

Virtuelle Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhalte- systemen mit der Finite-Elemente- Simulation

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 375

bast

Virtuelle Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhalte- systemen mit der Finite-Elemente- Simulation

von

Bertold Fröhlich
Holger Schwedhelm

unter Mitwirkung von

Janine Kübler
Martina Balzer-Hebborn
Xiaochen Yu

Bundesanstalt für Straßenwesen
Bergisch Gladbach

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 375

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt F1100.6414006
Virtuelle Anprallprüfungen an
Fahrzeug-Rückhaltesystemen
mit der Finite-Elemente-Simulation

Fachbetreuung
Bertold Fröhlich

Referat
Straßenausstattung

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-772-3

Bergisch Gladbach, Dezember 2023

Kurzfassung – Abstract

Virtuelle Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen mit der Finite-Elemente-Simulation

Die Simulation von Anprallversuchen mittels der Methode der finiten Elemente (Finite-Element-Method/ -Analysis, FEM / FEA) ist eine moderne Technologie zur digitalen Abbildung eines Anprallprozesses. Sie kann für die Untersuchung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen eingesetzt werden, wodurch eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten eröffnet wird. Mit Ergebnissen aus Simulationsstudien können Forschungsprojekte, in denen mit Hilfe realer Anprallversuche wissenschaftliche Fragestellungen beantwortet werden, unterstützend erweitert und hinsichtlich ihrer Aussagekraft ergänzt werden. Es können zudem auch Randbedingungen künftiger Anprallversuche und geplante Anpassungen der Regelwerke untersucht und eventuelle Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit für vielfältige Szenarien abgeschätzt werden. Dies ermöglicht datenbasierte Entscheidungen sowohl im Rahmen der Gremienarbeit auf europäischer und nationaler Ebene als auch bei der Beratung des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV). Des Weiteren gibt die Simulation die Möglichkeit der Bearbeitung von Fragestellungen bezüglich Sicherheitsreserven von Fahrzeug-Rückhaltesystemen und deren Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit, die mit den realen Anprallversuchen allein nicht beantwortet werden können, insbesondere aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit der Simulation bei Sensitivitätsanalysen. Einzelne Parameter, wie Anprallwinkel oder Geschwindigkeit, können mit einer hohen Genauigkeit abgebildet und separat untersucht sowie die auf die Schutzeinrichtung und das Fahrzeug wirkenden Kräfte, Spannungen und Verformungen an beliebigen Stellen im Modell gemessen und dargestellt werden. Die Unsicherheiten einer Abschätzung von Einflussfaktoren kann so verkleinert, und präzise Voraussagen getroffen werden. Die dreidimensionalen Simulationsmodelle bieten Vorteile in der räumlichen und zeitlichen Auflösung. Dem Video eines realen Anprallversuchs mit vorher festgelegten Kamerapositionierungen, steht ein hochdetailliertes Modell gegenüber, das zu jedem beliebigen Zeitpunkt des Anprallverlaufs aus beliebigen Blickwinkeln betrachtet, und bis in den Millimeterbereich vergrößert werden kann. Im Falle eines bereits durchgeführten Verifizierungs- und Validierungsprozesses bieten Simulationsstudien erhebliche Kostenvorteile gegenüber den realen Anprallversuchen. Zudem sind auch Situationen denkbar, in denen ein realer Anprallversuch dermaßen aufwändig wäre, dass ohne virtuell durchgeführte Untersuchungen nur relative Abschätzungen möglich wären.

Seit 2014 wird im Referat Straßenausstattung der Bundesanstalt für Straßenwesen ein eigener Simulationsserver mit angepasster Rechenleistung für die Durchführung von Berechnungen mit der Methode der finiten Elemente betrieben, und mit dessen Hilfe die in diesem Bericht dargestellten Simulationsstudien entstanden sind. Basierend auf Daten von realen Versuchen, die über viele Jahre im Referat durchgeführt wurden, wurden Simulationsmodelle entwickelt, verifiziert und validiert. In diesem Bericht werden die in dem Rahmen des Projektes „Anwendung der Simulation“ entstandenen Ergebnisse vielfältiger Untersuchungen von Einflussfaktoren bei einem Anprall präsentiert, wie z.B. die Höhe oder Neigung sowie der Kurvenradius einer Schutzeinrichtung und unterschiedliche Beladungsschwerpunkte von Sattelzügen. Auch das Verhalten einer Schutzeinrichtung bei einem Anprall mit einem Fahrzeug einer höheren Aufhaltstufe oder bei einem Anprall von nicht in der Norm EN 1317 berücksichtigten Fahrzeugen konnte mit Hilfe von Simulationen erfolgreich untersucht werden. Darüber hinaus wird gezeigt, dass anhand von früheren Gutachten übertragene Versuchsergebnisse durch virtuelle Anprallprüfungen bestätigt werden können.

Virtual tests of a vehicle impact on a vehicle restraint system by using the finite element simulation method

Virtual tests of a vehicle impact on a vehicle restraint system by using the finite element simulation method is a modern technology for creating a digital map of an impact process. It can be used to investigate vehicle restraint systems at a wide range of applications. Research projects, including real impact tests, can be supported by simulation studies by extending the scope of real tests and adding supplementary details to the results. In addition, initial conditions of future impact tests or required adjustments of European standards can be identified. An estimate on potential effects of vehicle restraint systems on traffic safety in a wide range of situations can be given. This opens the possibility to use simulation data along with experimental facts when making decisions in national or European committees for standardization or consult with the Federal Ministry for Digital and Transport. Furthermore, the application of simulation allows to answer

questions, concerning safety reserves of vehicle restraint systems and their effect on traffic safety, that would be not possible without additional virtual testing, notably, because of the high reproducibility of a simulation run while performing sensitivity analyses. Single initial parameters (e.g. impact angle, velocity) can be investigated separately. Forces acting on the vehicle and the vehicle restraint system, stresses and deformations can be evaluated with high precision at any desired location in the model. Thus, uncertainties of estimations of contributing factors in the performance of vehicle restraint systems can be minimized and precisely predicted. Simulation models offer a three-dimensional view with high spacial and temporal resolution on the impact process. Instead of a recorded video of a real impact test with predefined camera positions, a simulation model allows the view from any direction and the investigation of details down to the millimeter range. An already verified and validated simulation model offers a considerable cost benefit to real impact tests. Moreover, in some special situations, if a real impact test can be realized only at considerable expenses, virtual testing is the only practical choice to give a good estimate.

Since 2014 at the section V4-Highway Equipment at the Federal Highway Research Institute a dedicated simulation server equipped with state-of-the-art hardware for calculations with the finite element method is operated. The simulation studies presented in this report had been calculated using that machine. Based on data from real impact tests that were performed during the past few decades by the Federal Highway Research Institute simulation models were built, verified and validated. A large variety of simulation studies investigating contributing factors in an impact on vehicle restraint systems, e.g. height, inclination and curvature are presented in this report. Also the influence on an impact under varying the center of mass of the load of a heavy goods vehicle is shown. Other examples of the broad range of applications like the performance of a vehicle restraint system under impact with a vehicle related to a higher containment level, and an impact with a vehicle not included in the European standard EN 1317 are also demonstrated. It is shown, that experimental results previously assigned to a modified vehicle restraint system by engineering judgement can be verified by virtual testing.

Inhalt

Abkürzungen	7
1 Einleitung	8
1.1 Simulation als digitale Ergänzung realer Anprallversuche	9
1.2 Verfahren zur digitalen Abbildung der Wirklichkeit und Folgerungen	9
1.3 Anprallversuche an Fahrzeug-Rückhaltesystemen	11
1.4 Weitere Nachweismöglichkeiten der Leistungsfähigkeit von FRS im Rahmen der Norm EN 1317.....	11
2 Ziele und Aufgabenstellung	11
3 Modellerstellung	13
3.1 Untersuchte Fahrzeurückhaltesysteme	13
3.1.1 ESP 4.0.....	14
3.1.2 ESP 2.0.....	15
3.1.3 EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau­länge)	16
3.1.4 Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0	17
3.1.5 Übergang ESP 2.0 - EDSP 2.0	18
3.1.6 H4b Stahlschutzeinrichtung	19
3.1.7 H4b Ortbetonschutzwand	22
3.2 Verwendete Fahrzeugmodelle	24
3.2.1 Pkw mit 900 kg.....	24
3.2.2 Pkw mit 1500 kg.....	25
3.2.3 Lieferwagen mit 2200 kg	26
3.2.4 Lkw mit 10 t.....	27
3.2.5 Sattelzug mit 38 t	28
3.3 Gesamtmodelle	29
3.3.1 Gesamtmodell A: TB 11 an ESP 4.0.....	30
3.3.2 Gesamtmodell B: TB 31 an ESP 2.0.....	30
3.3.3 Gesamtmodell C: TB 32 (1665 kg) an ESP 2.0	30
3.3.4 Gesamtmodell D: TB 42 an ESP 2.0.....	31
3.3.5 Gesamtmodell E: TB 11 an EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau­länge)	32
3.3.6 Gesamtmodell F: Lieferwagen (2200 kg) an EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau­länge)	32
3.3.7 Gesamtmodell G: TB 42 an EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau­länge)	32
3.3.8 Gesamtmodell H: TB 11 an Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0	33
3.3.9 Gesamtmodell I: TB 11 an Übergang ESP 2.0 - EDSP 2.0.....	33
3.3.10 Gesamtmodell J: TB 32 an Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0.....	33
3.3.11 Gesamtmodell K: TB 32 an Übergang ESP 2.0 - EDSP 2.0	34
3.3.12 Gesamtmodell L: 22 t Sattelzug an EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau­länge).....	34
3.3.13 Gesamtmodell M: TB 81 an H4b-Stahlschutzeinrichtung.....	34
3.3.14 Gesamtmodell N: TB 81 an H4b-Ortbetonschutzwand	35
3.4 Weitere Randbedingungen	35
4 Verifizierung und Validierung	37
4.1 Gesamtmodell A: TB11 an ESP 4.0.....	37
4.1.1 Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs	37
4.1.2 Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung	38
4.2 Gesamtmodell B: TB 31 an ESP 2.0.....	39
4.2.1 Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs	39
4.2.2 Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung	40
4.3 Gesamtmodell C: TB 32 an ESP 2.0.....	43

4.4	Gesamtmodell G: TB42 an EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau­länge).....	43
4.4.1	Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs.....	43
4.4.2	Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung.....	44
4.5	Gesamtmodell H: TB11 an Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0.....	45
4.5.1	Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs.....	45
4.5.2	Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung.....	45
4.6	Gesamtmodell J: TB 32 an Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0.....	48
4.6.1	Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs.....	48
4.6.2	Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung.....	48
4.7	Gesamtmodell M: TB81 an H4b Stahlschutzeinrichtung.....	49
4.7.1	Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs.....	50
4.7.2	Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung.....	50
4.8	Gesamtmodell N: TB81 an H4b Ortbetonschutzwand.....	51
4.8.1	Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs.....	52
4.8.2	Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung.....	52
5	Simulationsbasierte Studien.....	54
5.1	Parameterstudie: Variation Anprallpunkt an der ESP 4.0.....	55
5.2	Variation Anprallwinkel an EDSP 2.0.....	58
5.3	Variation Höhe ESP 4.0.....	61
5.4	Variation Höhe EDSP 2.0.....	64
5.5	Variation Neigung ESP 4.0.....	65
5.6	Variation Neigung EDSP 2.0.....	68
5.7	Variation Kurvenradius der ESP 2.0 in Kurven [17].....	69
5.8	Erweiterung der Aufhaltestufe für ESP 2.0.....	71
5.9	Virtueller TB 11 Anprallversuch an der verkürzt aufgebauten EDSP 2.0.....	73
5.10	Virtueller Anprall eines Lieferwagens an einer EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau­länge).....	76
5.11	Virtueller Anprall eines 22 t Sattelzugs an einer EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau­länge).....	78
5.12	Überprüfung der Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen von der Übergangskonstruktion ESP 4.0 – EDSP 2.0 auf die ESP 2.0 - EDSP 2.0.....	80
5.13	Untersuchung eines erhöhten Beladungsschwerpunktes eines Sattelzuges bei einem Anprall an eine H4b Schutzeinrichtung.....	85
6	Weiterentwicklungen und Empfehlungen.....	89
6.1	Weiterentwicklung von Simulationsmodellen von Anprallprüfungen bezüglich der numerischen Stabilität.....	89
6.2	Eignung von Simulationsmodellen für verschiedene Anwendungsbereiche.....	92
7	Zusammenfassung.....	94
8	Ausblick.....	95
Literatur	97
Tabellen	99
Bilder	101
Anhang	103

Abkürzungen

BAST: Bundesanstalt für Straßenwesen

BMVI: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Name bis 2021)

BMDV: Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Name ab 2022)

ESP: Einfache Schutzplanke

EDSP: Einfache Distanzschutzplanke

AEK: Anfangs- und Endkonstruktion

ÜK: Übergangskonstruktion

FRS: Fahrzeug-Rückhaltesystem

FEM: Methode der finiten Elemente

FEA: Finite Element Analysis

1 Einleitung

Obwohl die Straßen in Deutschland in den letzten Jahrzehnten erheblich sicherer geworden sind, so gab es 2019 laut Statistischem Bundesamt 19 980 Unfälle mit Personenschaden auf Autobahnen und 72 538 Unfälle mit Personenschaden auf Außerortsstraßen (ohne Autobahnen) [1]. Diese Zahlen zeigen, dass trotz aller Erfolge immer noch der dringende Bedarf vorhanden ist, die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Ist ein Abkommensunfall nicht mehr zu verhindern, aufgrund eines Versagens aller aktiver Rückhaltesysteme im Fahrzeug, oder ein Abkommen von der Fahrbahn aus anderem Grunde, so hat das Fahrzeug-Rückhaltesystem, als eine passiv wirkende Einrichtung an Straßen und auf Brücken, die Aufgabe, das abkommende Fahrzeug aufzuhalten. Der Schaden, der durch das unkontrollierte Abkommen von der Fahrbahn an Menschen und Material entstehen kann, soll auf ein Minimum begrenzt werden, indem ein Anprall an anderen Objekten verhindert, das Fahrzeug zurückgeleitet und gleichzeitig die Auswirkungen auf die Insassen und andere Verkehrsteilnehmer soweit wie möglich gemildert wird. Schutzeinrichtungen an Straßen tragen in Deutschland seit den 1950er Jahren erheblich zur Verbesserung der Verkehrssicherheit bei. Ihre Weiterentwicklung begann im darauffolgenden Jahrzehnt und dauert bis heute an. In den 1990er Jahren hat die Bundesanstalt für Straßenwesen zahlreiche Anprallversuche an den damals typischen Schutzeinrichtungen nach den Vornormen der DIN EN 1317 [2] durchgeführt, um einschätzen zu können, welche Leistungsfähigkeit die an den deutschen Straßen eingebauten Schutzeinrichtungen aufweisen, aber auch um Schwächen der Systeme zu erkennen und Verbesserungen vorzunehmen. Mittlerweile gibt es aufgrund der Harmonisierung von Regelwerken und des freien Warenverkehrs in Europa sehr viele verschiedene Fahrzeug-Rückhaltesysteme. Heute bedarf der Einsatz einer Schutzeinrichtung in Deutschland einer CE-Kennzeichnung nach harmonisierten europäischen Normen, welche Anprallprüfungen nach der europäischen Norm DIN EN 1317 [2] beinhaltet. Eine Anprallprüfung besteht aus dem kontrollierten Anprall eines bestimmten Fahrzeuges, mit einer bestimmten Geschwindigkeit und einem Anprallwinkel. Ziel der Anprallprüfungen ist es, die Leistungsfähigkeit einer Schutzeinrichtung bezüglich Aufhaltestufe, Wirkungsbereich und Anprallheftigkeit zu ermitteln.

Im Hinblick auf die unaufhaltsame Digitalisierung und Automatisierung auch in der Straßenverkehrstechnik besteht die berechtigte Frage, inwieweit eine Unterstützung bei der Bewertung von Straßenausstattungs-elementen durch den Einsatz modernster Simulationstechnologien umsetzbar und sinnvoll ist. Die Finite-Elemente-Simulation von zeitabhängigen, strukturmechanischen Problemen ist seit vielen Jahrzehnten ein vielseitig unterstützendes Instrument, vor allem in der Produktentwicklung und Optimierung. Dabei hat sie eine lange Entwicklung durchlebt, die Rechenkapazität hat sich erhöht, die Simulationsmodelle sind größer, und die Lösungsalgorithmen effektiver und umfangreicher geworden. Es wurde eine Genauigkeit erreicht, die mit einer brauchbaren Rechenzeit präzise und äußerst wertvolle Ergebnisse liefern kann. Sie hat zu der rasanten Entwicklung der Fahrzeugsicherheit und ihrem heutigen Stand unterstützend beigetragen. Mithilfe von numerischen Simulationsmodellen kann sowohl das Fahrzeug als auch das Fahrzeug-Rückhaltesystem abgebildet, und numerische Simulationsstudien zum Verhalten im Anprallfall durchgeführt werden.

Damit sie auch für die Untersuchung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen einsetzbar wird, und wissenschaftlich gestützte Entscheidungshilfen in Fragen der Verkehrssicherheit geben kann, müssen jedoch einige spezifische, unabdingbare Forderungen an die Modellierung und Durchführung derartiger Simulationen eingehalten und standardisiert werden. Sind diese jedoch erfüllt, stellt die Simulation ein geeignetes Instrument dar, die Forschung und Entwicklung in der Straßenausstattung hinsichtlich der Verkehrssicherheit voranzutreiben. Seit 2008 hat die BAST im Rahmen von externen Forschungsprojekten Simulationsmodelle aufgebaut, untersucht und in den Folgejahren weiterentwickelt. Es wurden verschiedene Simulationsstudien an Fahrzeug-Rückhaltesystemen durchgeführt, um Erkenntnisse über das Verhalten der in Deutschland typischen Schutzeinrichtungen unter besonderen Randbedingungen zu gewinnen. In diesem Forschungsbericht sind die entwickelten Simulationsmodelle, der Vergleich mit realen Anprallversuchen und die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen zusammengestellt.

1.1 Simulation als digitale Ergänzung realer Anprallversuche

Der Einsatz von Simulationen im Bereich der Fahrzeug-Rückhaltesysteme bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Forschung. Zu den Hauptanliegen gehört einerseits die Bearbeitung von technischen Fragestellungen der Verkehrssicherheit, um Fahrzeug-Rückhaltesysteme hinsichtlich des Einsatzes in besonderen Situationen zu bewerten. Andererseits dient die Simulation als Ergänzung bereits durchgeführter Anprallversuche, um Auswirkungen von Parametervariationen auf die Leistungsdaten zu untersuchen.

Für die Straßenbauverwaltungen bietet sich die Möglichkeit, besondere Randbedingungen beim Einsatz von Fahrzeug-Rückhaltesystemen mithilfe von Simulationen bewerten zu lassen oder auch Sonderkonstruktionen und ihr Verhalten im Anprallfall beurteilen zu können.

Mehrere extern durchgeführte Forschungsprojekte (FE 82.0356 [3], FE 03.0487 [4], FE 03.0488 [5]) untersuchten die Eignung sowie Möglichkeiten und Grenzen von Simulationen von Anprallvorgängen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen, führten Parameterstudien durch und bereiteten die Basis für eigene weitergehende Simulationsberechnungen. Hierdurch stehen zahlreiche, in diesem Bericht beschriebene Simulationsmodelle von Schutzzeineinrichtungen zur Verfügung, die aus diesen Forschungsprojekten entstanden sind, und der jeweiligen Fragestellung angepasst wurden.

Die Hersteller und Entwickler von Fahrzeug-Rückhaltesystemen nutzen Simulationsstudien zumeist für die Entwicklung und Optimierung ihrer Konstruktionen, bevor sie in Anprallversuchen nach der DIN EN 1317 [2] das Leistungsvermögen ermitteln lassen. Als Ergänzung zu den Anprallversuchen können Simulationen auch genutzt werden, um Modifikationen von geprüften Systemen z.B. im Rahmen der Zertifizierung quantitativ beurteilen zu können. Derart durchgeführte Arbeiten können mit den vorhandenen Programmen überprüft und bewertet werden.

1.2 Verfahren zur digitalen Abbildung der Wirklichkeit und Folgerungen

Numerische Verfahren kommen dann zum Zuge, wenn eine analytische Behandlung (exakte Berechnung) nicht möglich, oder aus praktischen Gründen nicht umsetzbar ist. Dabei wird ein digitales Abbild der Wirklichkeit erzeugt. Um das zu ermöglichen, bedarf es einer Diskretisierung mit der Methode der finiten Elemente (FEM). Sie ist ein numerisches Approximationsverfahren, wobei das gesamte zu untersuchende Gebiet in eine große Anzahl von Elementen sehr kleiner, aber endlicher Größe, möglichst gleichmäßig unterteilt wird (Vernetzung), um ein physikalisches Gleichungssystem an jedem so erhaltenen Punkt (Knoten) zu lösen. Ein triviales Beispiel wäre, die Tangente einer Kurve zu bestimmen, wobei eine Kurve mit endlich vielen Geraden approximiert werden kann. Auf diese Weise kann die Kurve beliebig genau beschrieben werden, so lange sie gewisse mathematische Voraussetzungen erfüllt. Eine Berechnung mittels der finiten Elemente kann dazu dienen, die Realität beliebig anzunähern, wobei aber Grenzen durch die Rechenkapazität gesetzt werden. Man hat also die Möglichkeit entweder solange zu rechnen, bis das Ergebnis der Genauigkeit entspricht, die man erwartet, oder aber man führt vereinfachende Annahmen ein, die eine Berechnung verkürzen. In der Praxis kommt nur die zweite Möglichkeit in Frage. D. h. aber auch und vor allem, man erhält immer eine Approximation mit endlicher Genauigkeit, und folglich nie die genaue Lösung ohne eine Unsicherheit zu erzeugen. Diese Unsicherheit kann unter bestimmten Randbedingungen so weit verkleinert werden, dass eine akzeptable Toleranz unterschritten wird. Jedoch sind dazu zusätzliche Methoden notwendig, die im Folgenden beschrieben werden.

