

Technischer Bericht Nr.: 249351403_00_00
Prüfobjekt: EcoDuo-Fahrzeugkombination
Auftraggeber: Projektteam Pilotprojekt EcoDuo



Technischer Bericht
Nr. 249351403_00_00

Ingenieurwissenschaftliche Untersuchung zum Pilotprojekt EcoDuo-Fahrzeugkombination in 2025

Bearbeitung:

TÜV Rheinland Kraftfahrt GmbH

Geschäftsfeld
Engineering & Homologation

Am Grauen Stein
51105 Köln

Technischer Bericht Nr.: 249351403_00_00
Prüfobjekt: EcoDuo-Fahrzeugkombination
Auftraggeber: Projektteam Pilotprojekt EcoDuo

Auftraggeber: Projektteam Pilotprojekt EcoDuo bestehend aus:

Verband der Automobilindustrie e.V.
Behrenstr. 35
10117 Berlin

Schmitz Cargobull AG
Bahnhofstraße 22
48612 Horstmar

Volkswagen Konzernlogistik GmbH & Co. OHG
Heßlinger Straße 12
38440 Wolfsburg

Grupo Sesé
C/ Virgen del Buen Acuerdo
5. 50014 Zaragoza España

Kombiverkehr Deutsche Gesellschaft für kombinierten
Güterverkehr mbH & Co. KG
Zum Laurenburger Hof 76
60594 Frankfurt/Main

Auftragnehmer: TÜV Rheinland Krafftahrt GmbH
Engineering & Homologation
Am Grauen Stein
51105 Köln

TÜV Auftragsnummer: 932/7400179

QS-Nummer: 249351403

Beteiligte Personen:

Bearbeitung: Jörg Kimmerle, Christian Intfeld, Christian von Stosch,
Andreas Herr

Projektverantwortlich: B. Eng. Andreas Herr

Prüfdatum: 13.11.2024 – 15.11.2024, 03.09.2025 – 04.09.2025

Bearbeitungszeitraum: 23.09.2024 – 21.11.2025

Inhaltsverzeichnis

0. Allgemeines.....	4
1. Kurzfassung – Abstract	5
2. Summary – Abstract.....	7
3. Einleitung	9
3.1. Motivation	9
3.2. Aufgabenstellung.....	9
4. Übersicht EcoDuo-Fahrzeugkombination	10
5. Untersuchungsansatz.....	10
6. Datenerhebung	11
6.1. Ermittlung der statischen Achslasten	12
6.1.1. Ergebnisse.....	13
6.2. Ermittlung der dynamischen Achslasten	14
6.2.1. Ergebnisse.....	16
6.3. Schädigungsbetrachtung	17
6.3.1. Erläuterung Rainflowzählung	18
6.3.2. Erläuterung Miner Elementar	18
6.3.3. Ergebnisse.....	19
6.4. Kraftstoffverbrauch und CO ₂ -Bilanz (Tank to Wheel)	19
6.4.1. Ergebnisse.....	20
7. Kurvenlaufeigenschaft.....	20
8. Zusammenfassung.....	22
9. Ausblick.....	24

Anhänge

Anhang 1: Technische Daten Fahrzeuge

Anhang 2: Statische Achslasten

Anhang 3: Simulation der Kurvenlaufeigenschaften

Anhang 4: Literaturverzeichnis

0. Allgemeines

Dieser Technische Bericht enthält Prüfergebnisse sowie Beurteilungen von Bauteilen, Baugruppen oder kompletten Konstruktionen. Wir weisen darauf hin, dass dieser Technische Bericht keine durch den Gesetzgeber vorgeschriebenen, amtlichen Genehmigungs- bzw. Zulassungsverfahren ersetzt. Der Bericht kann jedoch der Entscheidungsfindung im Rahmen derartiger Verfahren dienlich sein. Veröffentlichung und Weitergabe dieses Berichts an Dritte ist nur in vollständiger, ungekürzter Form zulässig. Veröffentlichung oder Verbreitung von Auszügen, Zusammenfassungen, Wertungen oder sonstige Bearbeitungen und Umgestaltungen, insbesondere zu Werbezwecken, sind nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung der TÜV Rheinland Kraftfahrt GmbH zulässig. Kopien dieses Berichts haben nur Gültigkeit, wenn sie auf der letzten Seite dieses Berichtes mit dem Firmenstempel und der Originalunterschrift des Auftraggebers versehen sind. Diese Kennzeichnung stellt die rechtsverbindliche Übereinstimmungserklärung zwischen Kopie und Original sicher. Die Übertragbarkeit und Gültigkeit des nachfolgenden Berichts ist nur für Bauteile und Konstruktionen gegeben, die den geprüften Mustern in allen Belangen entsprechen. Die den in diesem Bericht dargestellten Ergebnissen zu Grunde liegenden Berechnungen bzw. Messdaten sind beim Auftragnehmer archiviert.

1. Kurzfassung – Abstract

Im Rahmen der ingenieurwissenschaftlichen Untersuchung wurden zwei Testreihen durchgeführt, um statische und dynamische Achslasten, Schädigungsanalysen sowie den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Bilanz der EcoDuo-Fahrzeugkombination im Vergleich zu einer Referenz-Fahrzeugkombination zu analysieren. Für die Datenerhebung wurden im Rahmen der Untersuchung insgesamt 971 km auf der Strecke zwischen Lehrte und Wolfsburg zurückgelegt.

- Statische Achslasten:

Im Vergleich zur Referenz ergibt sich eine statische Gewichtersparnis von 6,52 Tonnen, da eine zusätzliche Sattelzugmaschine durch eine Dollyachse ersetzt wird.

- Dynamische Achslasten:

Die dynamische Achslastbetrachtung zeigte über alle Achsen eine Reduzierung der Spitzenwerte von bis zu 8,3 Tonnen bei der EcoDuo-Fahrzeugkombination.

- Schädigungsbetrachtung:

Die Lebensdauer von Stahlinfrastrukturkomponenten, z.B. ungeschweißte Stahlbrücken, ist bei der Nutzung des EcoDuo 2,9-mal höher als bei der Referenz.

- Kraftstoffverbrauch und CO₂-Bilanz:

Die ermittelte Kraftstoffeinsparung der EcoDuo-Fahrzeugkombination lag bei 13,1 l/100 km. Diese Einsparung führte zu einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes um 27,6 % (2,65 kg CO₂/l Diesel).

- Kurvenlaufeigenschaften

Die Fahrzeugkombination entspricht hinsichtlich der Kurvenlaufeigenschaften den Empfehlungen 8 bzw. 9 der „Empfehlungen zu §70 StVZO“ für Fahrzeugkombinationen mit einer Länge von > 27 bis 32m. Daher muss im Rahmen einer möglichen Zulassung der Fahrzeugkombination im Straßenverkehr eine separate Positivliste für nutzbare Streckenabschnitte erarbeitet werden.

Fazit:

Die Untersuchung zeigt signifikante Vorteile der EcoDuo-Fahrzeugkombination in Bezug auf Gewichtersparnis, dynamische Beanspruchung, Lebensdauer von Stahlinfrastrukturkomponenten sowie Kraftstoffverbrauch und CO₂-Bilanz im Vergleich zur Referenz-Fahrzeugkombination. Eine Lebensdauerbetrachtung des Straßenoberbaus wurde

in dieser Untersuchung nicht durchgeführt. Einflüsse auf den Straßenoberbau eines Lang-Lkws können der Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) im Rahmen des Projekts „Feldversuch mit Lang-Lkw“ in Deutschland¹ entnommen werden.

Die bei der ingenieurwissenschaftlichen Untersuchung zum Pilotprojekt EcoDuo-Fahrzeugkombination erzielten Ergebnisse sind vergleichbar mit den Erkenntnissen aus dem „Feldversuch mit Lang-Lkw“ der BASt in Deutschland¹ sowie der Studie der Universität Zaragoza „Analysis of behaviour of modular vehicles in DUOTRAILER groups during performance tests“ in Spanien“ (Madrid, 2020).²



Abbildung 1 – EcoDuo-Fahrzeugkombination im Betrieb

¹ (bast, 2016)

² (Zaragoza, 2020)

2. Summary – Abstract

As part of an engineering study, two test series were carried out to analyze the static and dynamic axle loads, damage analyses, fuel consumption, and the CO₂ balance of the EcoDuo vehicle combination compared to a reference vehicle combination. For the data collection as part of the investigation, a total of 971 km was covered on the route between Lehrte and Wolfsburg.

