTA^{(SV)}$ -Wert als für das äquivalente konventionelle Fahrzeugkollektiv.

3.8 Beanspruchungswirkung des Gesamtkollektivs Schwerverkehr auf die Straßenbefestigung bei Einsatz von Lang-Lkw

3.8.1 Definition der Achslastkollektive

Die Analyse des Beanspruchungsniveaus der Straßenbefestigung bei Einsatz von Lang-Lkw erfolgte auf Grundlage einer Gegenüberstellung der Beanspruchung durch das Achslastkollektiv BAB-Fernverkehr nach RDO Asphalt 09 und BAB-Fernverkehr mit Lang-Lkw. Das Vergleichskollektiv BAB-Fernverkehr mit Lang-Lkw wurde durch arithmetische Substitution eines Teils konventioneller Lkw durch Lang-Lkw definiert. Unter Bezug auf die Ergebnisse des Teilprojekts FE 89.273 wurden Vergleichsberechnungen für drei verschiedene Anteile Lang-Lkw mit 2, 5 und 9 % am Gesamtaufkommen BAB-Fernverkehr durchgeführt. Die Berechnung der resultierenden Achslastkollektive ergab bei steigendem Anteil Lang-Lkw eine leichte Verschiebung der relativen Anteile in Richtung der unteren Achslastklassen bis 6 t (Bild 7).

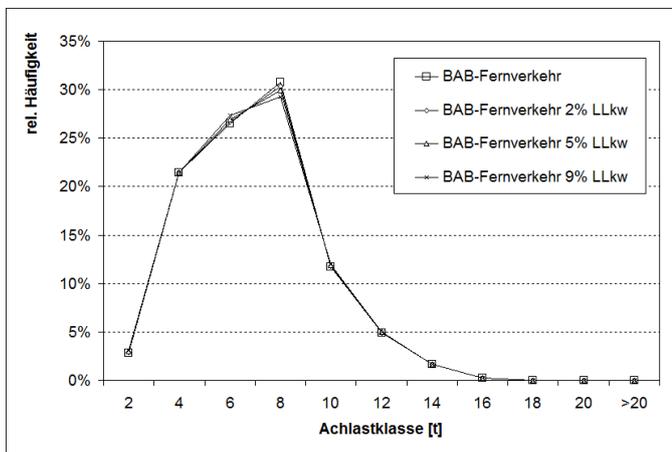


Bild 7: Achslastkollektive BAB-Fernverkehr

3.8.2 Vergleichende Analyse der Beanspruchungswirkung auf die Straßenbefestigung nach RStO 12

Die Berechnung der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung B erfolgt analog Anhang 2, Beispiel 1 der RStO 12 mit konstanten Faktoren. Aufgrund der Proportionalität zur B-Zahl stellt sich unabhängig vom Ausgangswert des DTV^(SV) für BAB-Fernverkehr ohne Lang-Lkw die gleiche Relation zwischen den B-Zahlen der Vergleichsvarianten ein. Das Ergebnis liefert für alle Fahrzeugkollektive mit Lang-Lkw etwas niedrigere B-Zahlen als für das Vergleichskollektiv ohne Lang-Lkw. Der Unterschied ist jedoch nur marginal und beträgt gemäß Tabelle 3 weniger als 1 %. Mit zunehmendem Anteil Lang-Lkw ist eine zunehmende, vergleichsweise geringe Reduzierung der B-Zahl zu verzeichnen. Im gleichen Verhältnis wie die B-Zahl stellt sich die Anzahl der äquivalenten 10 t-Achsen EDTA^(SV) ein.

Tabelle 3: Ergebnisse der Vergleichsberechnung nach RStO 12 für BAB-Fernverkehr ohne Lang-Lkw und BAB-Fernverkehr mit Lang-Lkw-Anteil

	BAB-Fernverkehr	BAB-Fernverkehr LLkw		
		2 %	5 %	9 %
Anteil LLkw	0 %	2 %	5 %	9 %
f _A	4,50	4,55	4,61	4,70
DTV ^(SV)	1 000	988	972	952
EDTA ^(SV)	2 084	2 081	2 077	2 073
B-Zahl	36,92 Mio.	36,87 Mio.	36,79 Mio.	36,71 Mio.
Verhältnis	100,00 %	99,84 %	99,64 %	99,43 %

Auf der Grundlage der Berechnungsergebnisse ist davon auszugehen, dass der Einsatz von Lang-Lkw mit den hier untersuchten Anteilen von bis zu 9 % am gesamten Schwerverkehr BAB-Fernverkehr keine Änderung der Belastungsklasse und damit keine Auswirkung auf die Dimensionierung des Oberbaus von Straßen nach RStO 12 bewirkt.

3.8.3 Vergleichende Analyse der Beanspruchungswirkung auf die Straßenbefestigung nach RDO Asphalt 09

Zur Beurteilung der Beanspruchungswirkung von Lang-Lkw nach RDO Asphalt 09 wurde mittels rechnerischer Dimensionierung unter Anwendung des Programmsystems TISAD [TU Dresden, 2013] ein unmittelbarer Vergleich von Ermüdungsstatus nach Ablauf der Nutzungsdauer sowie prognostizierter Nutzungsdauer bei Erreichen von 100 % Ermüdungsstatus für BAB-Fernverkehr ohne Lang-Lkw und BAB-Fernverkehr mit Lang-Lkw durchgeführt. Unter Berücksichtigung des im Feldversuch festgelegten Positivnetzes für Lang-Lkw (zugelassene öffentliche Straßen) wurden den Berechnungen die Bauweisen der Belastungsklassen Bk100, Bk32 und Bk10 nach RStO 12 unterzogen. Als Beurteilungs- und Bezugsgröße zur vergleichenden Analyse der Beanspruchungswirkung von Lang-Lkw dienen die Ergebnisse für das Fahrzeugkollektiv BAB-Fernverkehr (Anteil Lang-Lkw = 0 %) gemäß Tabelle 4.