Der Prozess des Abgleichs einer Simulation mit der Realität und die Bestimmung des Grades an Übereinstimmung wird Validierung genannt. Dieser Schritt ist zur Festlegung von Restunsicherheiten essentiell. Bei der Betrachtung einer Simulation einer Anprallprüfung sind zwei Arten von Prüfungen zu unterscheiden. Auf der einen Seite steht die reale Prüfung, durchgeführt auf einem dafür vorgesehenen Testgelände. Auf der digitalen Seite steht die virtuelle Prüfung, durchgeführt auf einem Hochleistungsrechner. Oft wird diese virtuelle Prüfung auch nur „Simulation“ genannt, falls die Bedeutung aus dem Kontext hervorgeht. Da diese beiden Arten von Prüfungen über die Validierung miteinander verknüpft sind, spricht man auch von einem digitalen Zwilling. Zusätzlich muss eine Simulation auch in sich konsistent sein, d. h. die mathematische Beschreibung des Modells mittels Algorithmen muss physikalisch korrekt erfolgen. Die Verifizierung und die Validierung verleihen der Simulation erst die Fähigkeit, belastbare Aus- und Vorhersagen über die Realität zu treffen.

Das Vertrauen in Simulationsergebnisse und deren Akzeptanz hängt vor allem von der Vorhersagegenauigkeit der verwendeten Simulationsmodelle und deren Detaillierungsgrad ab. Um eine ausreichende und dokumentierte Vorhersagegenauigkeit sicherzustellen, müssen alle Simulationsmodelle einen umfangreichen Verifizierungs- und Validierungsprozess durchlaufen. Die Verifizierung beinhaltet die Überprüfung der numerischen Stabilität bzw. der Robustheit des Simulationsmodells. Die Validierung stellt einen qualitativen und quantitativen Vergleich der Simulation mit einer realen Anprallprüfung dar, die im Fall von Fahrzeug-Rückhaltesystemen die Verformung der Schutzeinrichtung, das Fahrzeugverhalten und die Insassenbelastung umfasst.

Aus dem virtuellen Test abgeleitete Aussagen über das Verhalten des Fahrzeugs und des Fahrzeug-Rückhaltesystems können nur insoweit zutreffen, wie es die Genauigkeit des Modells erlaubt. Insbesondere gilt das für das Fahrzeugverhalten am Ende des Anprallvorgangs, das durch zahlreiche Kontaktbedingungen und plastische Verformungen zuvor beeinflusst wurde.

Im Folgenden werden verschiedene Akteure und Anwendungsbereiche für den Einsatz von numerischen Verfahren im Bereich von Fahrzeug-Rückhaltesystemen erläutert. Es ist sinnvoll, abhängig von Fragestellung und Anwendungsbereich unterschiedlich strenge Verifizierungs- und Validierungsanforderungen festzulegen.

Anwendung der Simulation in der Zertifizierung/ Begutachtung

Für die Bewertung von Modifikationen im Rahmen der Produktzertifizierung wurden auf europäischer Ebene in der EN 16303 [6] verbindliche Grenzwerte für die Abweichungen der virtuell ermittelten Leistungsdaten vom realen Anprallversuch sowie Mindestanforderungen an die Dokumentation festgelegt. Der Einsatz von Simulationsverfahren im Rahmen von Produktzertifizierungsverfahren setzt sehr hohe Verifizierungs- und Validierungsanforderungen sowie einen vorher definierten Dokumentationsumfang voraus.

Anwendung der Simulation in der Entwicklung von FRS

Der Anspruch an Simulationsberechnungen, die zumeist im (frühen) Entwicklungsprozess zur wirtschaftlichen Optimierung des Produkts eingesetzt werden, unterscheidet sich davon deutlich. Die Hersteller von Fahrzeug-Rückhaltesystemen setzen in jüngster Vergangenheit vermehrt virtuelle Tests ein, um kostenintensive Prüfungen an Prototypen auf ein Minimum zu reduzieren. Das Einhalten von Verifizierungs- und Validierungsanforderungen erfolgt hier ausschließlich unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten und hat ausschließlich die Vorbereitung einer erfolgreichen finalen realen Prüfung im Rahmen der Produktzertifizierung zum Ziel. Dabei müssen einzelne Leistungsmerkmale, die im Produktzertifizierungsverfahren mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllt werden, quantitativ nicht genau vorhergesagt werden und ermöglichen entsprechende Vereinfachungen in der Modellierung.

Anwendung der Simulation im Einsatz von FRS

In der Praxis werden Fahrzeug-Rückhaltesysteme in den meisten Fällen unter Bedingungen eingesetzt, die von den Voraussetzungen in den standardisierten Anprallversuchen abweichen. Simulationsberechnungen könnten zukünftig den Mehrwert bieten, den Einfluss der geänderten Randbedingungen auf die Leistungsdaten abzuschätzen und das Systemverhalten für den individuellen Einsatz vorherzusagen. Dies stellt sowohl die Modellierung als auch die projektspezifische Definition von Verifizierungs- und Validierungsanforderungen vor eine sehr große Herausforderung, gibt jedoch auch eine gewisse Flexibilität im Vergleich zu den starren Vorgaben im Produktzertifizierungsverfahren.

Anwendung der Simulation in der Forschung

Auch im Forschungsbereich werden Simulationen immer häufiger eingesetzt, um den Untersuchungsumfang kostengünstig zu erweitern oder Einflüsse einzelner Parameter überhaupt unabhängig voneinander untersuchen zu können. In diesen Fällen reicht es oft aus, individuelle Anforderungen an die Validierung zu stellen und diese in Abhängigkeit der Fragestellung festzulegen. Auch wenn z.B. nicht alle für die Produktzertifizierung festgelegten Validierungsanforderungen erfüllt werden, können mit den Simulationsergebnissen sehr anschaulich Trends und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt werden.

1.3 Anprallversuche an Fahrzeug-Rückhaltesystemen

Die Eignung des Einsatzes einer Schutzeinrichtung und ihre Leistungsfähigkeit werden in Anprallversuchen gemäß DIN EN 1317 [2] festgestellt. Das zu prüfende System wird auf einem Testgelände aufgestellt, und entsprechend der nachzuweisenden Leistungseigenschaften mit verschiedenen Fahrzeugen, mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit, unter einem bestimmten Anprallwinkel angefahren. Ziel der Anprallprüfung ist es, das Verhalten, die Beschädigung und die Verformung des Systems und des Fahrzeuges zu messen und zu dokumentieren. Unter den in Deutschland eingesetzten Schutzeinrichtungen unterscheidet man die normale Aufhaltestufe N2, die höheren H1, H2 und die Stufe H4b, mit einem sehr hohen Aufhaltevermögen. Zu der N2 Schutzeinrichtung gehört die Einfache Schutzplanke (ESP 2.0 oder 4.0), sie kann ein Fahrzeug mit 1500 kg Gesamtgewicht aufhalten. Die Schutzeinrichtungen mit dem höchsten Aufhaltevermögen H4b, so z.B. die Stahlschutzplanke Super-Rail oder die Betonschutzwand Safetybaer werden mit einem 38 t schweren Sattelzug angefahren. Darüber hinaus werden noch der so genannte Wirkungsbereich, das ist der Bereich der maximalen seitlichen Auslenkung durch Verformung der Schutzeinrichtung, und die Anprallheftigkeit, mit dem das Fahrzeug an der Schutzeinrichtung anprallt, festgestellt. Der Wirkungsbereich wird beim Anprall des schweren Fahrzeugs in der Prüfung ermittelt, die Insassenbelastung wird beim Anprall des leichten Fahrzeugs gemessen. Mit der so erhaltenen Klassifizierung ist es möglich, Schutzeinrichtungen gezielt für individuelle Einsatzbereiche mit umgebungsbedingten Eigenheiten auf Strecken oder Bauwerken zu verwenden.

1.4 Weitere Nachweismöglichkeiten der Leistungsfähigkeit von FRS im Rahmen der Norm EN 1317

Die Verwendung von virtuellen Anprallprüfungen im Rahmen des Zertifizierungsprozesses unterliegt der Norm EN1317 [2], wonach parallel reale Anprallversuche durchgeführt werden müssen. Unter anderem werden dabei Aspekte der Verkehrssicherheit und der Vergleichbarkeit von Leistungsdaten betrachtet. Bei einer Modifikation einer bereits zertifizierten Schutzeinrichtung ist eine erneute Anprallprüfung nicht immer notwendig. Nach der EN 1317- 5 [2] sind drei Kategorien vorgesehen, von denen eine, je nach dem Grad der Modifikation, zutrifft. Unterschieden wird zwischen Modifikationen, die keine mechanischen Veränderungen des Fahrzeug-Rückhaltesystems erforderlich machen, Modifikationen deren Auswirkungen auf die Leistungsmerkmale des Fahrzeug-Rückhaltesystems durch Experten-Gutachten, bzw. zusätzliche Nachweise über Simulationen erbracht werden können und Modifikationen, die zu keinem der vorgenannten Fälle zuzuordnen sind. Im letzteren Fall ist mindestens eine erneute reale Anprallprüfung obligatorisch. Es besteht auch die Möglichkeit, dass eine Modifikation im obigen Sinne nur teilweise erneute Anprallprüfungen notwendig macht, und die übrigen sich daraus ableiten lassen, oder alternative Nachweise durch numerische Simulationen oder analytische Berechnungen erbracht werden können. Für den Fall des Nachweises über eine numerische Simulation gibt die Norm EN 16303 [6] detaillierte Angaben zur notwendigen Methodik der Verifizierung und Validierung und diesbezügliche Empfehlungen.

2 Ziele und Aufgabenstellung

Die FEM Simulation kann einerseits die reale Anprallprüfung nicht vollständig ersetzen. In validierter Form, d.h. nach einem Abgleich mit einer realen Prüfung, hat sie aber andererseits mehrere Vorteile. In Kombination der realen mit der virtuellen Prüfung können neue wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Das Ziel der Untersuchungen der hier verwendeten Fahrzeug-Rückhaltesysteme und Einbausituationen besteht darin, die weitreichende Einsatzmöglichkeiten der Simulation auf diesen Bereich anzuwenden. Andererseits sind dabei auch wertvolle Erkenntnisse und neue Leistungsdaten hervorgetreten, die zugleich dokumentiert werden sollen. Der Validierungs- und Verifizierungsgrad der hier verwendeten Modelle ist hinreichend für eine im Forschungs- und Entwicklungsstadium befindliche Stellungnahme mit entsprechend großen Unsicherheiten. Sie verfolgen jedoch nicht den Anspruch der Erfüllung der in der EN 16303 [6] dargestellten strengen Vorgaben im Zuge der Zertifizierung. Sie dienen vielmehr dazu, Situationen abzuschätzen, die für Verkehrssicherheit als relevant eingestuft werden, diese qualitativ einzugrenzen und um neue Anprallprüfungen gezielt zu planen. Der Fokus dieses Berichts ist auf die Simulationsstudien gerichtet, wobei gleichzeitig auch Wert auf die Modellerstellung und die Validierung mittels realer Prüfungen gelegt

wird, die eine virtuelle Anprallprüfung und die Feststellung von Leistungsmerkmalen von Fahrzeug-Rückhaltesystemen erst ermöglichen.

Die vielfältigen Potentiale von Simulationen werden beispielhaft dargestellt. Die Aspekte der Systemoptimierung im Hinblick auf die Verkehrssicherheit, am Beispiel von der von den Sollwerten abweichenden Einbauhöhe und der Neigung der Schutzeinrichtung, oder der Aufbau einer Schutzeinrichtung in einer Kurve und dessen Einfluss auf seine Funktionalität werden diskutiert. Veränderungen an der Schutzeinrichtung, aber auch Veränderungen am Fahrzeug werden untersucht, wie z.B. der Anprall bei einem erhöhten Beladungsschwerpunkt. Ein weiteres Potential der virtuellen Prüfung besteht in der Ermittlung von Sicherheitsreserven. Es können Prognosen und Abschätzungen gegeben werden, ob eine gewisse Schutzeinrichtung mit einer bereits geprüften und festgestellten Leistungsfähigkeit in der Lage ist, auch andere Fahrzeugtypen oder schwerere Fahrzeuge aufzuhalten.

3 Modellerstellung

Für die Erstellung der numerischen Modelle wird die Software LS-DYNA® (Version R7.0) ¹ verwendet. Der vereinfachte Prozess sei hier übersichtshalber dargestellt. Detaillierte Informationen können aus dem Manual entnommen werden. Nach dem Importieren des CAD Modells in einen „preprocessor“ genannten Editor, wird das Modell in sog. Finite Elemente eingeteilt (Vernetzung), das sind Vierecke (sog. 2 dimensionale Schalen) oder Hexaeder (Volumen) mit einer Kantenlänge von wenigen Millimetern, denen eine mathematische Behandlungsweise zugeordnet werden muss. Entsprechend der geringen Größe eines Elementes, gibt es mehrere Millionen davon in einem Modell. Diesen Elementen wird ein Material mit spezifischen Parametern bez. des mechanischen Verhaltens unter Belastung zugeordnet, welche durch Versuche zur experimentellen Erfassung des Spannungszustandes unter Belastung gewonnen werden können. Bei den hier betrachteten sog. Crash-Simulationen handelt es sich um Verformungen, die besonders stark von der Dehnrates abhängen können. Daher muss auch eine Werkstoffprüfung in Betracht gezogen werden, welche diese Parameter erfasst. Ein Algorithmus, welcher vom Anwender präzisiert werden muss, dient dazu, um Kontakte zwischen den Elementen physikalisch zu beschreiben. Die letzten Schritte (s. Abschn. 3.3 Gesamtmodelle) sind die Festlegung der Fahrzeuggeschwindigkeit zu Anfang des Simulationsablaufs und der relative Winkel zwischen Fahrzeug und Schutzeinrichtung.

Während des gesamten Ablaufs einer simulierten Anprallprüfung ist es unerlässlich, dass die Teil-, bzw. Gesamtenergien in physikalisch sinnvollen Verhältnissen bleiben, um realistische Ergebnisse produzieren und fundierte Aussagen treffen zu können. Die Rechenzeit wird von der Anzahl der Elemente, den Materialeigenschaften und der mathematischen Behandlungsweise bestimmt. Der Gesamtrechenaufwand kann vor allem bei größeren Modellen schnell die Ressourcengrenzen erreichen, und wird daher auf mehrere Prozessorkerne aufgeteilt und parallel verarbeitet.

3.1 Untersuchte Fahrzeugrückhaltesysteme

Insgesamt wurden sieben Fahrzeug-Rückhaltesysteme mit unterschiedlichem Aufhaltevermögen ausgewählt und in den im Abschnitt 4 dargestellten Simulationsstudien untersucht. Es wurden vier verschiedene Schutzeinrichtungen aus Stahl, eine Ortbetonschutzwand und zwei Übergangskonstruktionen verwendet. Die untersuchten Systeme haben folgende Bezeichnungen:

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten FRS

Systembezeichnung	Abkürzung Systembezeichnung	Aufhaltestufe nach DIN EN 1317
Einfache Schutzplanke, Pfostenabstand 4 m	ESP 4.0	N2
Einfache Schutzplanke, Pfostenabstand 2 m	ESP 2.0	N2
Einfache Distanz-Schutzplanke, Pfostenabstand 2 m	EDSP 2.0	H1
Ortbetonschutzwand H4b	Safetybaer	H4b
Stahlschutzeinrichtung H4b	Super-Rail	H4b
Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0	ÜK	N2
Übergangskonstruktion ESP 2.0 - EDSP 2.0	ÜK	N2

Die Schutzeinrichtungen ESP 4.0 und ESP 2.0 weisen ein im Sinne der Norm DIN EN 1317 [2] niedriges Aufhaltevermögen für Pkw bis 1,5 t auf. Die Schutzeinrichtung EDSP 2.0 wurde für einen Anprall mit einem Lkw bis 10 t konzipiert und weist dementsprechend ein höheres Aufhaltevermögen auf. Die betrachteten H4b-Schutzeinrichtungen aus Stahl bzw. Beton sind in der Lage, bis zu 38 t schwere Lkw aufzuhalten und umzulenken und weisen damit ein sehr hohes Aufhaltevermögen auf. Untersucht wurden ebenfalls zwei Übergangskonstruktionen, die die Schutzeinrichtung EDSP 2.0 mit der Schutzeinrichtung ESP 4.0 bzw. ESP 2.0 verbinden. Bei den Schutzeinrichtungen ESP, EDSP und bei den Übergangskonstruktionen handelt es sich um sogenannte Standard-Schutzeinrichtungen, die gemäß den nationalen Richtlinien RPS 89

¹ Copyright © 1992-2013 Livermore Software Technology Corporation.

[7] und TL-SP 99 [8] in Deutschland über viele Jahre eingesetzt wurden und auch heute noch häufig an Straßen vorhanden sind. Die BASt hat im Auftrag des BMVI an diesen lizenzfreien Systemen zahlreiche reale Anprallprüfungen im Rahmen einer Versuchsreihe im Zeitraum von 1994 bis 2012 durchgeführt, die in den Berichten V106 [9], V157 [10] und V328 [11] der BASt veröffentlicht sind. Hierzu stehen auch die Prüfberichte nach DIN EN 1317 sowie die Anprallvideos unter www.bast.de zur Verfügung. Bei der untersuchten Ortbetonschutzwand und der Stahlschutzeinrichtung der Aufhaltestufe H4b handelt es sich um typischerweise in Deutschland eingesetzte Systeme von Herstellern, die ebenfalls erfolgreich nach DIN EN 1317 [2] geprüft wurden.

3.1.1 ESP 4.0

Die gerammte Stahlschutzeinrichtung ESP 4.0 besteht aus einem im B-Profil ausgeführten Holm, der jeweils mit einer M10-Schraube mit Stützbügel und Sigma-Pfosten (4 m Pfostenabstand) verbunden wird. Die Verbindung der Holme untereinander wird über sechs M16-Schrauben realisiert. In der realen Anprallprüfung wurde die ESP 4.0 über 60 m Aufbauhöhe aufgestellt und mit einer 12-m-Regelabsenkung nach TL-SP 99 [8] am Systemanfang und –ende versehen.

Das Simulationsmodell der ESP 4.0, das in einem externen Forschungsprojekt [5] von der Universität Hamburg entwickelt wurde, hat eine von der Anprallprüfung abweichende Länge von 36 m zuzüglich jeweils 0,4 m lange Holmverlängerungen, die in einem vereinfachten Ansatz die Anfangs- und Endkonstruktion abbilden sollen. Für Holm, Pfosten und Stützbügel wurden Schalenelemente mit einem elasto-plastischen Materialgesetz ohne Materialversagen und Dehnratenabhängigkeit verwendet, dessen Parameter Tabelle 2 entnommen werden können. Die implementierte Spannungs-Dehnungskurve wurde mit dem Faktor 1,2 skaliert.

Tabelle 2: Materialparameter für die ESP 4.0

Materialparameter für die ESP 4.0 (S235JR)		
Modell Typ 24: *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY		
Massendichte (RHO)	Elastizitätsmodul (E)	Poissonzahl (PR)
7,85 t/m ³	206 kN/mm ²	0,3
Fließspannung (SIGY)	Tagentenmodul (ETAN)	Versagen (FAIL)
235 N/mm ²	2 N/mm ²	-

Die Verschraubung wurde idealisiert durch eine Schweißpunktverbindung realisiert. Dabei handelt es sich um eine starre Verbindung von Knoten, die neben Zug- und Druckkräften auch Scherkräfte und Momente aufnimmt.

Die unter Berücksichtigung der Vorspannkraft berechneten Versagenskriterien unter Normal- und Scherbeanspruchung werden in Tabelle 3 aufgelistet. Diese wurden im Modell den Schweißpunktverbindungen zugewiesen.

Tabelle 3: Versagenskriterien der Schrauben [5]

	Normalkraft S_N	Scherkraft S_S
M 10	31,4 kN	36,0 kN
M 16	80,4 kN	46,4 kN

Die Anfangs- und Endkonstruktion, die einen Teil der beim Anprall in die Schutzeinrichtung eingeleiteten Längskräfte aufnimmt, wurde durch eine vereinfachte Randbedingung, die in Abschnitt 3.4 näher beschrieben wird, ersetzt. Es wird dabei davon ausgegangen, dass sich die vom Anprallpunkt weit entfernten Holme ausschließlich elastisch verformen. Daher wird für die Holmverlängerungen ein elastisches Materialgesetz mit einem in der Steifigkeit reduzierten E-Modul von 1,717 kN/mm² gewählt. So können die im realen Anprallversuch ermittelten Längsverschiebungen abgebildet werden. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht über die im Simulationsmodell der ESP 4.0 verwendeten Elemente.

Tabelle 4: Modellaufbau der ESP 4.0

Komponenten	31	Schalenelemente	188172
Knoten	194376	Schraubenverbindungen	58

Bild 1 stellt einen Ausschnitt des vernetzten Modells der ESP 4.0 dar. Die Einspannung der Pfosten wird - wie in Abschnitt 3.4 beschrieben - mit Hilfe von definierten Randbedingungen für Knoten unterhalb der Geländeoberfläche realisiert. Daher ist es nicht erforderlich, die Pfosten über die gesamte Einbindetiefe abzubilden.