- - Static Axle Loads:

Compared to the reference, a weight reduction of 6.52 tons was achieved, as an additional tractor unit was replaced by a dolly axle.

- Dynamic Axle Loads:

The analysis of dynamic axle loads showed a reduction in peak values of up to 8.3 tons for the EcoDuo vehicle combination.

- Damage Analysis:

The service life of steel infrastructure components, such as non-welded steel bridges, is 2.9 times higher when using the EcoDuo compared to the reference.

- Fuel Consumption and CO₂ Balance:

The EcoDuo vehicle combination achieved a fuel saving of 13.1 l/100 km, resulting in a CO₂ reduction of 27.6% (2.65 kg CO₂/l diesel).

- Cornering Performance:

The EcoDuo vehicle combination complies with Recommendations 8 and 9 of the "Recommendations for §70 StVZO" for vehicle combinations with a length of >27 to 32 m. However, for potential approval of the vehicle combination for road traffic, a separate positive list of usable road sections must be developed.

Conclusion:

The study demonstrates significant advantages of the EcoDuo vehicle combination in terms of weight reduction, dynamic stress, service life of steel infrastructure components, fuel consumption, and CO₂ balance compared to the reference vehicle combination. A service life analysis of the road surface was not conducted. Potential impacts on the road surface of long trucks can be derived from the studies conducted by the Federal Highway Research Institute

(BASt) as part of the "Field Trial with Long Trucks" project in Germany.³

The results of the engineering study on the EcoDuo vehicle combination pilot project are comparable to the findings from the "Field Trial with Long Trucks" by BASt in Germany⁴ and the study by the University of Zaragoza ("Analysis of behaviour of modular vehicles in DUOTRAILER groups during performance tests," Madrid, 2020)⁵.



Abbildung 2 – EcoDuo vehicle combination in service

³ (bast, 2016)

⁴ (bast, 2016)

⁵ (Zaragoza, 2020)

3. Einleitung

3.1. Motivation

Im Rahmen eines regelmäßigen länderübergreifenden deutsch-spanischen Warentransports wurde die EcoDuo-Fahrzeugkombination im Rahmen eines Pilotprojekts zur gleichzeitigen Optimierung der Wirtschaftlichkeit des Warentransports und zur Verringerung der Umwelt- und Klimabelastung im „Kombinierten Verkehr Straße-Schiene“ für die Dauer von etwa einem Jahr eingesetzt und getestet.

Der Betrieb der EcoDuo-Fahrzeugkombination wurde als Pilotprojekt wissenschaftlich begleitet und abschließend bewertet („Pilotprojekt EcoDuo“). Das Pilotprojekt wurde unter der Federführung des Verbands der Automobilindustrie (VDA) umgesetzt, der die Zusammenarbeit der Partner koordinierte. Die weiteren Projektpartner sind Schmitz Cargobull AG, Volkswagen Konzernlogistik GmbH & Co. OHG, Grupo Sesé und Kombiverkehr Deutsche Gesellschaft für kombinierten Güterverkehr mbH & Co. KG. Vergleichbare Fahrzeugkombinationen sind bereits in Spanien und anderen Ländern seit längerem im Einsatz, zumeist als serienmäßige Lösung im regulären Betrieb. Zweck des Pilotprojekts ist es, eine deutliche Verbesserung der Umwelt- und Klimaverträglichkeit des Warentransports bei gleichzeitiger Verbesserung der Wirtschaftlichkeit über den gesamten Transportweg durch eine weitreichende Einbindung des Verkehrsträgers Schiene zu erreichen.

3.2. Aufgabenstellung

Im Auftrag des Projektteams Pilotprojekt EcoDuo hat die TÜV Rheinland Kraftfahrt GmbH (TRK) eine ingenieurwissenschaftliche Untersuchung des Projekts „EcoDuo“ durchgeführt. Bei dieser Untersuchung wurden der Kraftstoffverbrauch sowie CO₂ Einsparung wie auch die dynamischen Achslasten ermittelt. Diese Daten wurden jeweils im Vergleich mit einem konventionellen, identisch beladenen Fahrzeug auf gleicher Transportstrecke erfasst und abgeglichen. Darüber hinaus hat der TÜV Rheinland vorab die Fahrzeugprüfung und die Erstellung eines Gutachtens für die notwendige Ausnahmegenehmigung nach §70 StVZO durchgeführt.

4. Übersicht EcoDuo-Fahrzeugkombination

Die EcoDuo-Fahrzeugkombination wird gebildet aus einer 2-achsigen Sattelzugmaschine und zwei Sattelanhängern, welche durch einen Dolly verbunden sind. Die Fahrzeugkombination hat insgesamt 10 Achsen und eine Gesamtlänge von 31,70 m und wird mit einer zulässigen Gesamtmasse von max. 44 t im kombinierten Verkehr Straße-Schiene betrieben.

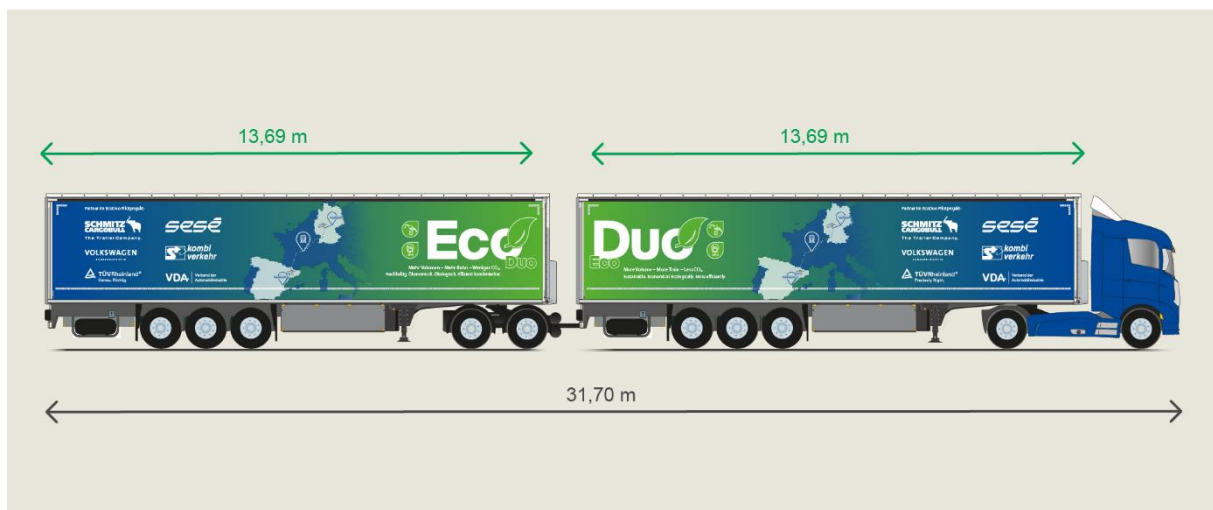


Abbildung 3 – EcoDuo-Fahrzeugkombination ⁶

Die technischen Daten der bei der Untersuchung verwendeten Fahrzeuge sind im Anhang 1 dokumentiert.

5. Untersuchungsansatz

Im Rahmen des Pilot-Projekts soll der Kraftstoffverbrauch sowie die Belastung durch die EcoDuo-Fahrzeugkombination bewertet werden. Diese Bewertung soll im Vergleich zu Standard-Sattelzügen, welche im kombinierten Verkehr eingesetzt werden, stattfinden. Um eine Bewertung durchführen zu können, wurde im Rahmen der ingenieurwissenschaftlichen Untersuchung zunächst die zu untersuchenden Beladungszustände für die EcoDuo-Fahrzeugkombination sowie die Referenz-Fahrzeugkombination, bestehend aus zwei Standard-Sattelzügen, definiert. Hierbei wurde der Ansatz verfolgt, dass zwei Standard-Sattelzüge erforderlich sind, um die Beladung (Volumen und Gewicht) einer EcoDuo-

⁶ (VDA, 2025)

Fahrzeugkombination zu transportieren. Dieser Ansatz basiert auf einem maximal zulässige Zugesamtgewicht im kombinierten Verkehr von 44 Tonnen, sowie einer gleichmäßigen Beladung auf den Sattelaufliegern.