Bei Substitution eines Teils der Fahrzeuge im BAB-Fernverkehr durch Lang-Lkw ermittelt sich nach dem Ende der Nutzungsdauer (30 Jahre) des Asphalt oberbaus ein geringfügig niedrigerer Ermüdungsstatus EST_{ND30} . Dieser reduziert sich mit abnehmender Belastungsklasse und höherem Anteil Lang-Lkw bis auf 99,28 %. Die prognostizierte Nutzungsdauer ND des Asphalt oberbaus bis zum Ermüdungsstatus 100 % (entspricht der rechnerischen Grenze zum Versagen) erhöht sich marginal bei Beanspruchung durch Lang-Lkw auf bis zu 30,14 Jahre im Vergleich zur Nutzungsdauer von 30,00 Jahren bei Beanspruchung durch ausschließlich konventionelle Lkw im BAB-Fernverkehr. Dies entspricht einer Verlängerung der Nutzungsdauer um ca. 0,5 %.

Tabelle 4: Ergebnisse der Vergleichsberechnung nach den RDO Asphalt 09 für BAB-Fernverkehr ohne Lang-Lkw und BAB-Fernverkehr mit Lang-Lkw-Anteilen

Bel.-klasse	Kriterium		BAB-Fernverkehr			
			LLkw 0 %	LLkw 2 %	LLkw 5 %	LLkw 9 %
Bk100	ES _{tND30}	[%]	100,00	100,00	99,79	99,52
	ND	[Jahre]	30,00	30,00	30,04	30,09
		[%]	100,00	100,00	100,13	100,30
Bk32	ES _{tND30}	[%]	100,00	99,77	99,69	99,43
	ND	[Jahre]	30,00	30,04	30,06	30,11
		[%]	100,00	100,13	100,20	100,37
Bk10	ES _{tND30}	[%]	100,00	99,90	99,61	99,28
	ND	[Jahre]	30,00	30,02	30,08	30,14
		[%]	100,00	100,07	100,27	100,47

4 Fazit

Der Einsatz von Lang-Lkw führt unter Einhaltung der im Feldversuch definierten fahrzeugtechnischen Vorgaben (zum Beispiel Achskonfiguration) und zulässigen Grenzwerte (zum Beispiel Fahrzeuggesamtgewicht und Achslasten) nicht zur Mehrbeanspruchung des Oberbaus von Straßen. Die rechnerisch festgestellte Minderbeanspruchung des Oberbaus im Vergleich zu konventionellen Lkw hat nur marginale Bedeutung und wird sich in der Praxis kaum spürbar auf die Nutzungsdauer der Straßen auswirken. Vor diesem Hintergrund wären gegebenenfalls höhere Anteile von Lang-Lkw am Gesamtkollektiv Schwerverkehr betreffend der Straßenbelastung eher positiv zu beurteilen. Zwischen den im Feldversuch eingesetzten Lang-Lkw bestehen teilweise deutliche Unterschiede in der Beanspruchungswirkung auf den Fahrbahnoberbau. Ursache ist insbesondere die Achslast der Antriebsachse, die bei Konfiguration als Teil einer Mehrfachachse deutlich günstigere Voraussetzungen als in Ausführung als Einzelachse liefert.

Grundlage dieser Untersuchungsergebnisse ist eine im Rahmen des Feldversuchs erhobene Stichprobe zu Achslasten von Lang-Lkw, die aus handschriftlicher Dokumentation der Speditionsunternehmen zusammengestellt wurde. Um gesicherte Aussagen zum gesamten Spektrum der im Einsatz befindlichen Lang-Lkw treffen zu können, sind umfangreichere Datenerhebungen mittels einheitlicher Messsysteme und automatische Datenspeicherung oder Dokumentation durch Dritte erforderlich. Unter der Voraussetzung, dass die Datenerhebung den statistischen Kriterien einer repräsentativen Abbildung der Grundgesamtheit Lang-Lkw entspricht, werden unter anderem detaillierte, vergleichende Untersuchungen zum Einfluss der Fahrzeugkonfiguration von Lang-Lkw auf die Straßenbeanspruchung möglich. Hierin ist ein vergleichsweise großes Potenzial für Maßnahmen zur Reduzierung der Straßenbelastung zu erwarten.

5 Literatur

- [BASt 2002]: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS 2002), Bergisch Gladbach 2002
- [BASt 2012.1]: Feldversuch mit Lang-Lkw, Informationen im Internet, www.bast.de/Fachthemen/Verkehrstechnik/FeldversuchLang-Lkw, Bergisch Gladbach 2012
- [BASt 2012.2]: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS 2012), Bergisch Gladbach 2012
- [FGSV 2009]: Richtlinien zur rechnerischen Dimensionierung von Oberbauten für Verkehrsflächen mit Asphaltdecke (RDO Asphalt 09), Köln 2009
- [FGSV 2012]: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12), Köln 2012
- [TU Dresden 2013]: Test Interpretation, Structural Analysis and Design Tool for Pavements, Version V1.7, Dresden, 2013
- [WOLF 2000]: Wolf, A.: Analyse der im 1. Quartal 1998 im Rahmen des Probebetriebes von 13 Achslastwaagen auf Bundesautobahnen in Hessen erfaßten Achslasten und Einzelfahrzeugdaten im Hinblick auf straßenbautechnische Fragestellungen, AP-Projekt 98 341, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2000
- [WOLF 2010]: Wolf, A.: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 61, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2010