Das hier beschriebene Simulationsmodell der ESP 4.0 wird in den Studien 1, 3 und 5 verwendet.

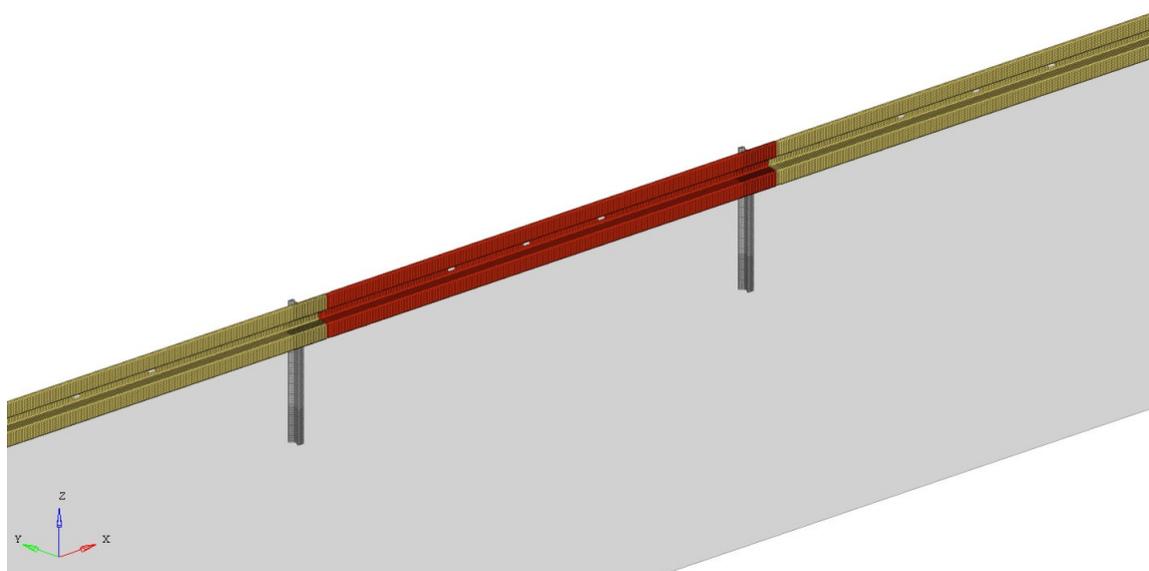


Bild 1: Finite-Elemente-Modell der ESP 4.0

3.1.2 ESP 2.0

Die ESP 2.0 besteht aus einem Holm im A- oder B-Profil, der jeweils mit einer M10-Schraube mit Stützbügel und Sigma-Pfosten (2 m Pfostenabstand) verbunden wird. Die Verbindung der Holme untereinander wird über sechs M16-Schrauben realisiert. In der realen Anprallprüfung wurde die ESP 2.0 (A-Profil) über 60 m Aufbau­länge aufgestellt und mit einer 12-m-Regelabsenkung nach TL-SP 99 [8] am Systemanfang und ende versehen.

Analog zur ESP 4.0 wurde im externen Forschungsprojekt [5] von der Universität Hamburg ebenfalls ein Simulationsmodell für die ESP 2.0 entwickelt. Der Pfostenabstand wurde von 4,0 m auf 2,0 m verkürzt, indem im Modell der ESP 4.0 zusätzliche Pfosten und Stützbügel in Feldmitte ergänzt wurden (siehe Bild 2). Die Aufbau­länge beträgt 36 m. Das Simulationsmodell wurde mit einem Holm im B-Profil erstellt.

Die Modellierung der Schrauben und der Anfangs- und Endkonstruktionen wurde für das Simulationsmodell der ESP 2.0 vom Simulationsmodell der ESP 4.0 übernommen.

In diesem Bericht werden verschiedene Ausführungen der ESP 2.0 betrachtet, die sich in der Aufbau­länge unterscheiden können. Die Unterschiede werden in den jeweiligen Abschnitten ausführlich beschrieben.

Für die Studie 8 wurde das Simulationsmodell zu Validierungszwecken in einem zweiten Schritt entsprechend der in den Anprallprüfungen aufgebauten Prüflänge von 36 m auf 60 m verlängert. Auch die idealisiert angenommenen Holmverlängerungen wurden in diesem Zuge durch vollständig modellierte 12 m-Regelabsenkungen ersetzt, wie sie auch in den Anprallprüfungen angeschlossenen waren. Auf ein dehn­ratenabhängiges Materialverhalten wurde bei diesem von der BAST weiterentwickelten Simulationsmodell hingegen verzichtet.

Einen Überblick über das in der Studie 8 eingesetzte Simulationsmodell der ESP 2.0 gibt Tabelle 5.

Tabelle 5: Modellaufbau der ESP 2.0 (inklusive 12 m-Regelabsenkungen)

Komponenten	109	Schalenelemente	483941
Knoten	500858	Schraubenverbindungen	181

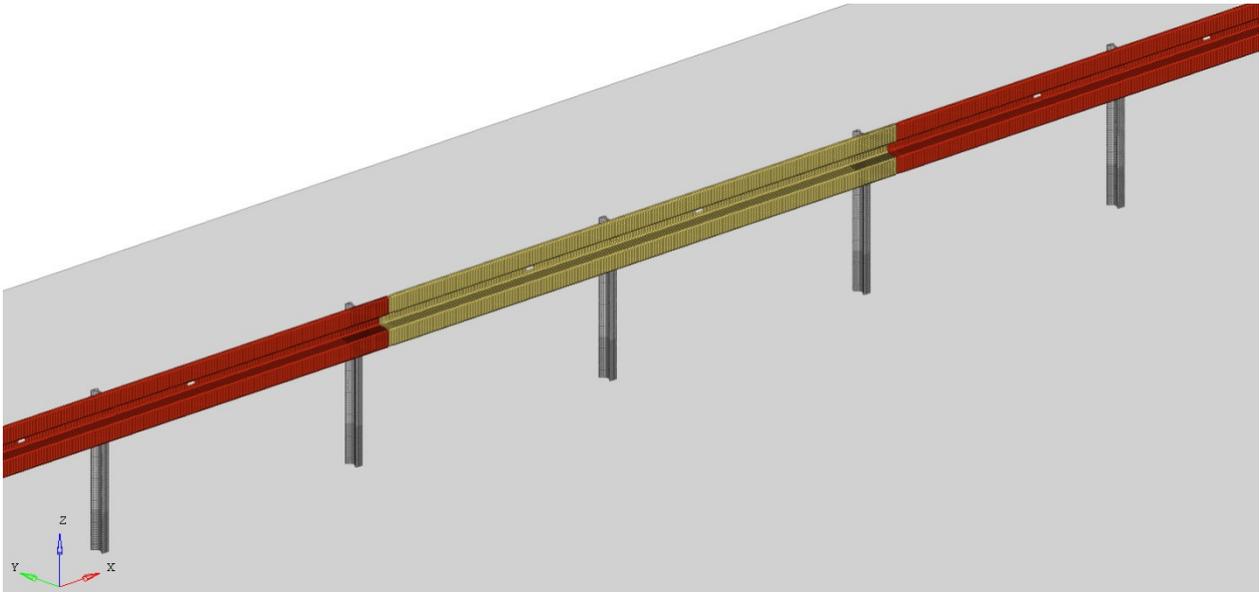


Bild 2: Finite-Elemente-Modell der ESP 2.0

3.1.3 EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau­länge)

Die EDSP 2.0 besteht aus einem Holm, der jeweils mit einer M10-Schraube mit einem Abstandhalter verbunden ist, der wiederum mit den Sigma-Pfosten (2 m Pfostenabstand) verbunden wird. Die Verbindung der Holme im B-Profil untereinander wird über sechs M16-Schrauben realisiert. Anprallprüfungen wurden sowohl an einem 60 m langen System als auch an einem verkürzten System (32 m) jeweils mit einer 12 m-Regelabsenkung durchgeführt [9].

In einem externen Forschungsprojekt [5] wurde von der Universität Hamburg ein Simulationsmodell der verkürzten EDSP 2.0 mit einer Länge von 32 m entwickelt und am Anfang und Ende des Systems 12 m Regelabsenkungen angeschlossen. Als Materialparameter wurden die gleichen Werte wie bei der ESP 4.0 gewählt (siehe Tabelle 2), die Spannungs-Dehnungs-Kurve jedoch unverändert (mit einem Skalierungsfaktor von 1) implementiert. Die Schraubenmodellierung erfolgte ebenfalls mit den unter Berücksichtigung der Vorspannkraft berechneten und in Tabelle 3 zusammengefassten Versagenskriterien für Normal- und Scherbeanspruchung. Im Laufe der in Abschnitt 4 beschriebenen Studien wurde das Modell der EDSP 2.0 von der BASt in einigen Punkten auf Basis der bisherigen Simulationsergebnisse und dem Abgleich mit den Anprallversuchen weiterentwickelt.

Bild 3 zeigt einen Ausschnitt des Finite-Elemente-Modells des Streckensystems und Tabelle 6 eine Übersicht über die im Simulationsmodell der verkürzten EDSP 2.0 (32 m Aufbau­länge) verwendeten Elemente.

Tabelle 6: Modellaufbau der EDSP 2.0 (inklusive Regelabsenkungen)

Komponenten	95	Schalenelemente	387345
Knoten	455027	Schraubenverbindungen	259

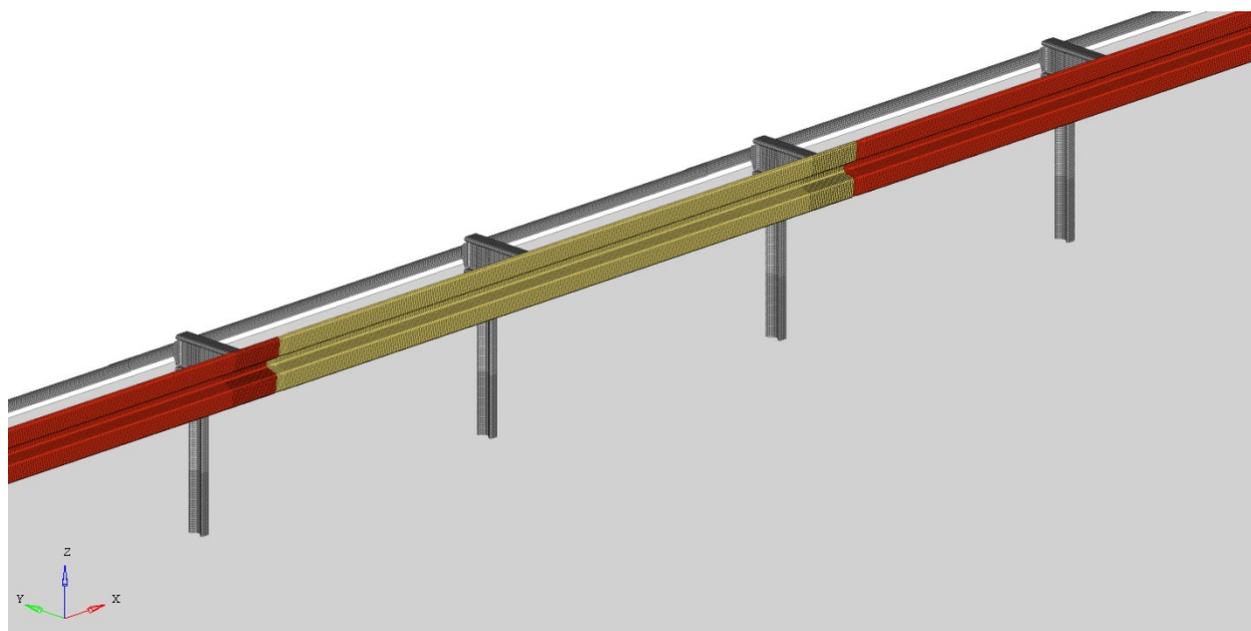


Bild 3: Finite-Elemente-Modell der EDSP 2.0

3.1.4 Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0

Die Übergangskonstruktion verbindet die beiden zuvor beschriebenen Schutzeinrichtungen ESP 4.0 und EDSP 2.0 miteinander. Der Abspanngurt der EDSP wird im Bereich des Übergangs an den Schutzplankeholm der ESP geführt und mit diesem verschraubt. Über 4 m Länge wird in der Übergangskonstruktion auch bei der ESP noch ein Pfostenabstand von 2 m beibehalten, bevor die ESP 4.0 folgt. Die Übergangskonstruktion erreichte die Leistungsdaten N2, W5, A.

Bei der Modellerstellung der Übergangskonstruktion (ÜK) ESP 4.0 - EDSP 2.0 wurden die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Modelle der ESP 4.0 und der EDSP 2.0 kombiniert. Die 8 m lange ÜK verbindet eine 24 m lange ESP 4.0 mit einer 28 m langen EDSP 2.0. Am Anfang und Ende der Schutzeinrichtungen werden 12-m-Absenkungen angeschlossen. Bild 4 skizziert das Modell der Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0.

Die Materialeigenschaften der Übergangskonstruktion orientieren sich an der ESP 4.0 und berücksichtigen somit die Dehnratenabhängigkeit. Die Modellierung der Verschraubung erfolgte durch Schweißpunkte mit Versagungskriterien wie in dem oben genannten Modell.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über den Modellaufbau der Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0.

Tabelle 7: Modellaufbau der ÜK ESP 4.0- EDSP 2.0

Komponenten	125	Schalenelemente	532922
Knoten	554549	Schraubenverbindungen	305

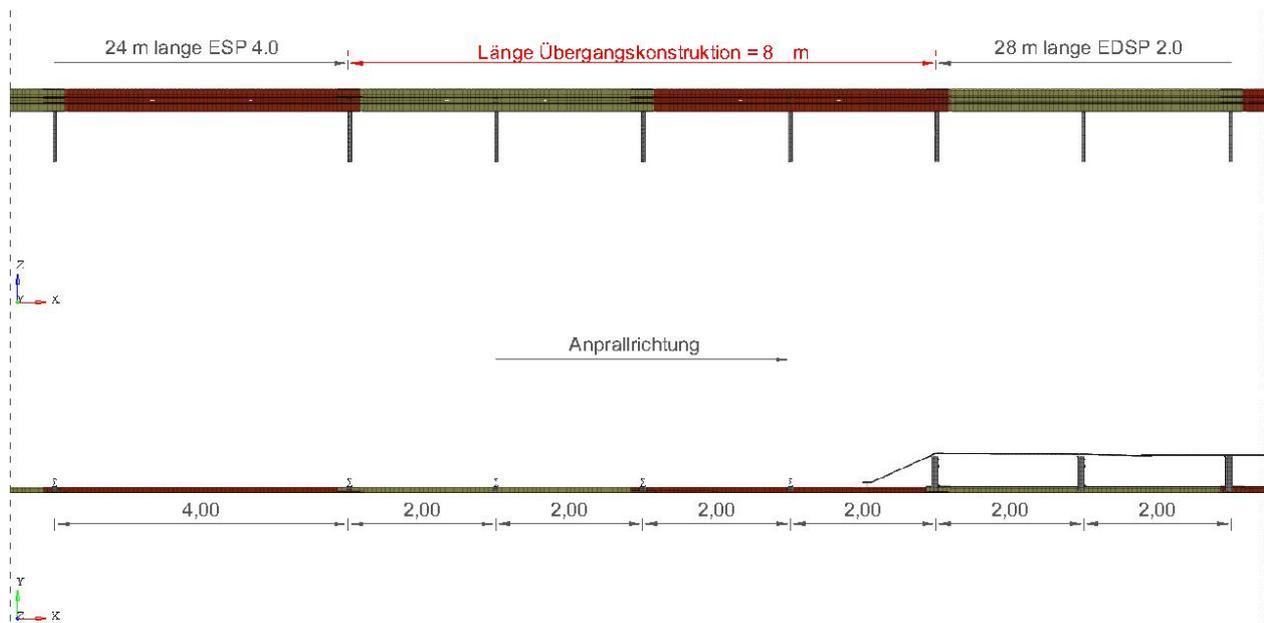


Bild 4: Finite-Elemente-Modell der Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0

3.1.5 Übergang ESP 2.0 - EDSP 2.0

Analog zum vorherigen Abschnitt wurde das Modell der Übergangskonstruktion ESP 2.0 - EDSP 2.0 durch eine Kombination der Modelle der ESP 2.0 und der EDSP 2.0 aufgebaut. Im Vergleich zur Übergangskonstruktion ESP 4.0 – EDSP 2.0 verringert sich bei der Übergangskonstruktion ESP 2.0 – EDSP 2.0 lediglich der Pfostenabstand der angeschlossenen Schutzeinrichtung ESP von 4 m auf 2 m und die Länge der Übergangskonstruktion selbst verringert sich dadurch von 8 m auf 4 m (s. Bild 5). Die Übergangskonstruktion ESP 2.0 – EDSP 2.0 selbst wurde nicht in realen Anprallversuchen geprüft.

In der folgenden Tabelle wird der Modellaufbau für die Übergangskonstruktion ESP 2.0 - EDSP 2.0 zusammengefasst.

Tabelle 8: Modellaufbau der ÜK ESP 2.0- EDSP 2.0

Komponenten	135	Schalenelemente	546497
Knoten	568949	Schraubenverbindungen	305

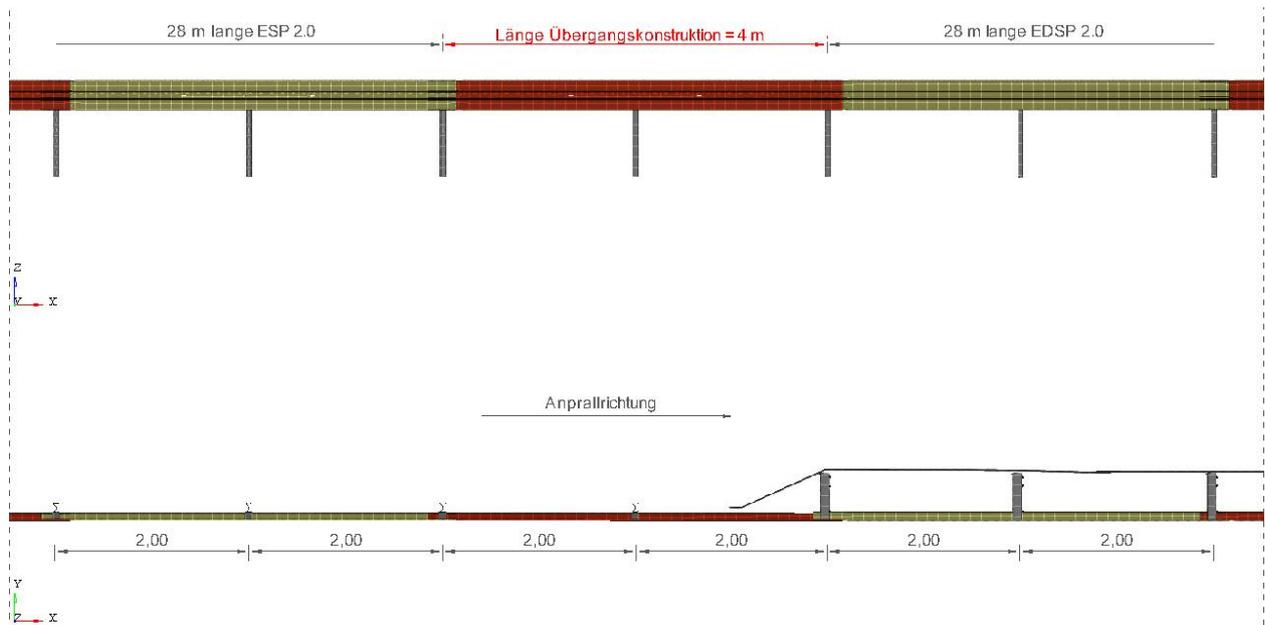


Bild 5: Finite-Elemente-Modell der Übergangskonstruktion ESP 2.0 - EDSP 2.0

3.1.6 H4b Stahlschutzeinrichtung

Es wurde ein Modell der ausgewählten Stahlschutzeinrichtung der Aufhaltestufe H4b (baugleich Super-Rail) mit einer Länge von 80 m aufgebaut. Die Stahlschutzeinrichtung Super-Rail ist gekennzeichnet durch zwei rückseitig offen gestaltete Kastenprofil-Holme mit einer Länge von 4,0 m, die mit den in den Boden gerammten Pfosten der Gesamtlänge 2,4 m in einem Abstand von 1,33 m über Laschen-Klemmverbindungen fixiert werden. Die Einbauhöhe des Systems beträgt 1,15 m. Die stumpf gestoßenen Kastenprofil-Stöße werden passförmig mit innen angeordneten Stoßverbindern fixiert. Der B-Profil-Schutzplankenholm wird über Deformationsrohre am unteren Kastenprofil befestigt. Die Holme sind überlappend angeordnet und mit Schrauben verbunden. Zwischen C-Pfosten und Kastenprofilholmen befinden sich M10 x 45 Schrauben, zur Stoßverbindung der Schutzplankenholme M16 x 27 und von Kastenprofilholmen und Stoßverbindern M16 x 30 und M14 x 30 Schrauben, sowie M14 x 30 Schrauben zum Anschluss der Deformationsrohre an den Kastenprofilholmen und M16 x 45 Schrauben zum Anschluss der Schutzplankenholme an den Deformationsrohren. Aus der Technischen Übersichtsliste für Fahrzeug-Rückhaltesysteme in Deutschland [12] kann entnommen werden, dass in der realen Prüfung die Aufhaltestufe H4b, Wirkungsbereichs-kategorie W7 und Anprallheftigkeitsstufe A erreicht wurde.