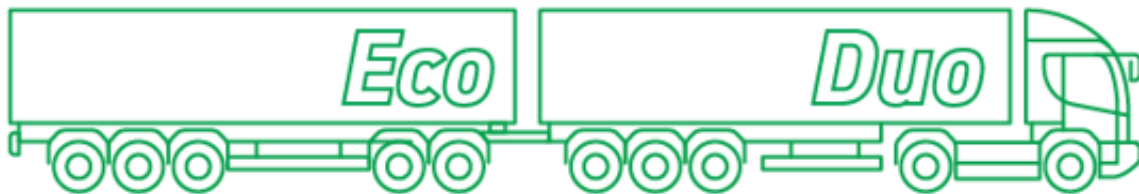


Abbildung 4 – Definition EcoDuo-Fahrzeugkombination



Abbildung 5 - Definition Referenz-Fahrzeugkombination

Auf Basis dieses Ansatzes wurde die Beladung für die Untersuchung so festgelegt, dass das maximal zulässige Gesamtgewicht von 44 Tonnen (Zielgewicht) für die EcoDuo-Fahrzeugkombination erreicht wird. Gleichzeitig wurde darauf geachtet, dass die Zuladung der einzelnen Sattelaufleger gleichmäßig verteilt ist. Daraus ergab sich eine Zuladung von jeweils 8.900 kg je Trailer.

Um die dynamischen Achslasten zu bestimmen, wurden Fahrversuche im Straßenbetrieb mit der EcoDuo-Fahrzeugkombination sowie einer Referenz-Fahrzeugkombination auf der Strecke zwischen Lehrte und Wolfsburg durchgeführt. Während dieser Fahrten wurden mithilfe von Dehnungsmessstreifen die Beanspruchungs-Zeit-Verläufe aufgezeichnet, die anschließend vergleichend ausgewertet wurden.

Zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO₂ Einsparung wurde zunächst die Bordcomputeranzeige der Sattelzugmaschine verifiziert. Im Anschluss wurde diese Anzeige für die weitere Betrachtung verwendet.

6. Datenerhebung

Im Rahmen der ingenieurwissenschaftlichen Untersuchung wurden zwei Testreihen zur

Datenerhebung durchgeführt. Dabei wurden Fahrten mit insgesamt 971km mit den definierten Fahrzeugkombinationen in definierten Beladungszuständen auf der Strecke zwischen Lehrte und Wolfsburg absolviert. Im Zuge der ingenieurwissenschaftlichen Untersuchung wurden die folgenden Betrachtungen durchgeführt:

6.1. Ermittlung der statischen Achslasten

Zur Ermittlung der tatsächlichen statischen Achslasten und zur Überprüfung der bereitgestellten Beladungszustände wurden die Fahrzeugkombinationen mithilfe von Plattenwagen verwogen. Die Messungen aller Fahrzeugkombinationen wurden an einem definierten Platz im DB-Hub in Lehrte durchgeführt. Die Verwiegung erfolgte achsweise für jede Fahrzeugkombination. Um mögliche Höhenunterschiede zwischen der Achse auf der Waage und den angrenzenden Achsen auszugleichen, wurden Auffahrmatten verwendet. Die Anordnung der Wägeeinrichtungen sowie ein beispielhaftes Ereignis einer Messung sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.



Abbildung 6 – Ermittlung der statischen Achslasten

Die für die Untersuchung benötigte Beladung wurde durch Sesé in Form von Transportbehältern zur Verfügung gestellt. Bei der Beladung wurde auf eine gleichförmige Auslastung der Sattelaufleger geachtet. Die Nachfolgenden Bilder zeigen die EcoDuo-Fahrzeugkombination an der Ladestell sowie die bei den Fahrten genutzte Beladungssituation.



Abbildung 7 – EcoDuo-Fahrzeugkombination an der Ladestelle



Abbildung 8 – Beladungssituation EcoDuo-Fahrzeugkombination

6.1.1. Ergebnisse

Die Ermittlung der statischen Achslasten zeigte mit einer Toleranz von +/- 2% eine gute gleichförmige Beladung der Sattelaufleger und der Zielwert des EcoDuo Fahrzeug-Gesamtgewichts von 44 Tonnen wurde mit einer Abweichung von -0,7% erreicht. Somit ergeben sich für die Untersuchung folgenden Fahrzeug-Gesamtgewichte:



Fahrzeugkombination	Nutzlast pro Auflieger	Fahrzeug-Gesamtgewicht
EcoDuo 	AVG 8.880 kg (+/- 2 %)	43.695 kg (0,7 % unter Zielwert)
Referenz 		24.970 kg x 2 = 49.940 kg

Tabelle 1: Übersicht Beladung Fahrzeugkombinationen

Als Ergebnis der Betrachtung der statischen Achslasten kann festgehalten werden, dass die EcoDuo- im Vergleich zur Referenz-Fahrzeugkombination eine statische Gewichtersparnis von 6,52 Tonnen aufweist. Dies ist damit zu erklären, dass in der EcoDuo-Fahrzeugkombination eine zweite Sattelzugmaschine durch eine Dollyachse ersetzt wird und somit dadurch bereits einen Gewichtsvorteil aufweist. Grafische Darstellungen zu den einzelnen statischen Achslasten je Fahrzeugkombination sind in dem Anhang 2 dokumentiert.

6.2. Ermittlung der dynamischen Achslasten

Zur Ermittlung der dynamischen Achslasten wurde die Fahrzeugkombination an allen 10 Achsen einseitig mit Dehnungsmesstreifen (DMS) in Form von Biegehalbbrücken ausgerüstet. Insgesamt wurden somit 20 DMS appliziert und mit entsprechenden Messkabeln versehen. Durch die applizierten DMS ist es möglich, die dynamischen Bauteilbeanspruchungen an der jeweiligen Achse während des normalen Betriebs auf der Straße in Form eines Beanspruchungszeitkollektivs zu ermitteln. Die dynamische Achslast setzt sich zusammen aus der statischen Achslast und der dynamischen Achslaststeigerung.

Die Applikationsorte wurden so gewählt, dass ein Rückschluss auf die Belastung der Fahrbahnoberfläche gezogen werden kann. Eine beispielhafte Applikation ist in den folgenden Abbildungen zu sehen:



Abbildung 9 – Applikation DMS

Während eines Entladevorgangs der EcoDuo-Fahrzeugkombination wurde die Empfindlichkeit der Dehnungsmessstreifen (DMS) in der Einheit N/mm^2 pro Tonne ermittelt. Diese Empfindlichkeit dient als Basis, um die über die DMS gemessenen Bauteilspannungen in die entsprechende Achslast (in Tonnen) umzurechnen.

Im Rahmen der Untersuchung der dynamischen Achslasten wurden Überfahrten über eine Normschwelle am DB Hub Lehrte durchgeführt. Ziel dieser Manöver war es, die dynamischen Effekte auf die EcoDuo-Fahrzeugkombinationen zu analysieren. Dabei geben die Messungen einen ersten Überblick über das Fahrverhalten und die Einflüsse von Fahrbahnunebenheiten auf die auftretenden Achslasten. Aus den ermittelten Spitzenwerten der dynamischen Achslasten kann ein Stoßfaktor berechnet werden, der die zusätzlichen Belastungen durch kurzfristige Stoßeinwirkungen beschreibt.