Im Simulationsmodell wurden die Anfangs- und Endkonstruktionen durch 4,5 m lange Holmverlängerungen ersetzt und alle Stahlprofile durch Schalenelemente dargestellt.

Die Verschraubung der Stahlprofile erfolgte durch die Verbindung mehrerer Knoten mit Balkenelementen. (s. Bild 6)

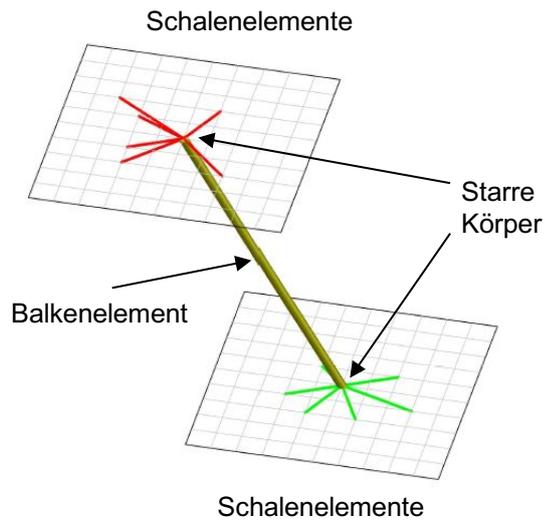


Bild 6: Schraubenmodellierung bei der H4b-Stahlschutzeinrichtung

Das Materialmodell für die Schalenelemente, bzw. für die Balkenelemente, und die gewählten Materialparameter werden in Tabelle 9 und Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 9: Materialparameter für die Schalen-Elemente der H4b Stahlschutzeinrichtung

Materialparameter für die Schalenelemente der H4b Stahlschutzeinrichtung (S235JR) Typ 24: MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY		
Massendichte (RO)	Elastizitätsmodul (E)	Poissonzahl (PR)
7,8 t/m ³	207 kN/mm ²	0,3
Fließspannung (SIGY)	Tagentenmodul (ETAN)	Versagen (FAIL)
235 N/mm ²	-	-

Tabelle 10: Materialparameter für die Balkenelemente der Schraubverbindungen

Materialparameter für die Balkenelemente der Schraubverbindungen Typ 98: MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK		
Massendichte (RO)	Elastizitätsmodul (E)	Poissonzahl (PR)
100 t/m ³ (Kompensation für kurze Balkenlänge)	207 kN/mm ²	0,28
Parameter A	Parameter B	Parameter N
600	751,7	0,3909
Parameter C	Effektive plastische Dehnung beim Versagen (PSFAIL)	
0	0,85 (Klemmverbindung Pfosten: 0)	

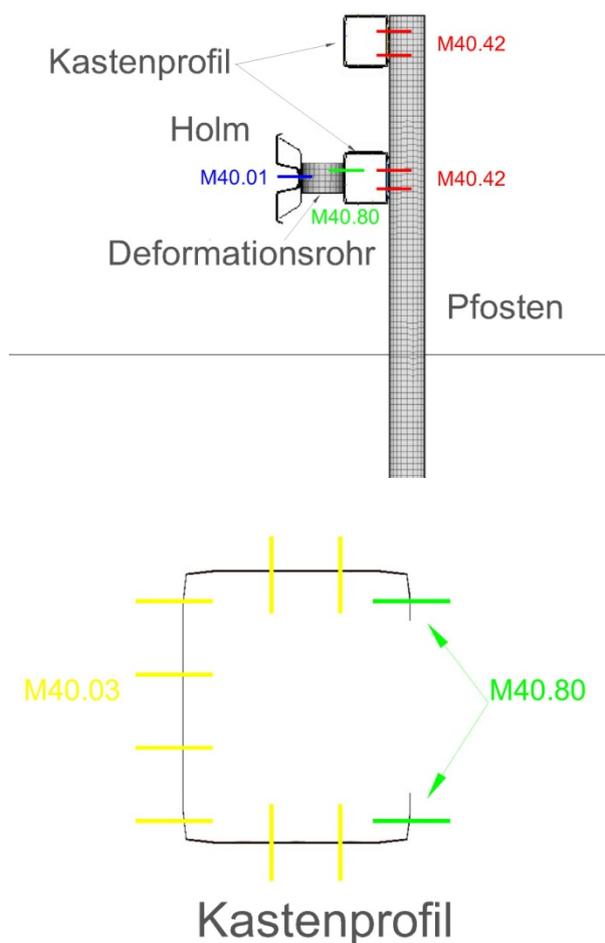


Bild 7: Skizze der Schraubenverbindung von H4b Stahlschutzeinrichtung

In Tabelle 11 werden die verschiedenen Schrauben und deren Parameter angegeben.

Tabelle 11: Schraubenverbindungen der H4b-Stahlschutzeinrichtung mit gewählten Parametern für Balkenelemente

Verbindungen		Schraube	Gewählte Parameter für Balkenelemente		
			Querschnittsfläche A mm ²	Flächenträgheitsmomente ISS, ITT mm ⁴	Torsionsträgheitsmoment J mm ⁴
Stoßverbindung der Schutzplankenholme		40.00 (M16 x 27; 4.6)	nicht als einzelne Balkenelemente modelliert, sondern Holme über die Verbindung Holm-Deformationsrohr mittels „constrained nodal rigid bodies“ fest miteinander verbunden		
Holm-Deformationsrohr		40.01 (M16 x 40; 4.6)	254,5	5153	10310
Deformationsrohr-Kastenprofil		40.80 (M14 x 30; 4.6)	176,7	2485	4970
Klemmverbindung Kastenprofil-Pfosten		40.42 (M10 x 45; 4.6)	78,5	491	982
Verbindung Kastenprofile	oben/unten/vorne	40.03 (M16 x 30; 8.8)	227	4100	8199
	hinten	40.80 (M14 x 30; 4.6)	176,7	2485	4970

Für die Anfangs- und Endkonstruktionen der H4b Stahlschutzeinrichtung wurde wieder eine Steifigkeit von $E=2070 \text{ N/mm}^2$ in den Holmverlängerungen angesetzt.

In Tabelle 12 wird der Modellaufbau angegeben.

Tabelle 12: Übersicht des Modellaufbaus der H4b Stahlschutzeinrichtung

Komponenten	1269	Schalenelemente	522703
Knoten	554491	Schraubenverbindungen	1299

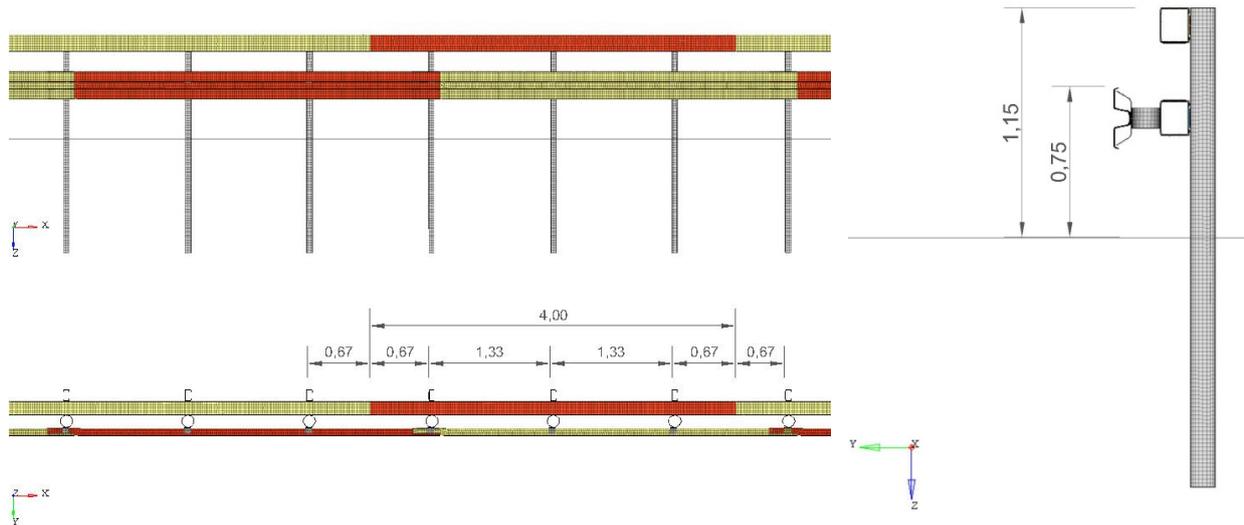


Bild 8: Ausschnitt aus dem Modell der H4b Stahlschutzeinrichtung in der An- und Draufsicht sowie im Querschnitt

3.1.7 H4b Ortbetonschutzwand

Neben der in Abschnitt 3.1.6 beschriebenen Stahlschutzeinrichtung wurde auch ein Modell einer Ortbetonschutzwand mit einer Länge von 80 m aufgebaut. Es wurde das Profil und die Bewehrung einer in Deutschland üblichen Ortbetonschutzwand gewählt (Safetybaer). Die geprüfte Variante im doppelseitigen Step Profil weist eine Höhe von 1,1 m auf. Sie ist mit 8 \varnothing 16 mm bewehrt. In der realen Anprallprüfung erreichte die Ortbetonschutzwand gemäß Technischer Übersichtliste [12] bei einer Prüflänge von 80 m folgende Werte: Aufhaltestufe H4b, Wirkungsbereichsklasse W5 und Anprallheftigkeitsstufe C.

Anders als die Stahlschutzeinrichtung, die mit Schalen modelliert wurde, besteht die Ortbetonschutzwand aus Volumenelementen. Die Bewehrung wird durch Balkenelemente abgebildet.

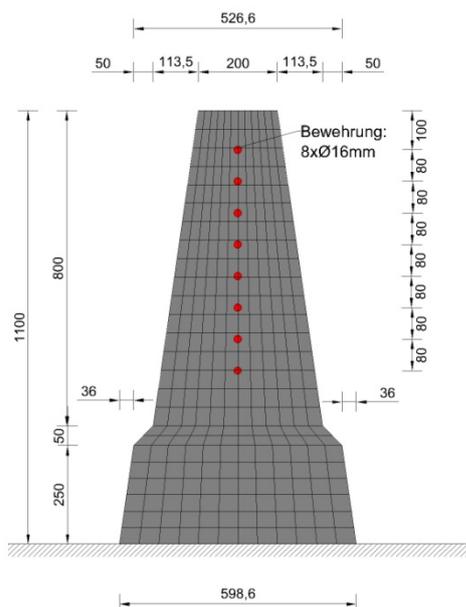


Bild 9: Modell der H4b Ortbetonschutzwand im Querschnitt

Für den Beton und die Bewehrung wurden die folgenden elasto-plastischen Materialmodelle (Typ 24) mit Versagenskriterien ausgewählt. Zudem wurde die Dehnratenabhängigkeit für den Beton berücksichtigt (siehe Tabelle 13 und Tabelle 14).

Tabelle 13: Materialparameter für den Beton

Materialparameter für Beton C30/37		
Typ 24: *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY		
Massendichte (RO)	Elastizitätsmodul (E)	Poissonzahl (PR)
2,4 t/m ³	31,9 kN/mm ²	0,2
Fließspannung (SIGY)	Tagentenmodul (ETAN)	Versagen (Fail)
38 N/mm ²	16 kN/mm ²	0,07
Dehnraten (C)	Dehnraten (P)	
260	5,0	

Tabelle 14: Materialparameter für die Bewehrung B500B

Materialparameter für Bewehrung (B500B)		
Typ 24: *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY		
Massendichte (RO)	Elastizitätsmodul (E)	Poissonzahl (PR)
7,89 t/m ³	210 kN/mm ²	0,3
Fließspannung (SIGY)	Tagentenmodul (ETAN)	Versagen (Fail)
500 N/mm ²	-	0,025

Der Verbund zwischen Beton und Bewehrung wurde durch eine Kopplung für Fluid-Struktur Modelle realisiert.

Die Anfang- und Endkonstruktionen werden durch eine zusätzliche Masse von 2,5 t abgebildet.

Tabelle 15 zeigt die numerischen Daten des Modells der H4b Ortbetonschutzeinrichtung.

Tabelle 15: Modellaufbau der H4b Ortbetonschutzeinrichtung

Komponenten	2	Schalenelemente	12800
Knoten	566746	Schraubenverbindungen	480000

3.2 Verwendete Fahrzeugmodelle

In den Simulationsstudien werden insgesamt fünf Fahrzeugmodelle verwendet.

- Pkw mit 900 kg (Geo Metro)
- Pkw mit 1500 kg (Ford Taurus)
- Lieferwagen mit 2200 kg (Ford Econoline Van)
- Lkw mit 10 t
- Sattelzug mit 38 t

Die Pkw- und Lkw-Modelle erfüllen die in Tabelle 1 der DIN EN 1317-1:2011-01 angegebenen Fahrzeuganforderungen. Der Lieferwagen mit einem Gesamtgewicht von 2,2 t fällt in eine Fahrzeugkategorie, die von der Europäischen Norm nicht abgedeckt ist.

3.2.1 Pkw mit 900 kg

Das für die Prüfung TB 11 eingesetzte 900 kg schwere Fahrzeugmodell bildet einen Kleinwagen ab, der vom Fahrzeughersteller GM als "Geo Metro" von 1988 bis 2001 produziert wurde.



Bild 10: Finite-Element-Modell des 900 kg schweren Fahrzeugs

Das Geo Metro Simulationsmodell, entwickelt von der National Crash Analysis Center der George Washington University, wurde in einem externen Forschungsprojekt der BAST von der Helmut-Schmidt-Universität der Bundeswehr Hamburg [5] weiterentwickelt (s. Bild 11). Die weiterentwickelte und numerisch stabilere Version V5 erhielt eine feinere Vernetzung, um geometrische Eigenschaften besser abbilden zu können, wie drehende Räder und Lenkfreiheitsgrade. Durch eine erhöhte Steifigkeit in Querrichtung kann die Anprallenergie, die in Anprallversuchen mit Fahrzeugrückhaltesystemen auftritt, in die Fahrzeugstruktur eingeleitet werden.

In Tabelle 16 werden die für Anprallversuche nach DIN EN 1317 im Prüfbericht zu dokumentierenden Fahrzeugeigenschaften des verwendeten Geo Metro dargestellt. Die Anforderungen an den Massenschwerpunkt werden bis auf den CGX, der geringfügig abweicht, eingehalten.

Tabelle 16: Fahrzeugeigenschaften des Pkws mit 900 kg

900 kg Pkw: Geo Metro V5	
Gesamtmasse [kg]	900
Anzahl der Achsen (S=Antriebsachse)	Pkw 1S+1
Maße [mm]	
Radspur vorne	1330
Radspur hinten	1317

Radradius	312
Radstand	2378
Lage des Massenschwerpunktes [mm]	
CGX	770
CGY	-40
CGZ	523

Tabelle 17 zeigt eine Übersicht über die im Simulationsmodell verwendeten Elemente.

Tabelle 17: Modellaufbau des Pkws mit 900 kg

Komponenten	243	Volumenelemente	1209
Schalenelemente	192593	Balkenelemente	2
Diskrete Elemente	8	Knoten	201127
Massenpunkte	137	Beschleunigungssensor	7

3.2.2 Pkw mit 1500 kg

Der Pkw mit 1500 kg (Ford Taurus) ist ein Pkw der Mittelklasse und für die Prüfungen TB 31 und TB 32 geeignet. Das Modell hat zwei Versionen. Die erste Version (Ford Taurus V3) mit 1513 kg wurde von NCAC (National Crash Analysis Center) entwickelt. Die andere Version mit 1635 kg (Ford Taurus V4) wurde in einem extern vergebenen Forschungsprojekt [5] entwickelt. Der Unterschied in der Masse wurde durch Hinzufügung von Massenpunkten modelliert. Die Fahrzeuge beider Versionen haben gleiche Fahrzeugabmessungen.



Bild 11: Finite-Element-Modell des 1500 kg schweren Fahrzeugs

In Tabelle 18 und Tabelle 19 werden beispielsweise die physikalischen Eigenschaften der ersten Version des Fahrzeugs und die numerische Zusammenfassung des Modellaufbaus dargestellt. Die Anforderungen an den Massenschwerpunkt werden bis auf den CGX, der geringfügig abweicht, eingehalten.

Tabelle 18: Physikalische Eigenschaften des Pkws mit 1500 kg

1500 kg Pkw: Ford Taurus	
Gesamtmasse [kg]	1513
Anzahl der Achsen (S=Antriebsachse)	Pkw 1S+1
Maße [mm]	
Radspur vorne	1567
Radspur hinten	1576
Radradius	330
Radstand	2757
Lage des Massenschwerpunktes [mm]	
CGX	946
CGY	-6
CGZ	553

Tabelle 19: Übersicht des Modellaufbaus des Pkws mit 1500 kg

Komponenten	791	Volumenelemente	99486
Schalenelemente	805379	Balkenelemente	4
Diskrete Elemente	12	Knoten	936258
Massenpunkte	152106	Beschleunigungssensor	5
Gesamtzahl Elemente	1056992		

3.2.3 Lieferwagen mit 2200 kg

Das Modell eines Lieferwagens (Ford Econoline Van) mit der Masse 2200 kg wurde von George Washington University National Crash Analysis Center NCAC entwickelt und ist auf der Website des NHTSA zu finden (<https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models>). Die Spezifikation des vorgenannten Lieferwagens weicht von den Anforderungen gemäß DIN EN 1317-1 ab, aber der Fahrzeugtyp des Lieferwagens ist häufig auf deutschen Straßen vertreten, so dass das Verhalten der Schutzeinrichtungen bei einem Anprall eines Lieferwagens in dieser Studie mitbetrachtet wird. Die Verifizierung und Validierung des Fahrzeugmodells erfolgte mit Hilfe eines Frontalanpralls gegen eine starre Wand.



Bild 12: Finite-Element-Modells des 2200 kg schweren Lieferwagens

In Tabelle 20 und Tabelle 21 werden jeweils die physikalischen Eigenschaften des Fahrzeugs und die Zusammenfassung des Modellaufbaus aufgeführt.

Tabelle 20: Physikalische Eigenschaften des Lieferwagens mit 2200 kg

2200 kg Lieferwagen: Ford Econoline Van	
Gesamtmasse [kg]	2202
Fahrzeugart (S=Antriebsachse)	Lieferwagen 1S+1
Maße [mm]	
Radspur vorne	1779
Radspur hinten	1685
Radradius	385
Radstand	3523
Lage des Massenschwerpunktes [mm]	
CGX	1605
CGY	1605
CGZ	735

Tabelle 21: Übersicht des Modellaufbaus des Lieferwagens mit 2200 kg

Komponenten	400	Volumenelemente	15952
Schalenelemente	278523	Balkenelemente	2

Diskrete Elemente	6	Knoten	295443
Massenpunkte	86	Beschleunigungssensor	12
Gesamtzahl Elemente	294581		

3.2.4 Lkw mit 10 t

Das Modell des 10 t-Lkw wurde von Politecnico di Milano (POMI) entwickelt und orientiert sich an der Norm DIN EN 1317-2 für die Prüfungen TB 41 und TB 42. Das Originalmodell wurde durch Hinzufügen einer Seitenwand der Ladefläche von der Norwegian Public Roads administration (NPRA) weiterentwickelt. In den nachfolgenden Untersuchungen wurde der 10 t-Lkw mit der Seitenwand eingesetzt und für die weitere Nutzung das Originalmodell modifiziert. Zuerst wurde der vordere Stoßfänger nach unten verlängert. Und dann wurde das Trittbloch des Anprallbereiches zur Verbesserung der numerischen Stabilität feiner vernetzt [4]. Die Anforderungen an den Massenschwerpunkt werden eingehalten.

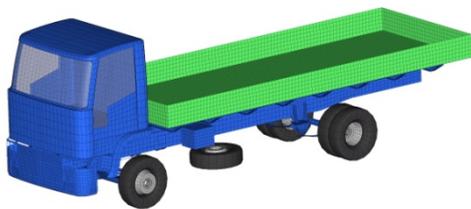


Bild 13: Finite-Element-Modell des 10t schweren Fahrzeugs

In Tabelle 22 und Tabelle 23 werden jeweils die physikalischen Eigenschaften des Fahrzeugs und die Zusammenfassung des Modellaufbaus aufgeführt.

Tabelle 22: Physikalische Eigenschaften des Lkws mit 10 t

10 t Lkw	
Gesamtmasse [kg]	10174
Fahrzeugart (S=Antriebsachse)	Lkw ohne Anhänger 1S+1
Maße [mm]	
Radspur vorne	1980
Radspur hinten	1769
Radradius	450
Radstand	4455
Lage des Massenschwerpunktes [mm]	
CGX	2677
CGY	-2
CGZ (Ballast)	1500

Tabelle 23: Übersicht des Modellaufbaus des Lkw mit 10 t

Komponenten	159	Volumenelemente	1088
Schalenelemente	27574	Balkenelemente	60
Diskrete Elemente	32	Knoten	30192
Massenpunkte	59	Gesamtzahl Elemente	28813

3.2.5 Sattelzug mit 38 t

Das schwerste Prüffahrzeug in der Norm DIN EN 1317 mit einem Gesamtgewicht von 38 t wird in der TB81-Prüfung eingesetzt und stellt eine Sattelzugmaschine mit Sattelaufleger dar. Der in den Berechnungen verwendete Sattelzug basiert auf einem frei verfügbaren Simulationsmodell ohne Versagensmechanismus für den Königszapfen, das von der Politecnico di Milano im Rahmen eines EU-Projektes entwickelt wurde. In einem von der BAST beauftragten externen Forschungsprojekt [4] wurde die Seitenwandhöhe des Auflegers von 790 mm auf 395 mm reduziert, um die auffallend weiche Konstruktion des Auflegers zu versteifen und die numerische Stabilität zu erhöhen. Für die Darstellung der unterschiedlichen Verteilung der Massenschwerpunkte der Beladung wurde im Forschungsprojekt "TRANSFORMERS" [13] das Simulationsmodell dahingehend weiterentwickelt, dass die Beladungssituation mit Quadern visualisiert werden kann (siehe Bild 14).

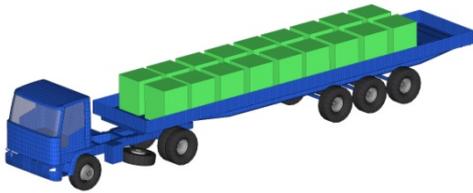


Bild 14: Finite-Modell-Element des 38t schweren Sattelzuges

In Tabelle 24 sind die Eigenschaften dieses modifizierten Sattelzuges zusammengefasst. Tabelle 25 gibt einen Überblick über den Modellaufbau. Die Anforderungen an den Massenschwerpunkt werden eingehalten.

Tabelle 24: Eigenschaften des Sattelzuges mit 38 t

38 t Lkw	
Gesamtmasse [kg]	38000
Gesamtlänge [m]	16,1
Fahrzeugart (S=Antriebsachse)	Sattelzug 1S+4
Maße [mm]	
Radspur vorne	2040
Radspur hinten	2067
Radradius	534
Radstand	12224
Lage des Massenschwerpunktes [mm]	
CGX	6814
CGY	-0,6
CGZ (Ballast)	1800

Tabelle 25: Übersicht des Modellaufbaus des Sattelzuges mit 38 t

Komponenten	240	Volumenelemente	2508
Schalenelemente	46831	Balkenelemente	110
Diskrete Elemente	69	Knoten	53338
Massenpunkte	219	Gesamtzahl Elemente	49737

Darüber hinaus wurde auf dieser Basis für die im Abschnitt 5.11 und 5.13 durchgeführten Simulationsstudien eine im Gesamtgewicht auf 22 t reduzierte Variante des Sattelzuges erzeugt, bei der der Beladungsschwerpunkt schrittweise von 1,8 m auf 2,4 m erhöht und visualisiert werden konnte.

3.3 Gesamtmodelle

Bei der Modellerstellung zur Simulation einer Anprallprüfung gemäß EN 1317 [2] wird jeweils ein im Abschnitt 3.1 beschriebenes FE-Modell eines Fahrzeugrückhaltesystems mit einem FE-Modell eines Fahrzeugs aus Abschnitt 3.2 zu einem Gesamtmodell kombiniert. Dabei sind zwei wesentliche Schritte zu nennen. Im ersten Schritt erfolgt die Initialisierung durch das Festlegen der Anfangsbedingungen (z.B. Anprallpunkt, Anprallwinkel, Anprallgeschwindigkeit des Fahrzeugs), wobei der Anprallpunkt und der Anprallwinkel durch Translation und Rotation der Teilmodelle relativ einfach realisiert werden können. Im zweiten Schritt werden Kontaktbedingungen und Reibungswerte von miteinander in Kontakt tretenden Strukturen definiert. Hierfür steht eine große Auswahl an Kontaktalgorithmen in LS-DYNA zur Verfügung.

Tabelle 26 zeigt die erstellten Gesamtmodelle, die aus Kombinationen von Fahrzeug und Fahrzeugrückhaltesystemen zusammengesetzt und untersucht wurden.

Tabelle 26: Gesamtmodelle - Kombinationen von Fahrzeug und Fahrzeugrückhaltesystem

Gesamtmodell	Pkw mit 900 kg (Abschnitt 3.2.1)	Pkw mit 1500 kg (Abschnitt 3.2.2)	Pkw mit 1665 kg (Abschnitt 3.2.2)	Lieferwagen mit 2200 kg (Abschnitt 3.2.3)	Lkw mit 10 t (Abschnitt 3.2.4)	Sattelzug mit 38 t (Abschnitt 3.2.5)
ESP 4.0 (Abschnitt 3.1.1)	A*					
ESP 2.0 (Abschnitt 3.1.2)		B*	C*		D	
EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau- länge) (Abschnitt 3.1.3)	E			F	G*	L
Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0 (Abschnitt 3.1.4)	H*	J*				
Übergang ESP 2.0 - EDSP 2.0 (Abschnitt 3.1.5)	I	K				
H4b Stahlschutzeinrichtung (Abschnitt 3.1.6)						M*
H4b Ortbetonschutzwand (Abschnitt 3.1.7)						N*

* anhand von Anprallprüfungen validiert

Die überwiegende Zahl der Gesamtmodelle wurde anhand von Anprallprüfungen validiert (in Tabelle 26 mit * gekennzeichnet). Vereinzelt wurden dabei die genauen im Anprallversuch ermittelten Anprallbedingungen (Anprallgeschwindigkeit, -winkel, -punkt) verwendet, damit die Simulationsergebnisse direkt mit den gemessenen Ergebnissen aus den Anprallversuchen verglichen werden konnten. Oftmals erfolgte im Rahmen der Simulationsstudien aber auch eine Berechnung mit Sollwerten der Norm EN 1317 (Anprallgeschwindigkeit, -winkel), die dann wiederum einen direkten Abgleich mit den im Prüfbericht angegebenen normalisierten Werten ermöglichte. Die Fahrzeugmasse wurde dagegen nicht an die im Rahmen des Anprallversuchs protokollierten Werte angepasst. Ebenso wenig wurde bei der Ermittlung des ASI-Wertes die jeweilige Sensorposition des Anprallversuchs berücksichtigt, die sich ab dem Jahr 2010 infolge einer Normänderung mit gleichzeitiger Anpassung der Filterung geringfügig verändert hat. Da nicht alle Fahrzeugmodelle Sensorpositionen sowohl auf dem Tunnel als auch im Fahrzeugschwerpunkt vorweisen, wurden

die ASI-Werte vereinfacht mit der im Fahrzeugmodell verfügbaren Sensorposition ermittelt. Auf den Validierungsstand der Gesamtmodelle wird in Abschnitt 4 näher eingegangen.

In den meisten Gesamtmodellen wird zur Definition der Kontaktbedingung zwischen dem Fahrzeug und Rückhaltesystem der LS-Dyna spezifische Algorithmus `"CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE"` benutzt.

3.3.1 Gesamtmodell A: TB 11 an ESP 4.0

Beim Gesamtmodell A wurde das 900 kg schwere Pkw-Modell (Geo Metro) mit der 36 m langen ESP 4.0 kombiniert. Der Pkw prallt dabei mit einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h unter einem Anprallwinkel von 20° bei 1,0 m hinter dem Holmstoß 2/3 an das System an (siehe Bild 15).



Bild 15: Gesamtmodell A: TB 11 an ESP 4.0

Der Validierungsstand des Gesamtmodells A kann Abschnitt 4.1 entnommen werden.

3.3.2 Gesamtmodell B: TB 31 an ESP 2.0

Das Gesamtmodell B besteht aus einer 60 m langen ESP 2.0 mit 12 m-Regelabsenkungen und einem 1500 kg schweren Pkw. Das Fahrzeug trifft mit einer Anprallgeschwindigkeit von 80,1 km/h und einem Anprallwinkel von 20° 1,71 m hinter dem Übergang vom Holm 5 zu Holm 6 auf das System (siehe Bild 16).

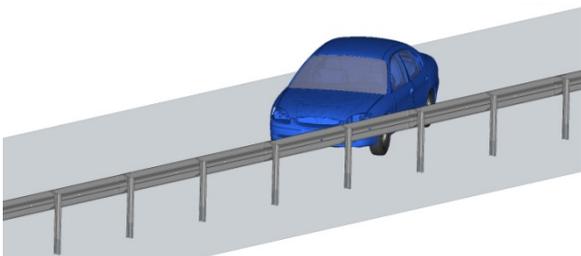


Bild 16: Gesamtmodell B: TB 31 an ESP 2.0

Das Gesamtmodell B wurde ausschließlich für die im Abschnitt 4.2 dargestellte Validierung erstellt und dient als Basis für Simulationsberechnungen mit dem Gesamtmodell D (siehe Abschnitt 3.3.4). In beiden Simulationsmodellen wird das identische Schutzeinrichtungsmodell (60 m ESP 2.0) verwendet.

3.3.3 Gesamtmodell C: TB 32 (1665 kg) an ESP 2.0

Das Gesamtmodell C unterscheidet sich vom Gesamtmodell B darin, dass die 60 m lange Schutzeinrichtung auf 36 m Gesamtlänge verkürzt aufgestellt und ohne AEK verwendet wurde. Zudem wurden die Parameter für den Kontakt optimiert, da eine genauere Vorhersage des zeitlichen Verlaufs nötig war. In der Regel betrachtet man bei Crash-Berechnungen frontale Zusammenstöße. Der relativ lange Kontakt mit der seitlichen Reibung zwischen Fahrzeug und mehreren aufeinanderfolgenden Schutzplankenholmen über viele Meter stellte sich bei näherer Betrachtung als problematisch hinsichtlich der Vorhersagegenauigkeit heraus und musste in weiteren Untersuchungen besonders in Betracht gezogen werden. Dazu wurde ein Ersatzmodell mit wenigen Knoten und Elementen erstellt, die nur wenige mm groß sind. Bei einem Kontakt

dringen Knoten in Elemente ein und werden wieder herausgedrückt. Über diesen Algorithmus werden die Verformungen der Elemente berechnet. Besteht aber zusätzlich zu der frontalen Bewegungsrichtung eine seitliche Reibungsrichtung, wobei der Knoten nicht aus demselben Element herausgedrückt wird, in den er eingedrungen war, kann ein Energiedefizit auftreten. Dieses summiert sich über die vielen Knoten und Elemente auf, aus denen der Kontaktbereich zwischen Fahrzeug und Schutzeinrichtung besteht. Die Folge ist eine signifikante Änderung der Gesamtenergie wodurch eine Relativierung der Vorhersagekraft des Simulationsablaufs, durch vergrößerte Unsicherheiten bezüglich der Leistungsfähigkeit der Schutzeinrichtung für die späteren Zeitpunkte ab ca. 0,1 s, notwendig wird. Durch die Wahl geeigneter Kontaktparameter konnte diesem Problem begegnet werden, sodass eine genaue Vorhersage bis zu 1 Sekunde erreicht wurde. Die Geschwindigkeit des Fahrzeuges beträgt 110 km/h. Im Gesamtmodell C wurde eine weiterentwickelte, stabilere Version des Fahrzeugmodell Taurus verwendet (verglichen mit Gesamtmodell B). Die Masse des Fahrzeuges im Gesamtmodell C beträgt (abweichend von Gesamtmodell B) 1665 kg.

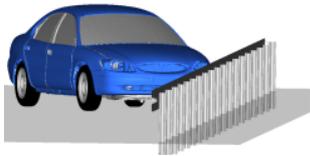


Bild 17: Ausgangsmodell Gesamtmodell C

Zum Validierungsstand des Gesamtmodells C finden sich in Abschnitt 4.3 nähere Informationen.

3.3.4 Gesamtmodell D: TB 42 an ESP 2.0

Das Gesamtmodell D wurde entwickelt, um die Leistungsfähigkeit der ESP 2.0 hinsichtlich der Aufhaltstufe H1 nach EN 1317 [2] zu überprüfen. Es stellt einen Anprall eines 10 t schweren Lkws an eine 60 m lange ESP 2.0 mit 12 m-Regelabsenkungen dar (siehe Bild 18). Der Anprallwinkel beträgt $15,1^\circ$ und der Anprallpunkt liegt 1,52 m nach Stoß 2/3. Die Anprallgeschwindigkeit beträgt 72,1 km/h. Die Anprallparameter wurden vom Gesamtmodell G unverändert übernommen.

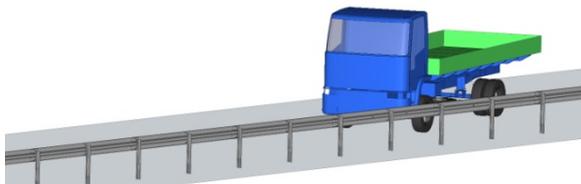


Bild 18: Gesamtmodell D: TB 42 an ESP 2.0

Das Gesamtmodell D basiert auf dem Gesamtmodell B, dessen Validierungsstand in Abschnitt 4.2 dokumentiert ist. In beiden Simulationsmodellen wird das identische Schutzeinrichtungsmodell (60 m ESP 2.0) verwendet.

3.3.5 Gesamtmodell E: TB 11 an EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau­länge)

Das Gesamtmodell E besteht aus dem 900 kg Pkw-Modell (Geo Metro) und der 32 m langen EDSP 2.0 (siehe Bild 19). Der Anprallwinkel ist 20°, die Anprallgeschwindigkeit beträgt 100 km/h und der Anprall erfolgte 0,6 m vor Stoß 2/3.

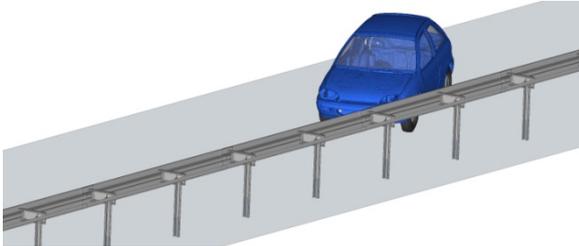


Bild 19: Gesamtmodell der TB 11 an EDSP 2.0

Das Gesamtmodell E dient zur Vervollständigung der noch fehlenden Prüfungskombination an der verkürzten EDSP 2.0 in den realen Anprallversuchen.

3.3.6 Gesamtmodell F: Lieferwagen (2200 kg) an EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau­länge)

Das Gesamtmodell F wurde durch Kombination des 2200 kg Lieferwagen (Ford Econoline Van) mit der 32 m langen EDSP 2.0 aufgebaut. Die in diesem Gesamtmodell verwendeten Parameter für Anprallwinkel (20°) und Geschwindigkeit (110 km/h) entsprechen denen eines TB 32 Anprallversuchs. Der Anprallpunkt liegt 1,51 m vor Stoß 1/2.



Bild 20: Gesamtmodell des Lieferwagens an EDSP 2.0

Mit diesem Gesamtmodell F soll das Verhalten der EDSP beim Anprall des nicht in der Norm DIN EN 1317 enthaltenen Lieferwagens untersucht werden.

3.3.7 Gesamtmodell G: TB 42 an EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau­länge)

Das Gesamtmodell G besteht aus dem 10 t Lkw und der 32 m EDSP 2.0. Der Anprallwinkel ist 15° und der Anprallpunkt 1,81m nach Stoß 1/2. Das Gesamtmodell entspricht damit dem durchgeführten TB 42 Anprallversuch.

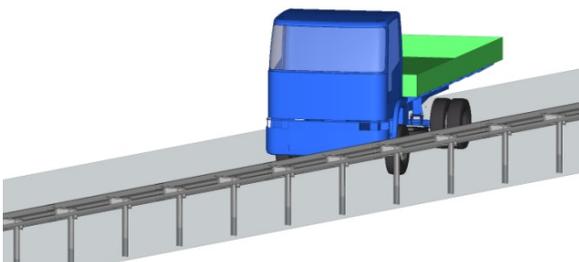


Bild 21: Gesamtmodell der TB 42 an EDSP 2.0

Der Validierungsstand des Gesamtmodells G kann Abschnitt 4.4 entnommen werden.

3.3.8 Gesamtmodell H: TB 11 an Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0

Das Gesamtmodell H besteht aus einem 900 kg Pkw (Geo Metro) und der Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0. Der Anprallwinkel beträgt 20°, die Anprallgeschwindigkeit 100 km/h und der Anprallpunkt liegt, wie in der Anprallprüfung 2,24 m nach Stoß 5/6.

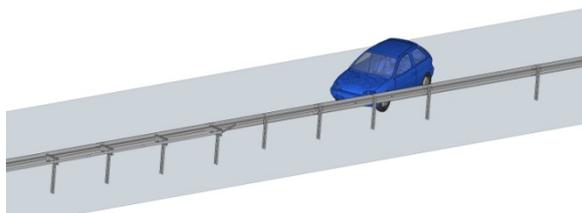


Bild 22: Gesamtmodell der TB 11 an Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0

Das Gesamtmodell H stellt die Basis für das nachfolgende Gesamtmodell I dar und wird anhand eines Anprallversuchs validiert. Der Validierungsstand des Gesamtmodells H kann Abschnitt 4.5 entnommen werden.

3.3.9 Gesamtmodell I: TB 11 an Übergang ESP 2.0 - EDSP 2.0

Das Gesamtmodell I besteht aus einem 900 kg Pkw (Geo Metro) und der Übergangskonstruktion ESP 2.0 - EDSP 2.0. Der Anprallwinkel beträgt 20°. Das Fahrzeug prallt mit 100 km/h am gewählten Anprallpunkt, der hinsichtlich der Insassenbelastung als kritisch bewertet wurde, kurz vor dem Stoß 7/8 gegen die Übergangskonstruktion.

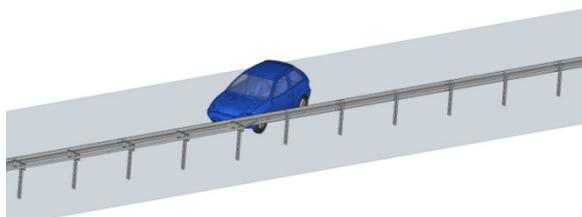


Bild 23: Gesamtmodell der TB 11 an Übergang ESP 2.0 - EDSP 2.0

Das Gesamtmodell I wurde erstellt, um das Verhalten der Leistungsfähigkeit der Übergangskonstruktion ESP 2.0 - EDSP 2.0 bei einem TB 11 Anprallversuch im Vergleich zur Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0 zu ermitteln.

3.3.10 Gesamtmodell J: TB 32 an Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0

Das Gesamtmodell J besteht aus einem 1500 kg Pkw (zweite Version des Modells Ford Taurus) und der Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0. Der Anprallwinkel beträgt 20°, die Anprallgeschwindigkeit 110 km/h und der Anprallpunkt liegt, wie in der Anprallprüfung 1,74 m vor Stoß 6/7.

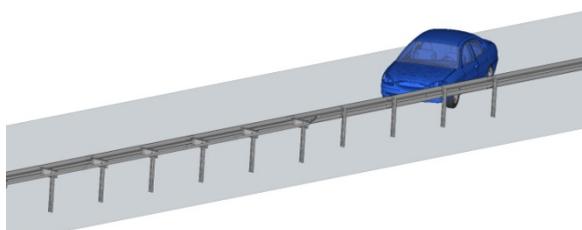


Bild 24: Gesamtmodell der TB 32 an Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0

Das Gesamtmodell J stellt die Basis für das nachfolgende Gesamtmodell K dar und wird anhand eines Anprallversuchs validiert. Der Validierungsstand des Gesamtmodells J kann Abschnitt 4.6 entnommen werden.

3.3.11 Gesamtmodell K: TB 32 an Übergang ESP 2.0 - EDSP 2.0

Das Gesamtmodell K besteht aus einem 1500 kg Pkw (Ford Taurus) und der Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0. Der Anprallwinkel beträgt 20° , die Anprallgeschwindigkeit 110 km/h und der Anprallpunkt ist 1,74 m vor Stoß 6/7 wie bei der Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0.

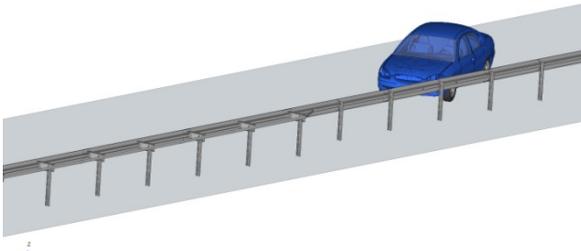


Bild 25: Gesamtmodell der TB 32 an Übergang ESP 2.0 – EDSP 2.0

Das Gesamtmodell K wurde erstellt, um das Verhalten und die Leistungsfähigkeit der Übergangskonstruktion ESP 2.0 – EDSP 2.0 bei einem TB 32 Anprallversuch im Vergleich zur Übergangskonstruktion ESP 4.0 – EDSP 2.0 zu untersuchen.

3.3.12 Gesamtmodell L: 22 t Sattelzug an EDSP 2.0 (verkürzte Aufbauhöhe)

Das Gesamtmodell L besteht aus einem 22 t schweren Sattelzug und einer 32 m langen EDSP 2.0, an deren Anfang und Ende sich jeweils 12 m lange Regelabsenkungen anschließen (siehe Abschnitt 3.1.3). Die Anprallparameter orientieren sich an einer TB81-Prüfung, bei der das Fahrzeug mit einer Anprallgeschwindigkeit von 65 km/h und einem Anprallwinkel von 20° auf das Fahrzeug-Rückhaltesystem trifft. Im vorliegenden Fall erfolgte der Anprall 1,48 m nach Holmstoß 1/2.

Der Sattelzug entspricht dem im Abschnitt 3.2.5 beschriebenen Fahrzeugmodell, dessen Gesamtgewicht im Gesamtmodell L von 38 t auf 22 t reduziert wurde. Der Schwerpunkt der Beladung in z-Richtung befindet sich im Fahrzeugmodell 1,8 m über Fahrbahnoberkante und entspricht somit den Normvorgaben in DIN EN 1317-1: 2010.

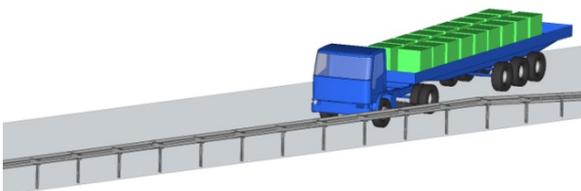


Bild 26: Gesamtmodell L: 22 t Sattelzug an EDSP 2.0

Das Gesamtmodell L wurde entwickelt, um zu untersuchen, ob die EDSP 2.0 in einreihiger Aufstellung auch 22 t schwere Sattelzüge mit einem niedrigen Beladungsschwerpunkt aufhalten kann.