Abbildung 10 – Überfahren der Normschwelle

6.2.1. Ergebnisse

Die Auswertung der ermittelten Spitzenwerte zeigt an der Antriebsachse der Zugmaschine einen Stoßfaktor von 1,2, was bedeutet, dass die dynamische Achslast um 20 % höher ist als die statische Achslast. Die ermittelten statischen Achslasten sind im Anhang 2 dokumentiert. Dies lässt auf eine entsprechende Erhöhung der mechanischen Beanspruchung an dieser Achse schließen.

Ein Vergleich der EcoDuo-Fahrzeugkombination mit einer Referenz-Fahrzeugkombination zeigt hingegen klare Vorteile der EcoDuo-Lösung, insbesondere an den Achsen 6 und 7. Hier wurde eine dynamische Einsparung von etwa 4 Tonnen identifiziert.

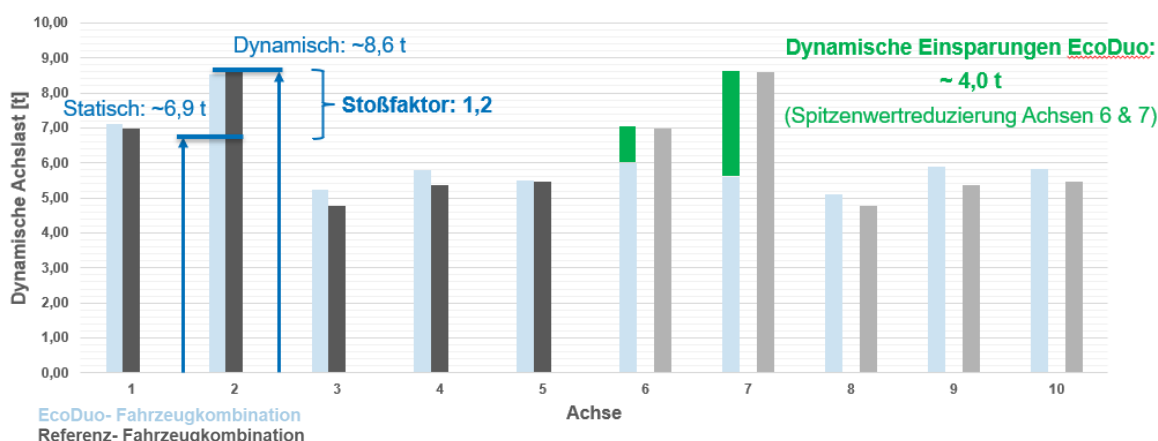


Abbildung 11 – Ergebnisse Spitzenwertbetrachtung Überfahrt Schwelle

Um die dynamischen Achslasten unter realen Betriebsbedingungen auf der Straße zu ermitteln, wurden Messfahrten mit beiden Fahrzeugkombinationen – der EcoDuo-Kombination und der Referenz-Fahrzeugkombination – auf der Strecke zwischen Lehrte und Wolfsburg durchgeführt. Dabei wurden die Spannungs-Zeit-Verläufe während der Fahrten aufgenommen und analysiert.

Im ersten Schritt wurde eine Spitzenwertbetrachtung durchgeführt, um die höchsten auftretenden Belastungen zu identifizieren. Diese Analyse liefert wichtige Erkenntnisse über die dynamischen Einflüsse und Belastungsspitzen, die im Straßenverkehr entstehen, und ermöglicht einen direkten Vergleich der Leistungs- und Belastungsunterschiede der beiden Fahrzeugkombinationen.

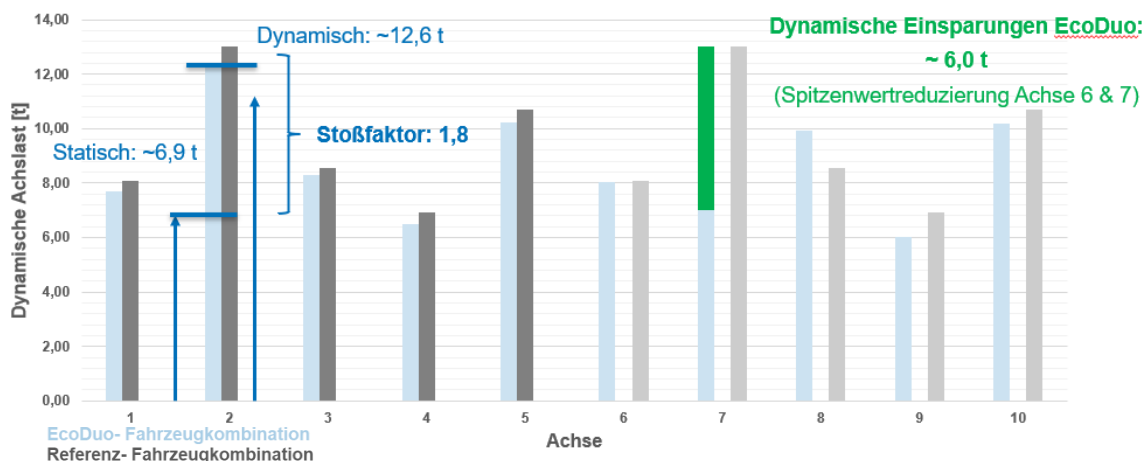


Abbildung 12 – Ergebnisse Spitzenwertbetrachtung Fahrten Lehrte – Wolfsburg

Die Messfahrten unter Realbedingungen ergaben an der Antriebsachse der Zugmaschine einen Stoßfaktor von 1,8, was auf eine 80 % höhere dynamische Achslast im Vergleich zur statischen Achslast hinweist. Diese erhöhte Belastung spiegelt die dynamischen Einflüsse wider, die während des realen Fahrbetriebs auftreten.

Auch unter Realbedingungen zeigt die EcoDuo-Fahrzeugkombination ihre Vorteile im Vergleich zur Referenz-Fahrzeugkombination auf. Durch die geringeren Achslasten an den Achsen 6 und 7 konnte eine dynamische Einsparung von etwa 6 Tonnen festgestellt werden. Über alle Achsen zeigt sich eine Spitzenwertreduzierung von insgesamt 8,3 Tonnen.

6.3. Schädigungsbetrachtung

Zusätzlich zur Spitzenwertbetrachtung wurden die dynamischen Straßenlastdaten einer weiterführenden Analyse unterzogen. Hierbei wurden die ermittelten Beanspruchungs-Zeit-Verläufe mittels einer Rainflow-Zählung klassifiziert, um ein Belastungskollektiv abzuleiten. Anschließend wurde eine Schädigungsbetrachtung durchgeführt, basierend auf der Miner-Elementar-Schadensakkumulation. Für die Lebensdauerbetrachtung wurde eine Wöhlerlinie für ungeschweißte Stahlbauteile herangezogen.

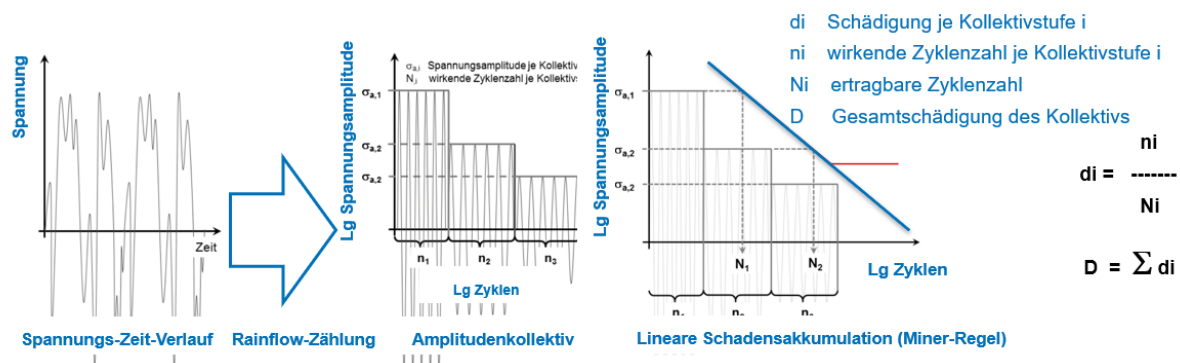


Abbildung 13 – Ablauf Schadensbetrachtung

6.3.1. Erläuterung Rainflowzählung

Die Rainflow-Zählmethode ist ein Verfahren zur Auswertung von Last-Zeit-Verläufen, das in der Ermüdungsanalyse Anwendung findet. Sie dient dazu, komplexe zyklische Lastfolgen auf einzelne Lastspielklassen (Zyklen) zu reduzieren, um so eine Lebensdauerabschätzung eines Bauteils vornehmen zu können. Dabei werden die Spannungs- oder Dehnungszeitreihen in sogenannte "Halbzyklen" zerlegt, die nach bestimmten Kriterien ("Regeln der Rainflow-Methode") zu vollständigen Lastzyklen zusammengeführt werden. Dieses Verfahren ist besonders nützlich bei variablen Amplituden und ermöglicht die Anwendung der linearen Schadensakkumulation nach Miner.⁷

6.3.2. Erläuterung Miner Elementar

Die Miner-Elementar-Methode ist eine Erweiterung der klassischen Miner-Regel, die in der Betriebsfestigkeit zur Lebensdauerabschätzung von Bauteilen unter zyklischer Belastung verwendet wird. Während die klassische Miner-Regel die Schädigung für Gruppen von Lastwechseln mit ähnlicher Amplitude zusammenfasst, betrachtet die Miner-Elementar-Methode die Schädigung auf der Ebene einzelner Belastungszyklen. Dies ermöglicht eine detailliertere Analyse, insbesondere bei komplexen Lastkollektiven.

Das Grundprinzip der Miner-Elementar-Methode basiert darauf, dass die zyklische Belastung eines Bauteils zunächst in einzelne Zyklen zerlegt wird, beispielsweise mithilfe der Rainflow-Zählmethode. Für jeden dieser Zyklen wird die Schädigung separat berechnet, basierend auf

⁷ (Matsuishi, 1968)

der Spannungsamplitude des Zyklus und der Wöhlerlinie des Materials. Die Schädigung eines einzelnen Zyklus ergibt sich aus dem Kehrwert der Anzahl der Lastwechsel, die das Bauteil bei dieser Spannungsamplitude bis zum Bruch aushalten würde. Die Gesamtschädigung wird schließlich durch die Summe der Schädigungen aller Zyklen ermittelt. Wenn die Gesamtschädigung den Wert 1 erreicht oder überschreitet, wird angenommen, dass das Bauteil versagt.⁸

6.3.3. Ergebnisse

Durch die Verwendung der gemessenen dynamischen Straßenlastdaten für jede Achse und unter Berücksichtigung der linearen Schadensakkumulation (Miner-Elementar) lässt sich die Lebensdauer von Stahlinfrastrukturkomponenten, z.B. ungeschweißte Stahlbrücken, bei Verwendung des EcoDuo im Vergleich zur Referenz als 2,9-mal höher berechnen.

6.4. Kraftstoffverbrauch und CO₂-Bilanz (Tank to Wheel)

Zur Analyse des Kraftstoffverbrauchs sowie der damit verbundenen CO₂-Einsparungen wurden während der Testfahrten die Daten der Kraftstoffverbrauchsanzeige des Bordcomputers überprüft. Der angezeigte Verbrauch wurde durch begleitete Tankvorgänge verifiziert, bei denen der tatsächlich verbrauchte Kraftstoff volumetrisch ermittelt wurde. Der gemessene Verbrauch aus den Nachtankungen betrug 258,64 Liter, während die Telemetriedaten des Bordcomputers einen Verbrauch von 260,3 Litern auswiesen. Mit einer Differenz von 1,66 Litern entspricht dies einer Abweichung von etwa 0,7 %.

Für die weitere Betrachtung des Kraftstoffverbrauchs wurden die Telemetriedaten des Fahrzeugs verwendet. Während der durchgeführten Versuchsfahrten wurden folgende durchschnittlichen Kraftstoffverbräuche für die Fahrzeugkombinationen ermittelt:

- Referenz einzeln: 23,7l/100 km
- Referenz gesamt: 47,4l/100 km
- EcoDuo: 34,3 l/100 km

⁸ (Haibach, 2006)

6.4.1. Ergebnisse

Der ermittelte Kraftstoffverbrauch liegt bei der Referenz-Fahrzeugkombination bei 47,4 l/100 km. Im Vergleich dazu senkt der Einsatz des EcoDuo-Fahrzeugs den durchschnittlichen Verbrauch auf 34,3 l/100 km, was eine Ersparnis von 13,1 l/100 km bedeutet.

Die daraus resultierende CO₂-Bilanz wurde auf Basis eines Durchschnittswerts von 2,65 kg CO₂ pro Liter Diesel (Tank-to-Wheel) berechnet. Die Kraftstoffeinsparung durch den EcoDuo führt zu einer Reduktion des CO₂-Fußabdrucks um 27,6 %.

7. Kurvenlaufeigenschaft

Bei der EcoDuo-Fahrzeugkombination handelt es sich um eine Fahrzeugkombination mit den Eigenschaften eines Sattelkraftfahrzeugs und eines LKW-Zuges, die in dieser Form in den „Empfehlungen zu §70 StVZO“ nicht erfasst ist. In Anlehnung an die Richtlinien Nr. 8 und 9 der „Empfehlungen zu §70 StVZO“ wurde zur Prüfung der Kurvenlaufeigenschaften ein Kreis mit einem Außenradius von 14,0 m benutzt und in einer ersten Messung eine Teilkreisfahrt über 120° mit tangentialer Ein- und Ausfahrt durchgeführt. In einer zweiten Messung wurde die Fahrzeugkombination vollständig in den Kreis gefahren, um die dabei benötigte Ringfläche aufzunehmen.

Die jeweils gemessenen Werte für das Ausschermaß und die überstrichenen Ringflächenbreiten können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Länge der Fahrzeugkombination [m]	Außenradius [m]	Kreisfahrt t [°]	Ringflächenbreite [m]	Ausschermaß [m]
31,7	14	120	max. 7,0	0,15
31,7	14	360	9,90	0,15

Tabelle 2 Kurvenlaufeigenschaft

Bewertung: Die in den Empfehlungen Nr. 8 und 9 der „Empfehlungen zu §70 StVZO“ für einen Außenradius von 14m und eine Teilkreisfahrt von 120° vorgegeben Werte für Fahrzeuglängen >27m bis 32 m werden von der EcoDuo-Fahrzeugkombination für die Ringflächenbreite und das Ausschermaß eingehalten.

Im Anschluss wurde zu Vergleichszwecken versucht, den regulären BO-Kraft-Kreis mit einem Außenradius von 12,50 m zu durchfahren. Es wurde im Ergebnis festgestellt, dass ein Kreis mit einem Außenradius von 12,50 vom EcoDuo in der Praxis nicht durchfahren werden kann. Der zweite Sattelanhänger rollt ab einem Kurvenwinkel von ca. 270° nicht mehr sinnvoll ab, sondern das Achsaggregat wird zunehmend quer über den Boden gezogen und überstreicht dabei im Endstadium sogar den Kurvenmittelpunkt.

Vor der Überprüfung der Kurvenlaufeigenschaft in der Praxis erfolgte seitens der Firma Schmitz Cargobull AG eine computergestützte Simulationsberechnung (Ergebnis siehe Anlage 3). Die reale Überprüfung hat eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten des Simulationsprogramms der Firma Schmitz Cargobull AG ergeben, wobei in der Praxis sogar eine etwas kleinere überstrichene Ringflächenbreite gemessen wurde als zuvor berechnet wurde. Bei der realen Überprüfung der Kurvenlaufeigenschaften wurde ein Dolly ohne einzeln lenkbare Achsen verwendet. Durch den Einsatz einzeln lenkbarer Achsen des Dollys ist theoretisch noch eine leichte Verbesserung der Kurvenlaufeigenschaft im Hinblick auf eine Verringerung der überstrichenen Ringflächenbreite zu erwarten. Da die Doppelachse des Dolly insgesamt aber lenkbar ist und der Drehpunkt der Doppelachse quasi unter dem Sattelzapfen des zweiten Sattelanhängers liegt, ist demzufolge durch einzeln lenkbare Achsen am Dolly in der Praxis keine wirklich relevante Verbesserung der Kurvenlaufeigenschaften zu erwarten. Mit Hilfe des Simulationsprogramms wurde dies als Alternative ebenfalls überprüft. Für eine praktische Überprüfung stand zum Testzeitpunkt kein gelenktes Dolly zur Verfügung. Es ist jedoch mit angemessener Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass sich die theoretischen Werte bei einer praktischen Überprüfung in gleicher Weise bestätigen werden, wie dies bei dem un gelenkten Dolly der Fall war. Diesem sehr kleinen zu erwartenden Vorteil für die Kurvenlaufeigenschaften mit einem gelenkten Dolly steht ein deutlicher Nachteil bei der Wirtschaftlichkeit aufgrund der erheblich höheren Kosten für den gelenkten Dolly gegenüber. Aus vorgenannten Gründen wird für das Pilotprojekt ausschließlich ein un gelenktes Dolly verwendet.