3.3.13 Gesamtmodell M: TB 81 an H4b-Stahlschutzeinrichtung

Das Gesamtmodell M besteht aus einem 38 t schweren Sattelzug mit einem Beladungsschwerpunkt von $CGZ = 1,8$ m und einer 80 m langen Stahlschutzeinrichtung (siehe Abschnitt 3.1.6), bei der die Aufhaltestufe H4b mit realen Anprallprüfungen nachgewiesen werden konnte. Die Anprallbedingungen wurden

entsprechend der TB81-Prüfung gewählt (Anprallgeschwindigkeit 65 km/h, Anprallwinkel 20°). Das Fahrzeugmodell trifft am Pfosten 20 auf das Modell der Stahlschutzeinrichtung.

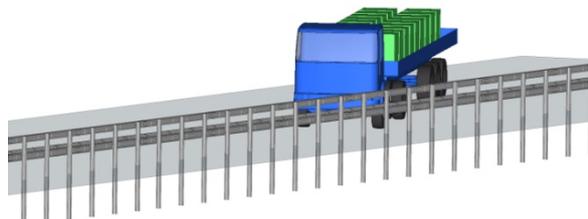


Bild 27: Gesamtmodell M: TB 81-Fahrzeug an H4b-Stahlschutzeinrichtung

Das Gesamtmodell M wurde erstellt, um den im Abschnitt 5.13 beschriebenen wichtigen Validierungsprozess zu durchlaufen und dient als Basismodell für Untersuchungen zum Einfluss der Ladungsverteilung auf das Fahrzeugverhalten eines 22 t schweren Sattelzuges. Bei den in Abschnitt 5.13 durchgeführten Untersuchungen erfolgte eine schrittweise Erhöhung des Beladungsschwerpunktes des Sattelzuges auf bis zu 2,4 m über Fahrbahnoberkante.

3.3.14 Gesamtmodell N: TB 81 an H4b-Ortbetonschutzwand

Das Gesamtmodell N entspricht dem zuvor beschriebenen Gesamtmodell M, wobei in diesem Gesamtmodell anstatt der Stahlschutzeinrichtung eine 80 m lange Ortbetonschutzwand mit der Aufhaltstufe H4b zum Einsatz kam. Die Simulation der TB81-Prüfung erfolgte zu Validierungszwecken mit einem 38 t schweren Sattelzug mit einem normgerechten Beladungsschwerpunkt (CGZ = 1,8 m), einer Anprallgeschwindigkeit von 65 km/h und einem Anprallwinkel von 20°. Der Anprallpunkt lag 27,35 m nach dem Anfang der Betonschutzwand.

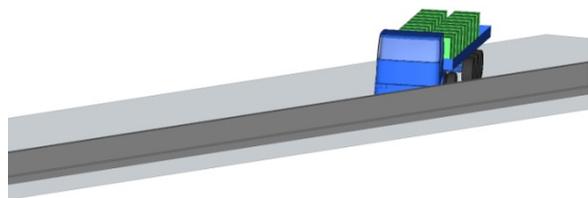


Bild 28: Gesamtmodell N: TB 81-Fahrzeug an H4b-Ortbetonschutzwand

Zur Definition der Interaktion zwischen Fahrzeug und Ortbetonschutzwand wurde in diesem Fall ein spezieller Kontakt gewählt, der auch ein oberflächennahes Materialversagen der Ortbetonschutzwand berücksichtigt.

Das Gesamtmodell N durchläuft analog zum Gesamtmodell M den im Abschnitt 4.8 beschriebenen Validierungsprozess und dient als Basismodell für Untersuchungen zum Einfluss der Ladungsverteilung auf das Fahrzeugverhalten eines 22 t schweren Sattelzuges, wobei eine schrittweise Erhöhung des Beladungsschwerpunktes des Sattelzuges auf bis zu 2,4 m über Fahrbahnoberkante erfolgt.

3.4 Weitere Randbedingungen

Neben den Anfangsbedingungen wie Anprallgeschwindigkeit, Anprallwinkel und Anprallpunkt sind auch andere Randbedingungen aus den Anprallversuchen in den Gesamtmodellen umzusetzen. Dazu gehört unter anderem die Modellierung des Untergrundes mit unterschiedlichen Reibungsbeiwerten für Fahrzeug und frei aufgestellter Betonschutzwand, die Interaktion von Fahrzeug-Rückhaltesystem und Boden infolge Pfosteneinspannung sowie die Berücksichtigung von Anfangs- und Endkonstruktionen und sonstigen Verankerungen. Diese werden zumeist durch vereinfachte Randbedingungen und Berechnungsannahmen abgebildet, die im Folgenden kurz dargestellt werden.

Die Modellierung des Untergrundes erfolgte in allen Simulationsberechnungen durch eine starre Fläche, die von den Elementen der Simulationsmodelle nicht durchdrungen werden können und bei Kontakt Reibungskräfte erzeugen.

Für die Nachbildung der Pfosten-Boden-Interaktion gibt es grundsätzlich verschiedene Modellierungstechniken. Neben der in diesen Studien verwendeten festen oberflächennahen Einspannung des Pfosten mit einem sich unterhalb der Fahrbahnoberkante ausbildenden Fließgelenk, gibt es auch komplexere Ansätze mit Federn und Dämpfern sowie Volumenelementen (siehe Bild 29). Diese setzen jedoch umfangreiche Bodenuntersuchungen voraus, die bislang für die betrachteten Pfosteneinspannungen im Bankettbereich von Straßen nicht vorliegen.

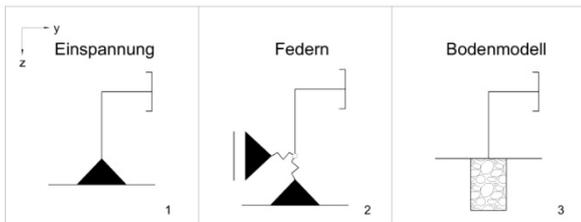


Bild 29: Modellierungstechniken der Boden-FRS-Interaktion [4]

Zur Modellierung von Anfangs- und Endkonstruktionen (AEK) von Schutzeinrichtungen und sonstigen Verankerungen wurden in den Gesamtmodellen unterschiedlich komplexe Modellierungsansätze gewählt. In einem vereinfachten Ansatz wurden die in Längsrichtung verlaufenden Konstruktionselemente in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt und Knoten am äußeren Rand des Simulationsmodells fixiert. Die translatorischen Verschiebungen, die üblicherweise während des Anpralls in der Anfangs- und Endkonstruktion auftreten und nach der Anprallprüfung gemessen werden, konzentrieren sich dabei auf einen sehr kleinen Bereich der künstlich verlängerten Konstruktionselemente mit einer erhöhten Elastizität (siehe Bild 30).

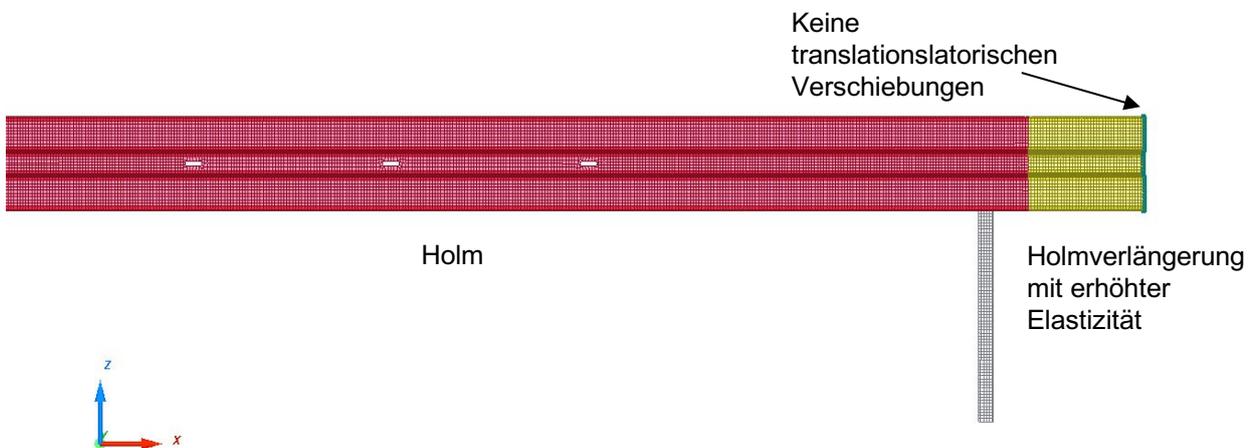


Bild 30: Vereinfachter Ansatz AEK: Holmverlängerung mit erhöhter Elastizität

In einem komplexeren Ansatz werden die Anfangs- und Endkonstruktionen (z.B. 12 m-Regelabsenkungen gemäß TL-SP 99 [8]) realitätsnah abgebildet und über Pfosteneinspannungen sowie über in Längsrichtung fixierte Kopfstücke und in Querrichtung in den Boden einbindende fixierte Holmunterkanten an einer Verschiebung gehindert (siehe Bild 31).

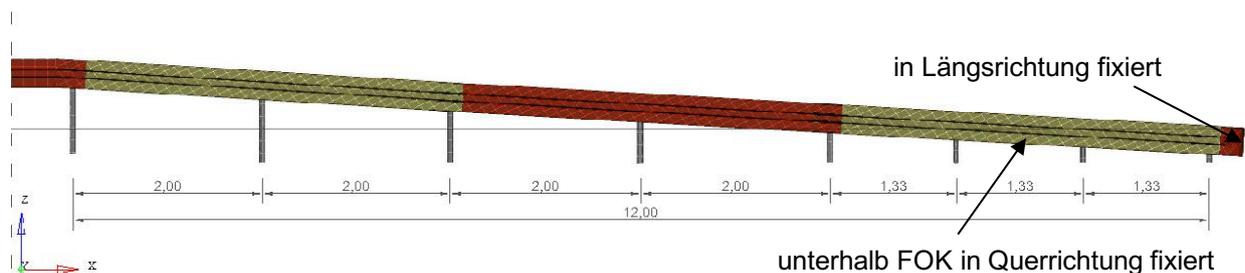


Bild 31: Realitätsnahe Modellierung der 12 m - Regelabsenkung der ESP 2.0

4 Verifizierung und Validierung

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Gesamtmodelle wurden als Referenzmodelle für die in Abschnitt 5 beschriebenen Studien verwendet. Der Validierungsstand wird anhand ausgewählter Validierungskriterien der europäischen Norm EN 16303:2020 dargestellt. Jedoch wird bei der Anwendung der Simulation im Forschungsbereich – wie in Abschnitt 1.2 beschrieben - nicht der Anspruch erhoben, diese vollumfänglich zu erfüllen. Vor allem Aussagen über das Verhalten der Schutzeinrichtung und des Fahrzeugs bezüglich Beschleunigung (Insassenbelastung/ ASI Wert) sind aufgrund des Verifizierungsstandes nicht möglich, bzw. nur in einer eingeschränkten, qualitativen und vergleichenden Form. Dagegen sind Verformungen und Verschiebungen (Dynamische Durchbiegung, Wirkungsbereich, Fahrzeugeindringung) gegenüber der numerischen Stabilität weniger empfindlich und daher mit einer größeren Sicherheit voraus sagbar. Die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens einer Voraussage aufgrund einer Simulation ist grundsätzlich davon abhängig, wie weit die zeitliche Entwicklung des Anpralls fortgeschritten ist. Daher können Ereignisse die unmittelbar nach dem Anprall eintreffen mit größerer Sicherheit bewertet werden. Für Ereignisse, mit einem großen zeitlichen Abstand nach dem ersten Anprall, sind die Aussagen entsprechend ihrer zeitlichen Entfernung nur bei gut verifizierten und validierten Modellen gültig.

Während die Norm DIN EN 16303 vorgibt, dass die Anprall-Simulationen mit den der Typprüfung entsprechenden, nicht normalisierten Anprallparametern (Masse, Winkel, Geschwindigkeit) durchgeführt werden, wurden die nachfolgend beschriebenen Simulationsmodelle in den meisten Fällen mit den Anprallparametern gemäß EN 1317 [2] berechnet. Daher werden bei der Überprüfung der Validierungsanforderungen die normalisierten Werte aus der Anprallprüfung mit den normalisierten Werten der Simulation abgeglichen.

4.1 Gesamtmodell A: TB11 an ESP 4.0

Zur Validierung des Gesamtmodells A wurde die Anprallprüfung BAST 1994 7D 02 herangezogen. Die Schutzeinrichtung erreichte die Aufhaltstufe N2, die Wirkungsbereichsklasse W5 und die Anprallheftigkeitsstufe A [9].

4.1.1 Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs

„Das Fahrzeug prallt [in der realen Anprallprüfung TB11] mit der linken vorderen Front beim Holm Nr. 6 unter einem Winkel von 20° an das System. Beim Anprall verformt sich das Fahrzeug und wird vorne leicht angehoben, ohne dass die Räder den Bodenkontakt verlieren. Das Fahrzeug bleibt während des Anprallvorgangs in seiner Lage stabil und vollzieht keine nennenswerten Kipp-, Roll- oder Nickbewegungen. Nach dem Abprall fährt es in einem flachen Winkel geradlinig weiter bis es zum Stillstand gebracht wird. Das Fahrzeugverhalten nach dem Abprall von der Schutzeinrichtung liegt innerhalb der vorgegebenen Grenze.“ Prüfbericht 1994 7D 02 [14]. „[In der Simulation prallt das Fahrzeug] 0,83 Meter hinter dem dritten Pfosten mit seiner linken Fahrzeugseite an. Infolge des Anpralls wird der linke Vorderwagen oberhalb der Stoßfänger deformiert und das Fahrzeug behält seine Fahrtrichtung zunächst bei. Nach 0,82 Sekunden verlässt das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 82 km/h die Linie des Schutzsystems. Das Fahrzeug wird kontinuierlich und ohne große Roll - oder Wankbewegungen umgelenkt. Der ermittelte ASI-Wert liegt bei 0,58 zum Zeitpunkt 0,07 Sekunden (Bericht FE 03.0488 [5]).

4.1.2 Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung

Die Beschädigungen der Schutzeinrichtung beschränkten sich in der realen Anprallprüfung auf einen relativ kleinen Bereich (vier Pfosten, zwei davon vom Holm gelöst). Daher wurde es als ausreichend angesehen, im Simulationsmodell einen 36 m (statt 60 m in der Anprallprüfung) langen Abschnitt der Schutzeinrichtung abzubilden, mit dem vergleichbare Beschädigungen festgestellt werden konnten. Hierdurch verkürzt sich die Berechnungszeit deutlich.

„[In der Simulation wird Pfosten 4] 0,12 Sekunden nach dem Anprall vom System gelöst und durch Stoßfänger und Radaufhängung weiter in Richtung Boden verformt. Die Verbindung zwischen Holm und Pfosten 5 versagt zum Zeitpunkt 0,23 Sekunden und wird unmittelbar danach von der Fahrzeugmitte überfahren. Die Verbindung des Pfosten 6 zum Holm bleibt bestehen. Der Pfosten wird bei 0,48 Sekunden vom linken Vorderrad angefahren.“ (Bericht FE 03.0488 [5]).

Die Verformungswerte der ESP 4.0 in der realen Prüfung wurden im Prüfbericht nicht dokumentiert. Ein qualitativer Vergleich des Anprallgeschehens nach Beendigung des Anprallvorgangs anhand Bild 32 lässt auf eine etwas größere statische Verformung in der Simulation schließen.



Bild 32: Verformung der ESP 4.0 in der Anprallprüfung (oben) und in der Simulation (unten)

Gesamtbewertung

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Versuchsparameter, die ermittelten Leistungsdaten sowie die Kontaktstrecke im quantitativen Vergleich.

Tabelle 27: Anprallparameter und Ergebnisse von Prüfung und Simulation (Gesamtmodell A)

	Prüfung 1994 [14] 7D 02	Simulation TB 11 ESP 4.0	Abweichung Real - Virtuell	Grenzwert EN 16303	Grenzwert eingehalten
Prüfungstyp	TB 11	TB 11			
Schutzeinrichtung	ESP 4.0 (60 m)	ESP 4.0 (36 m)			
Fahrzeugmasse [kg]	908	900			
Anprallwinkel [°]	20°	20°			
Anprallgeschwindigkeit [km/h]	100,2	100			
Norm. dynamische Durchbiegung D_N [m] ¹	Fehlende Dokumentation	1,03			
Norm. Wirkungsbereich W_N [m] ²	Fehlende Dokumentation	1,05			
Kontaktstrecke [m]	11,34	8,73			
Anprallheftigkeitsstufe	A	A			
ASI	0,77	0,61	0,16	0,1	nein
THIV [km/h]	18,3	17,1	1,2	3	ja

Das Fahrzeugverhalten in der Simulation ist mit dem in der realen Anprallprüfung vergleichbar. Das Box-Kriterium ist sowohl in der realen Anprallprüfung als auch in der Simulation erfüllt. Ein quantitativer Vergleich der Anprallheftigkeit zeigt THIV- und ASI Werte in gleicher Größenordnung mit geringfügig kleineren Werten in der Simulation. Begründet könnte die Abweichung in unterschiedlichen Sensorpositionen sein. Insgesamt ist das Gesamtmodell A für Forschungszwecke und qualitative Parameterstudien und relative Vergleiche geeignet, erfüllt aber - auch aufgrund nicht vollständig vorliegender Daten des Anprallversuchs aus dem Jahr 1994 - nicht die Validierungsanforderungen der EN 16303. Es dient als Referenzmodell für die Parameterstudien 1, 3 und 5.

4.2 Gesamtmodell B: TB 31 an ESP 2.0

Im realen Test prallt das 1500 kg schwere Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 81,4 km/h und einem Winkel von 20,6° an die ESP 2.0. Die Schutzeinrichtung erreichte dabei die Aufhaltstufe N2, die Wirkungsbereichsklasse W4 und die Anprallheftigkeitsstufe A [9]. In der Simulation wurden für das 1514 kg schwere Fahrzeug Soll-Anprallparameter nach DIN EN 1317 (TB 31: 1500 kg, 80 km/h, 20°) gewählt.

4.2.1 Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs

Die Beschädigung des Fahrzeugs ist in der realen Prüfung größer. Die Aufhängung des Fahrzeugs wird in der realen Prüfung stark nach innen gebogen und das linke Vorderrad wird blockiert. Dies führt zur Rotation des Fahrzeugs und einem Sekundäranprall.

Das Fahrzeug prallt sowohl in der Anprallprüfung als auch in der Simulation 1,71 m nach Stoß 5/6 an. Nach einer Kontaktstrecke von 7,29 m in der realen Anprallprüfung, bzw. 7,79 m in der Simulation löst sich das Fahrzeug vom System.

² Normalisierte Werte gemäß DIN EN 1317-2:2010 [2].

Bis zu diesem Zeitpunkt sind die Fahrtverläufe der Fahrzeuge im realen und virtuellen Test nahezu identisch. Die im realen Test beobachtete Drehimpulsänderung des Fahrzeugs nach dem Abprall kann im virtuellen Test nicht nachgebildet werden.

4.2.2 Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung

Wie in Bild 33 zu sehen werden in der realen Prüfung 4 Pfosten (Pfosten 6-2 bis 8-1) mit den dazugehörigen Stützbügeln abgelöst, während sich in der virtuellen nur 3 Pfosten (Pfosten 6-2 bis 7-2) lösen. Die dazugehörigen Stützbügel bleiben in der Simulation aufgrund eines vereinfachten Schraubenmodells mit dem Holm verbunden. Im Simulationsmodell wurde die Schraubenverbindung, die die Holme, den Stützbügel und den Pfosten verbindet, als Schweißverbindung modelliert. Während in der Realität eine gerissene Schraube die Verbindung der verbundenen Bauteile im vollen Umfang löst (Stützbügel lösen sich sowohl vom Pfosten als auch von den Holmen), wird im Simulationsmodell ausschließlich die Schweißverbindung zum Pfosten getrennt, da zwischen den Knoten des Pfostens und des Stützblechs die Versagenskriterien aus Tabelle 3 als erstes überschritten werden.

In Bild 33 wird die Verformung des Systems qualitativ gegenübergestellt.

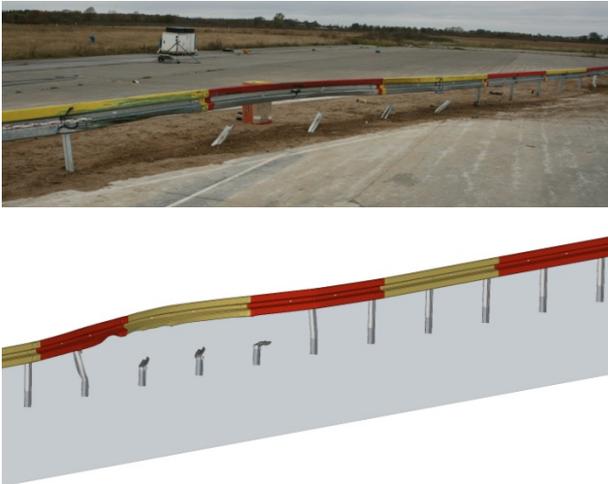


Bild 33: Verformung und Beschädigung der ESP 2.0 in der Anprallprüfung (oben) und in der Simulation (unten)

Gesamtbewertung

Die nachfolgende Tabelle 28 zeigt die Versuchsparameter, die ermittelten Leistungsdaten sowie die Kontaktstrecke im quantitativen Vergleich.