Die Abweichungen hinsichtlich der Kurvenlaufeigenschaften (§32d StVZO) führen dazu, dass für die EcoDuo-Fahrzeugkombination die Ermittlung der möglich nutzbaren Streckenverläufe notwendig ist. Aufgrund der besonderen Länge der Fahrzeugkombination wurde zusätzliches Augenmerk darauf gelegt, dass die Fahrzeugkombination über die technische Ausstattung

verfügt, die im Rahmen des §5 der LKWÜberStVAusnV, auch bekannt als Lang-LKW-VO, gefordert wird.

8. Zusammenfassung

Im Rahmen der ingenieurwissenschaftlichen Untersuchung wurden zwei Testreihen durchgeführt, um statische und dynamische Achslasten, Schädigungsanalysen sowie den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Bilanz der EcoDuo-Fahrzeugkombination im Vergleich zu einer Referenz-Fahrzeugkombination zu analysieren. Für die Datenerhebung wurden im Rahmen der Untersuchung insgesamt 971 km auf der Strecke zwischen Lehrte und Wolfsburg zurückgelegt.

- Statische Achslasten:

Im Vergleich zur Referenz ergibt sich eine statische Gewichtersparnis von 6,52 Tonnen, da eine zusätzliche Sattelzugmaschine durch eine Dollyachse ersetzt wird.

- Dynamische Achslasten:

Die dynamische Achslastbetrachtung zeigte über alle Achsen eine Reduzierung der Spitzenwerte von bis zu 8,3 Tonnen bei der EcoDuo-Fahrzeugkombination.

- Schädigungsbetrachtung:

Die Lebensdauer von Stahlinfrastrukturkomponenten, z.B. ungeschweißte Stahlbrücken, ist bei der Nutzung des EcoDuo 2,9-mal höher als bei der Referenz.

- Kraftstoffverbrauch und CO₂-Bilanz:

Die ermittelte Kraftstoffeinsparung der EcoDuo-Fahrzeugkombination lag bei 13,1 l/100 km. Diese Einsparung führte zu einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes um 27,6 % (2,65 kg CO₂/l Diesel).

- Kurvenlaufeigenschaften

Die Fahrzeugkombination entspricht hinsichtlich der Kurvenlaufeigenschaften den Empfehlungen 8 bzw. 9 der „Empfehlungen zu §70 StVZO“ für Fahrzeugkombinationen mit einer Länge von > 27 bis 32m. Daher muss im Rahmen einer möglichen Zulassung der Fahrzeugkombination im Straßenverkehr eine separate Positivliste für nutzbare

Streckenabschnitte erarbeitet werden.

Fazit:

Die Untersuchung zeigt signifikante Vorteile der EcoDuo-Fahrzeugkombination in Bezug auf Gewichtersparnis, dynamische Beanspruchung, Lebensdauer von Stahlinfrastrukturkomponenten sowie Kraftstoffverbrauch und CO₂-Bilanz im Vergleich zur Referenz-Fahrzeugkombination. Eine Lebensdauerbetrachtung des Straßenoberbaus wurde in dieser Untersuchung nicht durchgeführt. Einflüsse auf den Straßenoberbau eines Lang-Lkws können der Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) im Rahmen des Projekts „*Feldversuch mit Lang-Lkw*“ in Deutschland⁹ entnommen werden.

Die bei der ingenieurwissenschaftlichen Untersuchung zum Pilotprojekt EcoDuo-Fahrzeugkombination erzielten Ergebnisse sind vergleichbar mit den Erkenntnissen aus dem „*Feldversuch mit Lang-Lkw*“ der bast in Deutschland¹ sowie der Studie der Universität Zaragoza „*Analysis of behaviour of modular vehicles in DUOTRAILER groups during performance tests*“ in Spanien“ (Madrid, 2020).¹⁰

⁹ (bast, 2016)

¹⁰ (Zaragoza, 2020)

9. Ausblick

Die Ergebnisse der Untersuchung verdeutlichen das bedeutende wirtschaftliche und ökologische Potenzial der EcoDuo-Fahrzeugkombination. Dieses Konzept ermöglicht eine effizientere Ressourcennutzung und reduziert die Belastung der Infrastruktur. Durch den Wegfall einer zweiten Sattelzugmaschine entsteht ein statischer Gewichtsvorteil von 6,5 Tonnen, welcher sich positiv auf die Gesamtbelastung auswirkt. Gleichzeitig führt dieser Wegfall ebenfalls zu einer Reduzierung des CO₂ Fußabdrucks im Herstellungsprozess. Typische CO₂-Emissionen in dieser Phase liegen laut Industrieberichten und LCA-Studien (Life Cycle Assessment) zwischen: 30–60 Tonnen CO₂ pro Sattelzugmaschine. [Quelle: "Life Cycle Emissions of Commercial Vehicles: A Study of Heavy-Duty Diesel Trucks," (J. Odhams et al.)]. Nach Angaben des Herstellers SCB liegen die CO₂-Emissionen einer Dollyachse im Herstellungsprozess bei etwa 5,72 Tonnen CO₂ pro Dollyachse. Bezogen auf die Sattelzugmaschinen führt die EcoDuo-Kombination im Herstellungsprozess zu einer Reduzierung des CO₂ Fußabdrucks von 24,28 bis 54,28 Tonnen CO₂ beziehungsweise 40 bis 45 %.

Um die Vorteile des EcoDuo-Konzepts voll auszuschöpfen, wäre es sinnvoll, das zulässige Gesamtgewicht der Fahrzeugkombination zu erhöhen. Theoretisch könnte der EcoDuo, bei äquivalenter Schädigung wie herkömmliche Referenzkombinationen, um ca. 5 Tonnen mehr beladen werden. Dies führt zu einem Fahrzeuggesamtgewicht von rund 49 Tonnen. Es sei jedoch zu beachten, dass diese Berechnungen auf theoretischen Annahmen und den Messdaten dieser Untersuchung basieren. Fahrzeugkombinationen mit höheren zulässigen Gesamtgewichten müssen gesondert untersucht und betrachtet werden. Für diese Untersuchung sind unter anderem weitere Testfahrten mit höheren Nutzlasten auf Testgeländen oder auf einer für das Fahrzeuggewicht zugelassenen Strecke sowie weitere Betrachtungen hinsichtlich der Schädigung der Infrastruktur notwendig.

Hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs zeigen die theoretischen Berechnungen ebenfalls Vorteile für den EcoDuo im Vergleich zur Referenzfahrzeugkombination. Für den Fall höherer Gesamtgewichte ist der Kraftstoffverbrauch erneut zu überprüfen, da die Fahreigenschaften zu den bisherigen abweichen können.

Insgesamt zeigt der EcoDuo ein erhebliches Potenzial, den Transportsektor durch eine

bessere Ressourcenauslastung, eine Reduktion des Fahrzeugbedarfs und geringere Emissionen nachhaltiger zu gestalten. Um dieses Potenzial jedoch realisieren zu können, sind praxisnahe Tests erforderlich sowie Anpassungen der rechtlichen Vorschriften zu prüfen.

Die EcoDuo-Fahrzeugkombination könnte in Zukunft in den Regelbetrieb überführt werden, wenn diese innerhalb der LKWÜberStVAusnV als zusätzlicher potenzieller Typ 6 aufgenommen wird. Im Rahmen diese Überführung müssen die Besonderheiten der EcoDuo-Fahrzeugkombination Berücksichtigung finden. Dies ist insbesondere eine Festlegung eines Positivnetz, dass von den übrigen Fahrzeugkombinationstypen unabhängig ist. Bei der Festlegung des Streckennetzes kann dann neben infrastrukturbedingten Einschränkungen insbesondere die Abweichung bei den Kurvenlaufeigenschaften berücksichtigt werden.

Köln den 16.01.2026

Bearbeitung

Bearbeitung

B.Eng. Andreas Herr

Arbeitsgebietsleiter Labor Köln
Lokales Geschäftsfeld M.04 Deu Nord
Engineering & Type Approval

Dipl.-Ing. Christian von Stosch

Arbeitsgebietsleiter LKW, Bus & Importeure
Lokales Geschäftsfeld M.04 Deu Nord
Engineering & Type Approval

Geprüft:

**Thomas
Kampmann**

Digital signiert von: Thomas
Kampmann
Name: CN = Thomas Kampmann
email = kampmann@de.tuv.com
Datum: 2026.01.19 08:49:12 +
01'00'

Dipl.-Ing. Thomas Kampmann

Regionaler Geschäftsfeldleiter M.04 Deutschland
Engineering & Type Approval

Anhang 1: Technische Daten Fahrzeuge

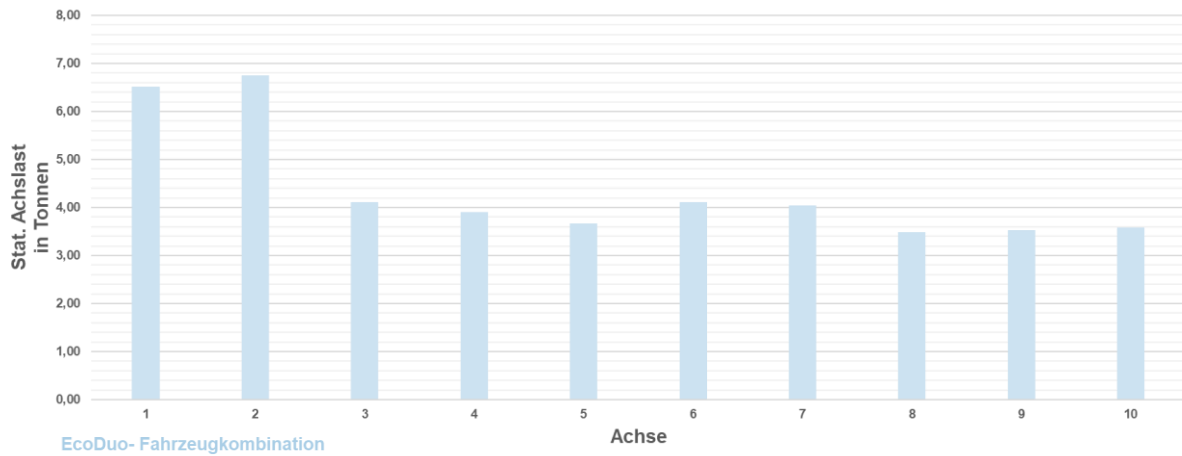
	Kraftfahrzeug	ErsterSattelanhänger	Untersetzachse (Dolly, ungelenkt)
Kennzeichen	EVE 446	E VE 2888	EVE 3888
Fahrzeug- u. Aufbauart	Sattelzugmaschine	Sattelanhänger, Plane und Spriegel	Anhänger, Untersetzachse
Fahrzeughersteller	MAN	Schmitz Cargobull AG	Schmitz Cargobull AG
Fahrzeugklasse	N3	04	04
Typ	TGX	SCB*S3	NKS*SCB*Y2
Variante	13K04ZBBAAAT5AA	06VLN	99VLN
Version	GOACF	39B4AHOB3GO	16BHOBOGO
Fahrzeug Ident.-Nr.	WMA13KZZ2RP27544	WSM00000003428747	WSM0000000342874
Höchstgeschw. (km/h)	85	100	100
Leistung (kW)	375		-
Leistungsgewicht (kW/t)	-		-
Leergewicht (kg)	8262	7660	2504
Zul. Gesamtmasse (kg)	18000	39000	16500
Technisch zulässige Masse Achse 1 (kg)	7500	9000	8250
Technisch zulässige Masse Achse 2 (kg)	11500	9000	8250
Technisch zulässige Masse Achse 3 (kg)	-	9000	-
Technisch zulässige Masse je Achsgruppe	-	27000	16500
Zul. Gesamtmasse als Sattel-Kfz im kombinierten Verkehr	44000		-
Sattellast (kg)	9738	-	-
Zul. Anhängelast (kg)	-	40000	
Länge (mm)	5995	13886	-
Breite (mm)	2550	2550	-
Höhe (mm)	3769	4000	-
Anz. d. Achsen / angetrieben	2 / 1	3 / -	-
Maß „a“/ „b“ (mm)	4500	12000	-

A.1.1 – Technische Daten der Fahrzeuge Teil 1

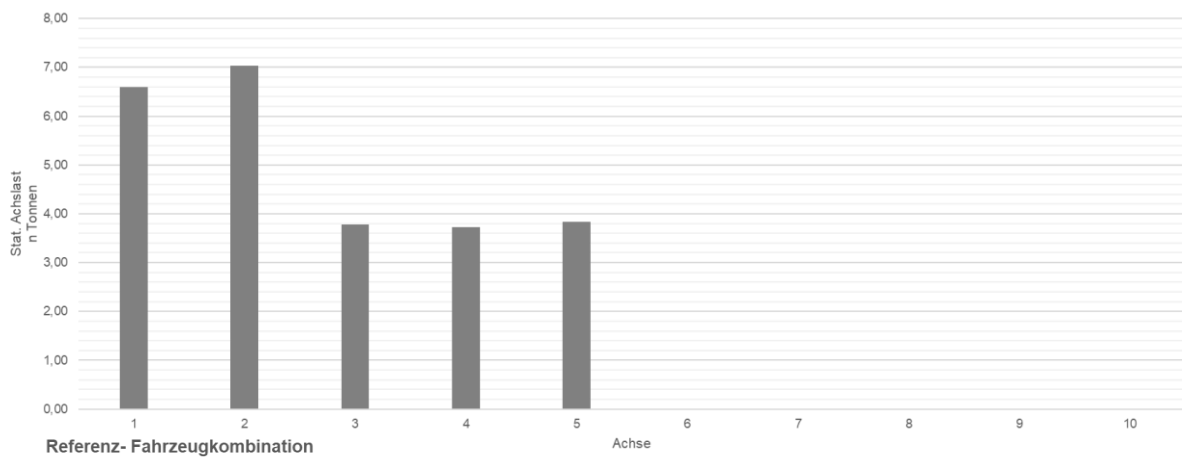
	Zweiter Sattelanhänger	EcoDuo-Fahrzeugkombination
Kennzeichen	EVE 1888	-
Fahrzeug- u. Aufbauart	Sattelanhänger, Plane und Spriegel	Sattel-Kfz („EcoDuo“)
Fahrzeughersteller	Schmitz Cargobull AG	MAN und Schmitz Cargobull AG
Fahrzeugklasse	O4	-
Typ	SCB*S3	-
Variante	06VLN	-
Version	39B400AH0B3G0	-
Fahrzeug Ident.-Nr.	WSM00000003428748	-
Höchstgeschw. (km/h)	100	85
Leistung (kW)	-	-
Leistungsgewicht (kW/t)	-	8,52 (bei 44t zGM) bis 15,83 (bei Leergew.)
Leergewicht (kg)	6942	23683
Zul. Gesamtmasse (kg)	39000	-
Technisch zulässige Masse Achse 1 (kg)	9000	-
Technisch zulässige Masse Achse 2 (kg)	9000	-
Technisch zulässige Masse Achse 3 (kg)	9000	-
Technisch zulässige Masse je Achsgruppe (kg)	27000	-
Zul. Gesamtmasse als Sattel-Kfz im kombinierten Verkehr (kg)	-	44000
Sattellast (kg)	-	9766
Zul. Anhängelast (kg)	-	-
Länge (mm)	13886	31700
Breite (mm)	2550	2550
Höhe (mm)	4000	4000
Anz. d. Achsen / angetrieben	3 / -	10/1
Maß „a“/ „b“ (mm)	12000	-