Tabelle 28: Vergleich der Leistungsdaten der Anprallprüfung und der Simulation (Gesamtmodell B)

	Prüfung 2009 7D 10	Simulation TB 31 ESP 2.0	Abweichung Real - Virtuell	Grenzwert EN 16303	Grenzwert eingehalten
Prüfungstyp	TB 31	TB 31			
Schutzeinrichtung	ESP 2.0 (60 m)	ESP 2.0 (60 m)			
Fahrzeugmasse [kg]	1500	1513			
Anprallwinkel [°]	20,6	20			
Anprallgeschwindigkeit [km/h]	81,4	80			
Norm. dynamische Durchbiegung D_N [m]	0,46	0,67	0,21	0,15	Nein
Norm. Wirkungsbereich W_N [m]	0,56	0,72	0,16	0,16	Ja
Wirkungsbereichs- klasse	W1	W2			
Kontaktstrecke [m]	7,29	7,79			
Anprallheftigkeits- stufe	A	A			
ASI	0,6	0,5	0,1	0,1	Ja
THIV	17,2	15,0	2,2	3	Ja

Die dynamische Durchbiegung und der Wirkungsbereich sind in der virtuellen Prüfung stärker ausgeprägt und die Kontaktstrecke entsprechend etwas länger. Während die Validierungsanforderung für den Wirkungsbereich noch eingehalten ist, wird der Grenzwert bei der dynamischen Durchbiegung um wenige Zentimeter überschritten.

Die Anprallheftigkeit betreffend werden die Grenzen für die Abweichungen der ASI- und THIV-Werte gemäß DIN EN 16303 eingehalten.

Eine Schwierigkeit für einen Vergleich der realen Prüfung mit der Simulation stellt die im Prüfbericht vorgenommene Rundung der Leistungsdaten dar, ohne dass Fehlertoleranzen angegeben sind. Aufgrund dieser Vorgehensweise ist der Vergleich der Daten aus der realen Prüfung mit den Daten aus der Simulation mit einem relativ großen Fehler, in Größenordnung der letzten Nachkommastelle, behaftet.

In EN 16303 gibt es eine weitere Validierungsanforderung hinsichtlich des zeitlichen Versatzes des maximalen ASI-Wertes. Um ein vergleichbares Fahrzeugverhalten sicherstellen, soll ein zeitlicher Versatz von 50 ms nicht überschritten werden. In Bild 34 ist exemplarisch der zeitliche Verlauf der nach alter Norm ermittelten ASI-Kurven aus der Simulation (rot), sowie aus der realen Prüfung (grün) dargestellt.

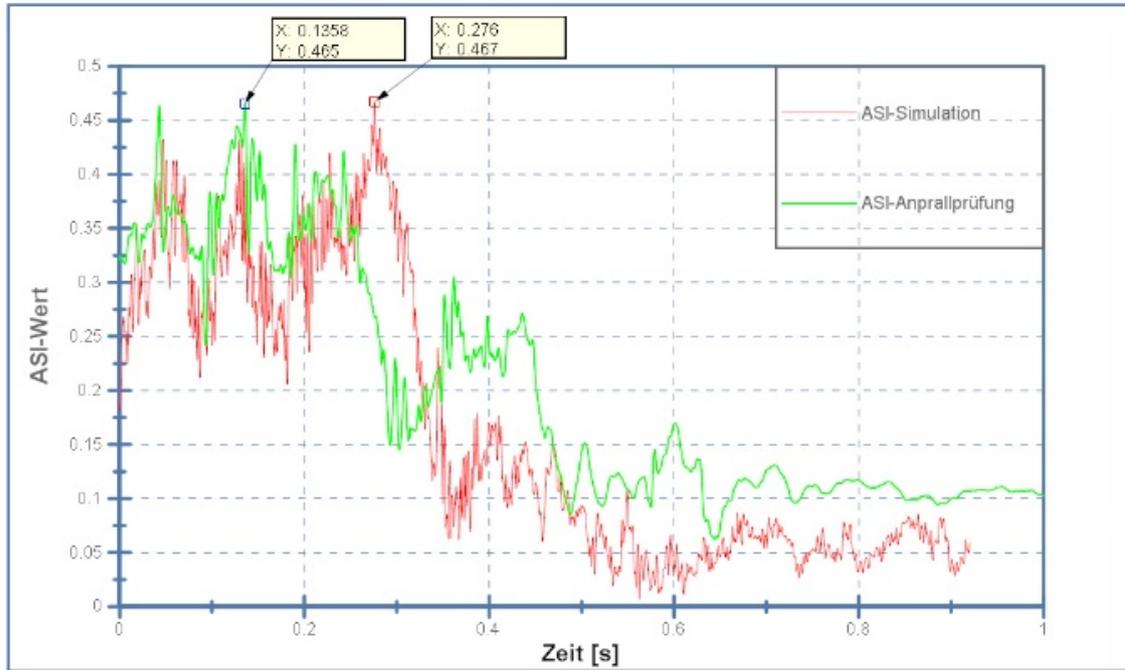


Bild 34: Vergleich des zeitlichen ASI-Verlaufs von Anprallprüfung und Simulation (Ermittlung nach EN1317-1,2 1998/2006)

In diesem Beispiel wird eine wachsende Diskrepanz zwischen Anprallprüfung und Simulation deutlich, die ab etwa 0,2 s einsetzt. Diese zeitliche Entwicklung ist auch an der ASI-Kurve im Abschn. 4.5 zu sehen, wobei das Ausmaß dieses Effektes größer ist. Die Gründe hierfür liegen wahrscheinlich in den verwendeten Kontaktdefinitionen, die der Reibung zwischen Fahrzeug und Schutzeinrichtung noch nicht genügend Rechnung tragen.

Dieses Beispiel soll auch zeigen, dass sich der Zeitpunkt der maximalen ASI-Werte von Prüfung und Simulation nicht decken muss. Dagegen ist eine zeitliche Übereinstimmung der ASI Kurven hinsichtlich des Validierungsgrades von besonderem Interesse. Im Abschnitt 6 wird darauf näher eingegangen.

4.3 Gesamtmodell C: TB 32 an ESP 2.0

Die Verifikation und Validierung eines Simulationsmodells, auf dem das Gesamtmodell C basiert, wurde bereits in einem externen Forschungsprojekt [5] anhand eines TB31-Anprallversuchs (2009 7D 10) durchgeführt und dargestellt. Daher steht die Validierung an einer realen Prüfung in diesem Abschnitt nicht im Vordergrund. Beschädigungen und Verformungen des Fahrzeugs bzw. der Schutzeinrichtung werden nicht verglichen. Jedoch werden analog zu den vorhergehenden Abschnitten ausgewählte Leistungsdaten der Simulation mit denen des realen TB32-Anprallversuchs (2000 7D 07) tabellarisch gegenübergestellt.

Tabelle 29: Vergleich der Leistungsdaten der Anprallprüfung und der Simulation (Gesamtmodell C)

	Prüfung 2000 7D 07	Simulation TB 32 ESP 2.0	Abweichung Real - Virtuell	Grenzwert EN 16303	Grenzwert eingehalten
Prüfungstyp	TB 32	TB 32			
Schutzeinrichtung	ESP 2.0 (60 m)	ESP 2.0 (37 m)			
Fahrzeugmasse [kg]	1474	1635			
Anprallwinkel	20°	20°			
Anprallgeschwindigkeit [km/h]	111,1	110			
Norm. dynamische Durchbiegung D_N [m]	1,0	1,1	0,1	0,2	ja
Wirkungsbereichs- klasse	W4	W4			
Anprallheftigkeits- stufe	A	A			
ASI	0,6	0,7	0,1	0,1	ja

Zusätzliche Änderungen der Kontaktbedingungen, die am Simulationsmodell für eine verbesserte numerische Stabilität vorgenommen wurden, hatten geringfügig abweichende Simulationsergebnisse zur Folge, die in Abschnitt 6.1 näher beschrieben werden. Nicht zuletzt wird sicherlich auch das gegenüber dem Normwert um 135 kg erhöhte Fahrzeuggewicht im Simulationsmodell den ermittelten ASI-Wert beeinflussen und zu Abweichungen vom Anprallversuch führen.

Trotz der nicht zu vernachlässigenden Abweichung der Fahrzeugmasse bleiben die betrachteten Leistungsdaten innerhalb der Grenzen, die in der Norm (DIN EN 16303) festgelegt sind.

Das hinsichtlich der numerischen Stabilität verbesserte Gesamtmodell C dient als Referenzmodell für die Parameterstudie 7, in der der Einfluss verschiedener Krümmungsradien der Schutzeinrichtung ($R = 60$ m, 90 m und 120 m) auf die Leistungsdaten in einem relativen Vergleich untersucht wird.

4.4 Gesamtmodell G: TB42 an EDSP 2.0 (verkürzte Aufbauhöhe)

In der Anprallprüfung prallt der Lkw mit einer Anprallgeschwindigkeit von $72,9$ km/h $2,41$ m vor Stoß 3/4 an das System an. Die Schutzeinrichtung erreichte dabei die Leistungsdaten H1, W5, A. In der Simulation wurde eine Anprallgeschwindigkeit von $72,4$ km/h und ein Anprallpunkt kurz vor Stoß 2/3 gewählt. Der Anprallwinkel ist in beiden Fällen 15° .

4.4.1 Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs

Beide Fahrzeuge, in der Anprallprüfung und der Simulation, belasten nach Anprall einen der mittleren Holme und biegen dabei die Pfosten in Anprallrichtung zu Boden. Dann werden die Fahrzeuge allmählich umgelenkt, was mit dem Lösen der Pfosten vom Holm und den Abstandhaltern einhergeht. Nach einer

Kontaktstrecke von 20 m verlassen die Fahrzeuge die Systeme am Holm 8. Qualitativ sind die betrachteten Anprallvorgänge nahezu identisch.

4.4.2 Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung

In der Anprallprüfung und der Simulation entstehen vergleichbare Beschädigungen an beiden Systemen. In beiden Fällen sind die Holme 3 bis 8 und die Pfosten 3-1 bis 8-1 betroffen. Es besteht lediglich ein Unterschied darin, dass in der Simulation die Pfosten 4-1 bis 7-1 vom System gelöst werden und in der Anprallprüfung die Pfosten 5-1 bis 7-2, was mit dem in Richtung Systemanfang verschobenen virtuellen Anprallpunkt begründet werden kann.

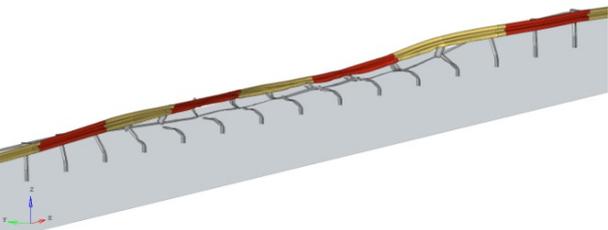


Bild 35: Verformung der EDSP 2.0 in der Anprallprüfung (oben) und in der Simulation (unten)

Gesamtbewertung

Betrachtet man die Leistungsdaten werden die Toleranzen gemäß DIN EN 16303 eingehalten. Dies gilt sowohl für die dynamische Durchbiegung als auch für den Wirkungsbereich und die Fahrzeugeindringung, wobei die Simulation größere Werte als der Anprallversuch ermittelt.

Tabelle 30: Vergleich der Leistungsdaten der Anprallprüfung und Simulation (Gesamtmodell G)

	Prüfung 2011 7D 02	Simulation TB 42 EDSP 2.0	Abweichung Real - Virtuell	Grenzwert EN 16303	Grenzwert eingehalten
Prüfungstyp	TB 42	TB 42			
Schutzeinrichtung	EDSP 2.0 (32 m)	EDSP 2.0 (56,7 m)			
Fahrzeugmasse [kg]	10040	10174			
Anprallwinkel	15°	15°			
Anprallgeschwindigkeit [km/h]	72,9	72,09			
Norm. Wirkungsbereich W_N [m]	1,6	1,82	0,22	0,42	ja
Norm. dynamische Durchbiegung D_N [m]	1,5	1,57	0,07	0,25	ja
Fahrzeugeindringung V_N [m]	2,0	2,5	0,5	0,5	ja
Wirkungsbereichs- klasse	W5	W6			
Kontaktstrecke [m]	20,27	20,25			

Mit dem Gesamtmodell G sind bei vorliegendem Validierungsstand qualitative Aussagen zum Einfluss eines veränderten Anprallwinkels sowie einer variierenden Systemhöhe und -neigung möglich. Es dient den Parameterstudien 2, 4 und 6 als Referenzmodell.

4.5 Gesamtmodell H: TB11 an Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0

Das Gesamtmodell H und das nachfolgende Gesamtmodell J verifizieren theoretische Betrachtungen an einer modifizierten Übergangskonstruktion und wurden bereits in V328 [11] als virtuelle Prüfungen herangezogen.

In der Simulation werden die Anprallgeschwindigkeit und der Anprallwinkel mit dem Normwert gemäß DIN EN1317-2 angesetzt, d.h. der 900 kg schwere Pkw prallt mit 100 km/h unter einem Winkel von 20° an die Übergangskonstruktion. Der Anprallpunkt der Simulation wurde entsprechend der Anprallprüfung gewählt.

4.5.1 Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs

Sowohl in der realen Anprallprüfung als auch in der Simulation prallen die beiden Fahrzeuge 2,24 m nach Stoß 5/6 an. Nach einer Kontaktstrecke von ca. 9,5 m lösen sich die Fahrzeuge vom System. Nach dem Ende des jeweiligen Kontakts dreht sich das Fahrzeug in der Anprallprüfung um ca. 135 Grad um die Hochachse bis zur Endlage, während in der Simulation nur eine leichte Rotation des Fahrzeugs beobachtet wird.

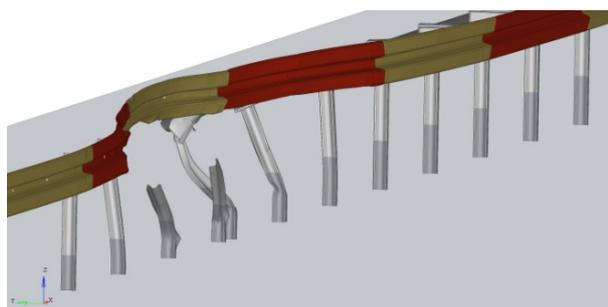


Bild 36: Vergleich der Verformungen der Systeme in der Anprallprüfung (oben) und in der Simulation (unten)

4.5.2 Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung

Angesichts der Verformungen und der Schäden am System sind die Ergebnisse nahezu identisch. Es werden zwei Pfosten (Pfosten 6-2 und 7-1) mit dem jeweiligen dazugehörigen Stützbügel von den Systemen abgelöst und die Beschädigungen am System erstrecken sich in beiden Fällen bis zum Holm 9. Es besteht jedoch ein kleiner Unterschied dahingehend, dass die Verformung in der Simulation größer ist als die in der Anprallprüfung. Dies wird anhand der gemessenen dynamischen Durchbiegung und des Wirkungsbereichs deutlich (siehe Tabelle 31).

Gesamtbewertung

In beiden Fällen können bei den Fahrzeugen starke Beschädigungen der linken vorderen Seite der Radaufhängung beobachtet werden. Entsprechend löst sich die linke Seite des Stoßfängers des Fahrzeugs in der Simulation leicht ab, während der Stoßfänger des Fahrzeugs in der Anprallprüfung sich fast vollständig löst, was aufgrund der Beschädigung der Radaufhängung zur Blockierung des Vorderrads und der damit verbundenen Rotation des Fahrzeugs in der Anprallprüfung führt.

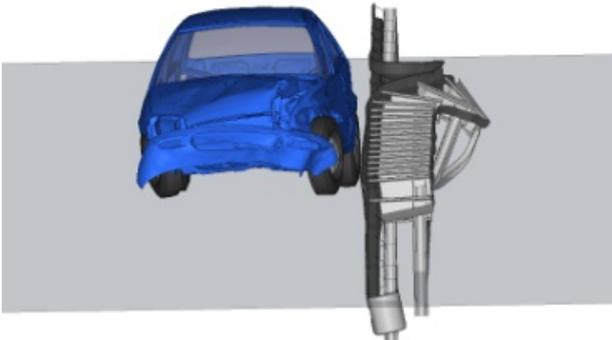


Bild 37: Vergleich der Beschädigungen der Fahrzeuge in der Anprallprüfung (oben) und in der Simulation (unten)

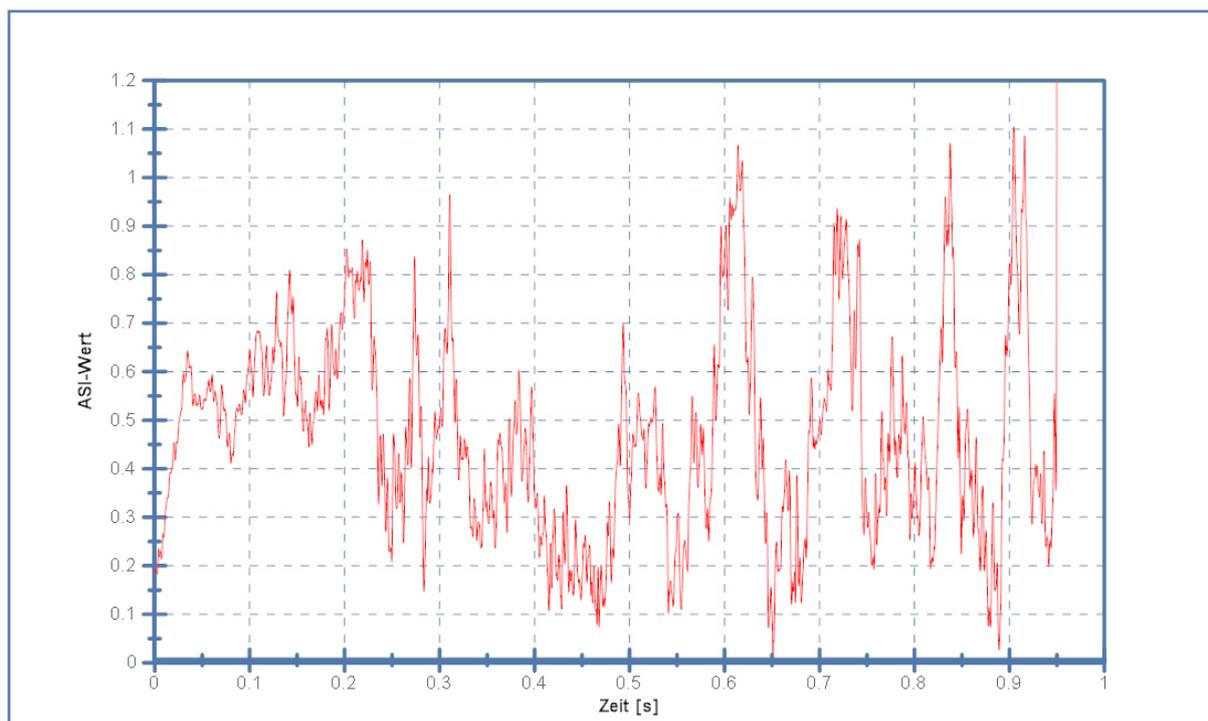


Bild 38: Zeitlicher ASI-Verlauf in der Simulation (Ermittlung nach EN1317-1,2 1998/2006)

Bei der Betrachtung der ASI-Kurve der Simulation in Bild 38 fällt auf, dass sie nach 0,4 s ansteigt, was den Vorgängen bei einem Fahrzeuganprall widerspricht. Grund dafür sind numerische Effekte, die zu einem Rauschen führen, das im zeitlichen Verlauf immer mehr zunimmt, und gegen Ende der Simulation gegenüber dem Signal ganz überwiegt. Da bei Betrachtung der Werte bis 0,4 s der maximale ASI Wert mit dem aus der Prüfung noch vergleichbar ist, kann das Simulationsmodell die Prüfung in den ersten Zehntelsekunden noch relativ gut abbilden, jedoch ist es für eine Studie mit quantitativen Vorhersagen für den ASI-Wert ungeeignet, vergleichende Studien zu Verformungswerten, die weniger empfindlich auf numerische Effekte reagieren, sind aber dennoch möglich.

Tabelle 31: Vergleich der Leistungsdaten von Anprallprüfung und Simulation (Gesamtmodell H)

	Prüfung 2009 7G 11	Simulation TB 11 Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0	Abweichung Real – Virtuell	Grenzwert EN 16303	Grenzwert eingehalten
Prüfungstyp	TB 11	TB 11			
Übergangskonstruktion	ESP 4.0/2.0	ESP 4.0/2.0			
Fahrzeugmasse [kg]	889	900			
Anprallwinkel	19,6°	20°			
Anprallgeschwindigkeit [km/h]	102,0	100,01			
Norm. dynamische Durchbiegung D_N [m]	0,61	0,76	0,15	0,22	ja
Wirkungsbereich W_m [m]	0,8	0,96	0,16	0,26	ja
Wirkungsbereichs- klasse	W2	W3			
Kontaktstrecke [m]	9,65	9,27			
Anprallheftigkeits- stufe	A	A			
ASI	0,8	0,96	0,16	0,1	nein
THIV [km/h]	21,1	21,49	0,39	3	ja

Unter Beachtung der oben beschriebenen Einschränkungen bildet das Modell die Prüfung TB 11 bezüglich der Verformungen gut ab und kann für die hier geplanten Untersuchungen genutzt werden.

4.6 Gesamtmodell J: TB 32 an Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0

In der Anprallprüfung prallt ein 1432 kg schweres Fahrzeug mit einer Anprallgeschwindigkeit von 110,8 km/h und einem Anprallwinkel von $19,7^\circ$ an eine Übergangskonstruktion.