A.1.2 – Technische Daten der Fahrzeuge Teil 2

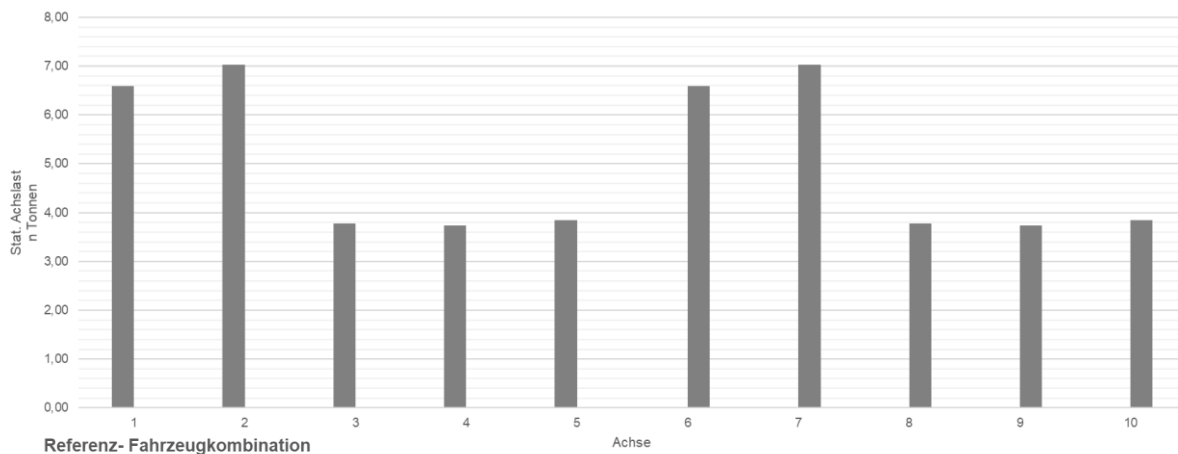
Anhang 2: Statische Achslasten



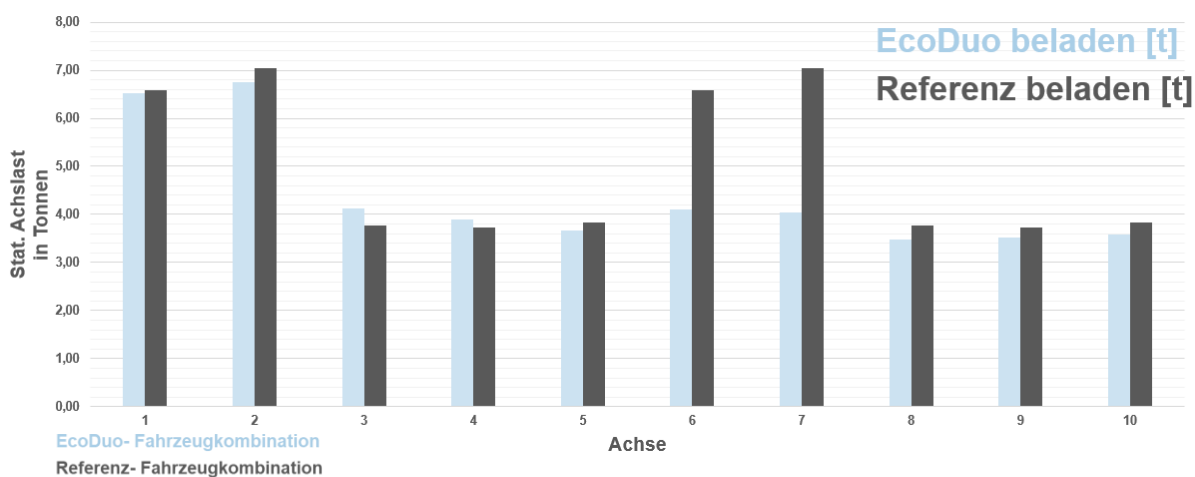
A.2.1 - Statische Achslasten EcoDuo-Fahrzeugkombination



A.2.2 - Statische Achslasten Standard Sattelzug

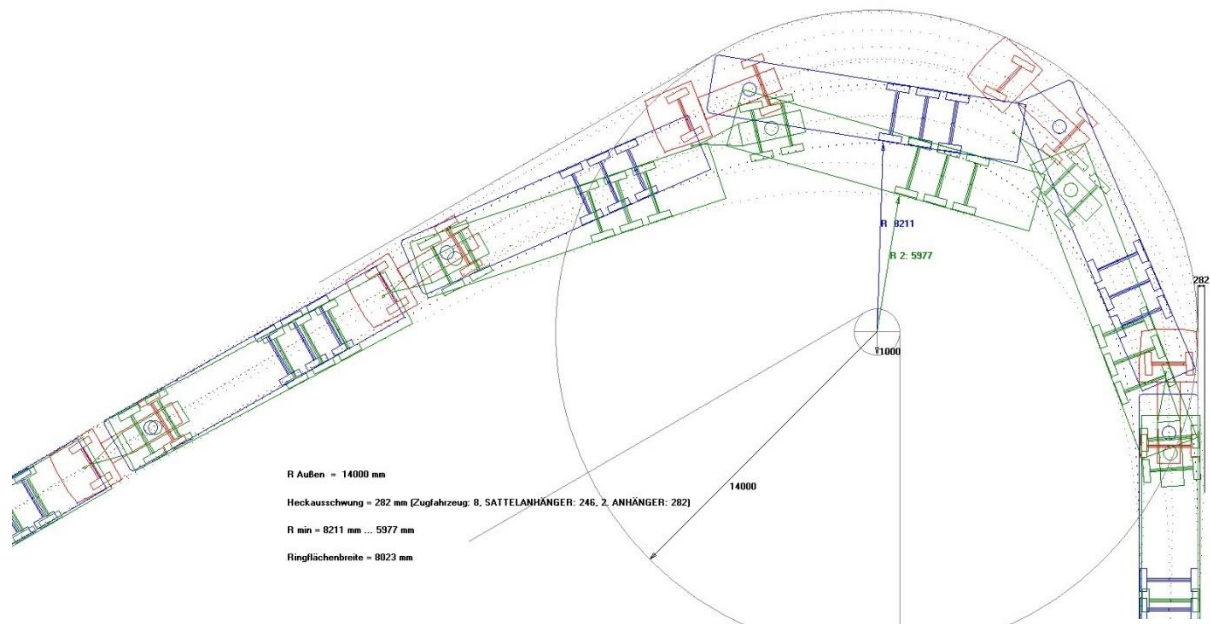


A.2.3 - Statische Achslasten Referenz-Fahrzeugkombination



A.2.4 – Vergleich Statische Achslasten EcoDuo- und Referenz-Fahrzeugkombination

Anhang 3: Simulationsergebnis der Kurvenlaufeigenschaften nach §70 StVZO
120° - 14m außen // 1m innen // 13m Spurweite



A.3.1 – Simulationsergebnis der Kurvenlaufeigenschaften

Anhang 4: Literaturverzeichnis

- bast. (2016). *Feldversuch mit Lang-Lkw*. Bergisch Gladbach.
- Haibach, E. (2006). *Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. Springer-Verlag.
- Matsuishi, M. E. (1968). *Fatigue of metals subjected to varying stress. Proceedings of the Japan Society of Mechanical Engineers*. Fukuoka, Japan.
- VDA. (2025).
<https://www.vda.de/de/themen/automobilindustrie/nutzfahrzeuge/pilotprojekt-eco-duo#Ansprechpersonen>.
- Zaragoza, U. (2020). *Analysis of behaviour of modular vehicles in DUOTRAILER groups during performance tests*. Madrid.