In der Simulation ist das Fahrzeug 1634 kg schwer, und die Anprallparameter für Geschwindigkeit und Winkel entsprechen den Normwerten der DIN EN 1317-2 [2].

Der Anprallvorgang in der Simulation ist mit dem in der realen Anprallprüfung vergleichbar. Die beiden Fahrzeuge prallen 1,74 m vor Beginn der Übergangskonstruktion (Stoß 6/7) an das System. Nach dem Ablösen der Pfosten 7-1 und 7-2 fahren die Fahrzeuge weiter in Anprallrichtung. Mit dem Ablösen der Pfosten 8-1 und 8-2 werden die Fahrzeuge allmählich bis zum Holm 9 in der Anprallprüfung und bis zum Holm 10 in der Simulation umgelenkt.

4.6.1 Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs

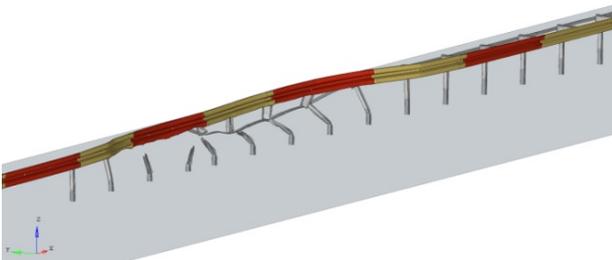


Bild 39: Vergleich der Verformungen der Systeme in der Anprallprüfung (oben) und in der Simulation (unten)

Die Beschädigungen des Fahrzeugs in der Anprallprüfung sind stärker ausgeprägt als in der Simulation. Der Unterschied betrifft hauptsächlich die linke Vorderseite bzw. das linke Vorderrad.

4.6.2 Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung

Die Beschädigungen und die Verformungen am System sind in beiden Fällen vergleichbar. Die dynamische Durchbiegung und der Wirkungsbereich sind in der Simulation etwas geringer als in der Anprallprüfung, was durch eine längere Kontaktstrecke in der Simulation begründet sein könnte.

Gesamtbewertung

Wegen der schon im Modell H genannten numerischen Schwierigkeiten, die in einem geringeren Ausmaß auch in diesem Modell zutage treten, ist ein quantitativer Abgleich der ASI Kurven aus der Simulation mit denen aus der Prüfung nicht möglich. Trotzdem können die in der Simulation ermittelten kleineren Verformungswerte in Vergleichsstudien eine belastbare Aussagekraft haben. Das Gesamtmodell J wird in Studie 12 verwendet.

Tabelle 32: Vergleich der Leistungsdaten der Anprallprüfung und Simulation (Gesamtmodell J)

	Prüfung 2009 7G 12	Simulation TB 32 Übergang ESP 4.0-EDSP 2.0	Abweichung Real – Virtuell	Grenzwert EN 16303	Grenzwert eingehalten
Prüfungstyp	TB 32	TB 32			
Übergangskonstruktion	ESP 4.0 – EDSP 2.0	ESP 4.0 – EDSP 2.0			
Fahrzeugmasse [kg]	1432	1634			
Anprallwinkel	19,7°	20°			
Anprallgeschwindigkeit [km/h]	110,8	110			
Norm. dynamische Durchbiegung D_N [m]	1,38	1,06	0,33	0,24	nein
Wirkungsbereich W_m [m]	1,5	1,40	0,10	0,25	ja
Wirkungsbereichs- klasse	W5	W5			
Kontaktstrecke [m]	12,3	15,00			
Anprallheftigkeits- stufe	A	A			
ASI	0,9	0,64	0,26	0,1	nein
THIV [km/h]	18,3	15,9	2,4	3	ja

4.7 Gesamtmodell M: TB81 an H4b Stahlschutzeinrichtung

Während der 38 t schwere Lkw in der Anprallprüfung mit einer Geschwindigkeit von 67,1 km/h unter einem Winkel von 20,5° an die Stahlschutzeinrichtung anprallt, wurden in der Simulation die genormten Anprallbedingung (65 km/h, 20°) verwendet. Der gewählte Anprallpunkt ist in der Anprallprüfung und der Simulation identisch (1,0 m nach Stoß 6/7).

Bild 40 zeigt simulierte Momentenaufnahmen des Anprallvorgangs des 38t-Lkw an die H4b Stahlschutzeinrichtung zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten (während des Anpralls bei 1,5 s und nach dem Abprall bei 3,5 s). Eine umfangreiche Beschreibung des Simulationsmodells, der Simulationsergebnisse sowie des Validierungsstandes findet sich im Deliverable D5.3 des EU-Projekts TRANSFORMERS [13].

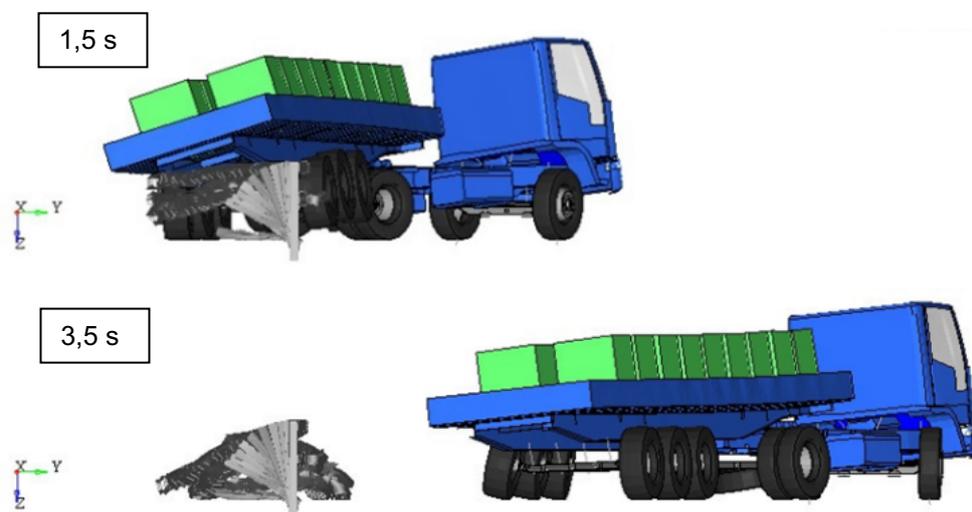


Bild 40: Anprallvorgang des 38t-Lkw an die H4b Stahlschutzeinrichtung in Heckansicht nach 1,5 s und 3,5 s

4.7.1 Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs

Das Fahrzeugverhalten in der Simulation ist bis zum Zeitpunkt des Heckaufpralls des Aufliegers (~0,8 s) mit der Anprallprüfung identisch. Die Zugmaschine prallt am System an und wird umgelenkt. Danach zeigen sich größere Unterschiede im Verhalten des Aufliegers und im Abprallwinkel der Zugmaschine. Während sich die Zugmaschine in der Simulation nach dem Umlenkvorgang schnell vom System löst, verbleibt sie in der Anprallprüfung am System. Dies ist wahrscheinlich dem in der Anprallprüfung beschädigten drucklosen linken Vorderreifen geschuldet und führt zu einer vergleichsweise langen Kontaktstrecke bis zum Stillstand des Fahrzeuges in der Endabsenkung. Der Auflieger in der Simulation zeigt im Vergleich zur Anprallprüfung eine stärkere Kippneigung über das System, die Ladefläche tordiert entsprechend. Sowohl das reale als auch das virtuelle Fahrzeug wird vom System zurückgehalten.

4.7.2 Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung

Bild 41 zeigt die Verformung der simulierten Stahlschutzeinrichtung nach 3,5 s. Aufgrund des unterschiedlichen Fahrzeugverhaltens sind diese nicht mit den Verformungen aus dem Anprallversuch vergleichbar und erstrecken sich in beiden Fällen auf einen größeren Bereich. Sowohl im Anprallversuch als auch in der Simulation tritt kein Versagen der Hauptlängselemente auf, wobei ein Lösen der Verbindung der virtuellen Holmprofile aufgrund der gewählten Modellierung nicht erfolgen konnte. Die Kastenprofile lösen sich – wie im Anprallversuch - planmäßig von den Pfosten, die im weiteren Anprallverlauf von den Reifen überfahren werden, und zu Boden sinken, nachdem sie den Lkw vollständig umgelenkt haben

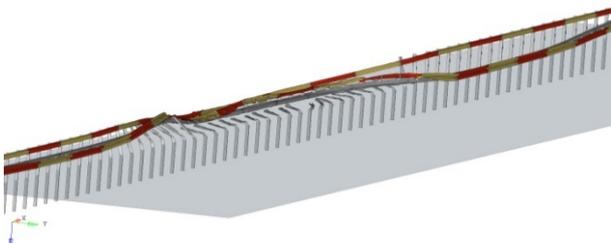


Bild 41: Verformungen der simulierten H4b-Stahlschutzeinrichtung nach 3,5s

Gesamtbewertung

Die in Tabelle 33 zusammengefassten Ergebnisse der Anprallprüfung und der Simulation zeigen, dass die Verformungen in der Simulation höhere Werte aufweisen und aufgrund der Abweichungen von der Anprallprüfung die strengen Validierungsanforderungen der EN 16303 nicht erfüllt werden.

Tabelle 33: Vergleich der Leistungsdaten der Anprallprüfung und Simulation (Gesamtmodell M)

	Prüfung 2004 7D 15 Super- Rail (Zwei- fach ³)	Simulation TB 81 Super-Rail	Abweichung Real-Virtuell	Grenzwert EN 16303	Grenzwert eingehalten
Prüfungstyp	TB 81	TB 81			
Schutzeinrichtung	Super-Rail zweifach	Super-Rail			
Fahrzeugmasse [kg]	ca. 38000	38000			
Anprallwinkel [°]	20,5	20			
Anprallgeschwindigkeit [km/h]	67,1	65			
dynamische Durchbiegung D_N [m]	2,0 (2,12 ⁴)	2,64	0,64	0,30	nein
Wirkungsbereich W_N [m]	2,3 (3,0 ⁵)	2,73	0,43	0,33	nein
Fahrzeugeindringung V_N [m]	2,5	4,0	1,5	0,55	nein
Wirkungsbereichsklasse	W7 (W8⁶)	W8			

Das Gesamtmodell M kann daher nicht als validiert bezeichnet werden. Belastbare Aussagen zur Prognose von Verformungswerten sind auf dieser Basis nicht möglich. Jedoch können numerische Untersuchungen und Parameteranalysen mit eingeschränkter Aussagekraft in Vergleichsstudien durchgeführt werden und Tendenzen hinsichtlich des Fahrzeug- und Systemverhaltens aufzeigen.

4.8 Gesamtmodell N: TB81 an H4b Ortbetonschutzwand

Die Anprallbedingungen in der realen Anprallprüfung (66,1 km/h, 20°) unterscheiden sich nur geringfügig von den in der Simulation angenommenen Normbedingungen (65 km/h, 20°). Der 38 t schwere Sattelzug prallt sowohl in der Anprallprüfung als auch in der Simulation 27 m vom Systemanfang entfernt gegen die Ortbetonschutzwand.

In Bild 42 ist der simulierte Anprallvorgang des 38t-Lkw an die H4b Ortbetonschutzwand mit zwei Momentaufnahmen dargestellt (während des Anpralls bei 1,5 s und nach dem Abprall bei 3,5 s). Detaillierte Informationen zum Simulationsmodell, zu den Simulationsergebnissen sowie zum Validierungsstandes können Deliverable D5.3 des EU-Projekts TRANSFORMERS [13] entnommen werden.

³ In der Prüfung 2004 7D 15 wurde die Super-Rail zweifach (parallel im Abstand von 2 Meter) aufgestellt. Da im gesamten Anprallprozess der Teil des Systems auf der gegenüberliegenden Seite nicht berührt wurde, kann von einer gleichen Wirkung bei einfacher Aufstellung ausgegangen werden.

⁴ Gemessen von der ursprünglichen Systemvorderkante bis zur ausgelenkten Systemvorderkante.

⁵ Bezogen auf die ursprüngliche Systemvorderkante, auf eine Dezimale gerundet.

⁶ Super-Rail zweifach

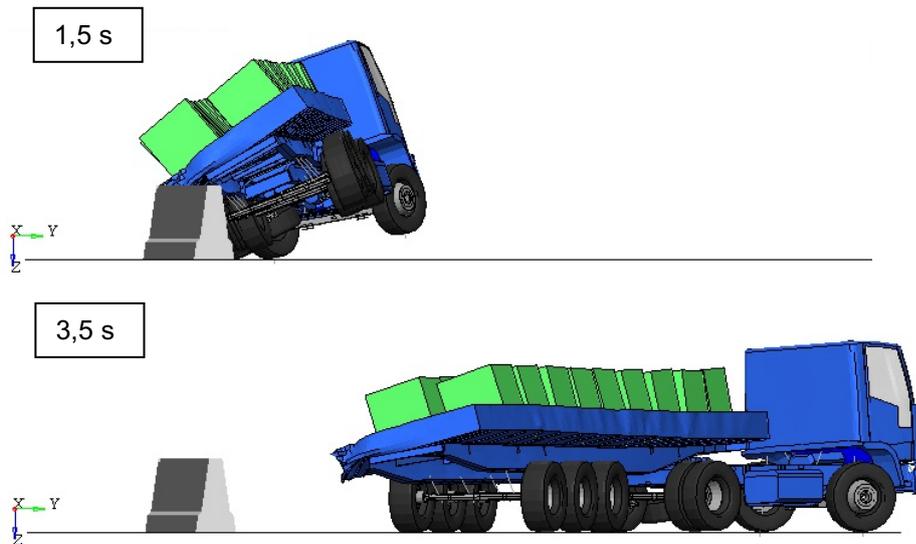


Bild 42: Anprallvorgang des 38t-Lkw an die H4b Ortbetonschutzwand in Heckansicht nach 1,5 s und 3,5 s

4.8.1 Beschädigungen und Verhalten des Fahrzeugs

Bis zu dem Zeitpunkt, an dem sich der vordere Teil der Ladefläche von der Schutzeinrichtung löst ($\sim 1,5$ s), zeigt das Simulationsmodell ein mit der Anprallprüfung vergleichbares Fahrzeugverhalten. Der Sattelzug wird von der Ortbetonschutzwand aufgehalten und umgelenkt. Sowohl Zugmaschine als auch Auflieger neigen sich während des Umlenkvorgangs zur Schutzeinrichtung, wobei die Reifen auf der Beifahrerseite zeitweise den Kontakt zum Boden verlieren. Nach dem Heckenprall des Aufliegers, der in der Simulation bei $\sim 0,8$ s und im Anprallversuch bei $\sim 0,9$ s erfolgt, zeigt das Simulationsmodell bei immer noch vergleichbarem Gesamtfahrzeugverhalten durch eine torsionsweichere Ladefläche eine etwas stärkere Kippneigung des Aufliegers, die nach einem maximalen Wert $\sim 1,15$ s im weiteren Verlauf wieder schnell abnimmt. Der zeitliche Versatz beim Heckenprall und die stärkere Torsion könnte z.B. durch eine unterschiedliche Beladungsverteilung in Anprallversuch (konzentriert auf die vorderen zwei Drittel) und Simulationsmodell (gleichmäßig verteilt) begründet sein. Am virtuellen und realen Fahrzeug wird die Frontverkleidung der Zugmaschine einschließlich der Scheinwerfer durch den Erstkontakt stark beschädigt. Ebenfalls zeigen sich vergleichbare Deformationen an der linken vorderen und hinteren Ecke der Ladefläche des Aufliegers. Die Deformation der Vorderradfelge und Karosserie unterhalb der Fahrerkabine tritt – wie auch der spätere Sekundäranprall des Fahrzeugs – nur in der realen Anprallprüfung auf. Der Sekundäranprall wird von der Simulation aufgrund einer entgegengesetzten Lenkbewegung der auf den Boden aufkommenden Reifen nicht abgebildet.

4.8.2 Beschädigungen und Verformung der Schutzeinrichtung

Die in der Simulation nach 3,5 s aufgetretenen Verformungen der Ortbetonschutzwand sind in Bild 43 dargestellt. Es zeigt einen zum realen Anprallversuch qualitativ vergleichbaren Verformungsverlauf mit leichten Beschädigungen des Kopfes der Ortbetonschutzwand durch den Auflieger. Die Verschiebungen der frei aufgestellten Ortbetonschutzwand treten sowohl aufgrund des Kontaktes mit der Zugmaschine als auch in deutlich größerem Ausmaß durch den Heckenprall mit dem Auflieger auf. Ein Gleichgewicht stellt sich aufgrund der Zugbandwirkung und der Reibungskräfte, die in der Simulation lediglich über den Ansatz von Reibbeiwerten erfasst werden, ein. Im realen Anprallversuch bilden sich im Beton Risse, die in der Simulation nicht als einzelne Risse abgebildet werden können. Ein Versagen des gesamten Betonquerschnitts oder der Bewehrung, die als diskrete Elemente mit Versagenskriterien im Simulationsmodell abgebildet ist, tritt weder in der Simulation noch im Anprallversuch auf.

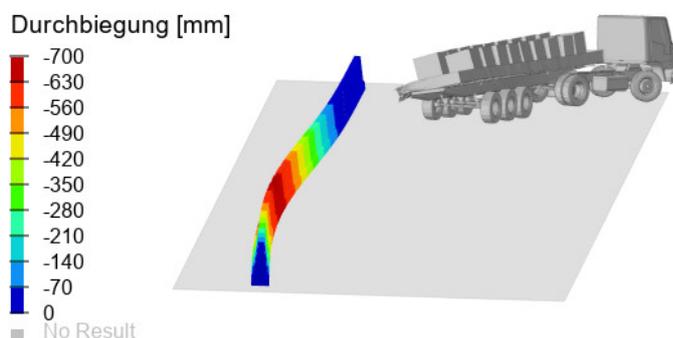


Bild 43: Durchbiegung der simulierten H4b-Ortbetonschutzwand nach 3,5s

Gesamtbewertung

In Tabelle 34 werden die Ergebnisse der Anprallprüfung und der Simulation gegenübergestellt.

Tabelle 34: Vergleich der Leistungsdaten der Anprallprüfung und Simulation (Gesamtmodell N)

	Prüfung 2002 7B 15	Simulation TB 81 Safetybaer	Abweichung Real-Virtuell	Grenzwert EN 16303	Grenzwert eingehalten
Prüfungstyp	TB 81	TB 81			
Schutzeinrichtung	Safetybaer	Safetybaer			
Fahrzeugmasse [kg]	ca. 38000	38000			
Anprallwinkel [°]	20	20			
Anprallgeschwindigkeit [km/h]	66,1	65			
Dynamische Durchbiegung D_m [m]	0,99	0,65	0,34		nein
Wirkungsbereich W_m [m]	1,6	1,24	0,36		nein
Fahrzeugeindringung V_{IN} [m]	2,4	3,14	0,74		nein
Wirkungsbereichsklasse	W5	W4			

In der Simulation werden für die dynamische Durchbiegung und den Wirkungsbereich kleinere und für die Fahrzeugeindringung größere Werte als in der Anprallprüfung ermittelt, was hinsichtlich der Bewertung des Fahrzeugüberschlagrisikos den ungünstigsten Fall darstellt. Die in DIN EN 16303 als Validierungsanforderungen geltenden Toleranzen werden im vorliegenden Fall nicht eingehalten. Aus diesem Grund eignet sich das Gesamtmodell N nicht für Prognosen von Verformungswerten. Beim Einsatz in Parameterstudien sind mit diesem Modell daher ausschließlich qualitative, vergleichende Aussagen möglich.

5 Simulationsbasierte Studien

Mit den im vorherigen Abschnitt vorgestellten Gesamtmodellen wurden Simulationsstudien durchgeführt, um verkehrssicherheitstechnische Fragestellungen im Bereich der Fahrzeugrückhaltesysteme zu beantworten. Es werden insgesamt 13 Simulationsstudien vorgestellt. An diesen Beispielen soll unter anderem gezeigt werden, wie gut sich die Simulation für derartige Untersuchungen eignet bzw. sie unterstützend begleiten kann. Es soll auch deutlich gemacht werden, dass mit einem vorhandenen Gesamtmodell und der dazugehörigen Validierung ein breites Spektrum neuer Fragestellungen relativ zeit- und kostengünstig beantwortet werden kann. Diese Simulationsstudien haben nicht den Anspruch präziser und hochbelastbarer Vorhersagen. Vielmehr können die präsentierten Ergebnisse als Anregungen und Anhaltspunkte für zukünftige Studien mit weiterentwickelten Simulationsmodellen dienen. Für einen höheren Präzisionsanspruch bedarf es bei den Modellen (wie in Abschnitt 4 beschrieben) einer verbesserten numerischen Stabilität. Die Simulationsmodelle, mit denen diese Studien durchgeführt wurden, sind in Abschnitt 3.3 beschrieben. Ihr Validierungsgrad, der für die hier behandelten Fragestellungen im Forschungsbereich ausreicht, ist Abschnitt 4 dokumentiert.

Die durchgeführten Simulationsstudien werden - je nach Art der Fragestellung - in Gruppen zusammengefasst.

Die erste Gruppe besteht aus Parameterstudien, deren Aufgabe es ist, Anprallparameter zu variieren, und mögliche Auswirkungen auf die Leistungsdaten der Schutzeinrichtung unter geänderten Anprallbedingungen aufzuzeigen.

Die zunehmende Verwendung von Simulation in der Zertifizierung ist Motivation für die zweite Gruppe von Simulationsstudien. Sie befasst sich mit der Übertragbarkeit der Leistungsdaten von einem geprüften System auf ein ungeprüftes System mithilfe der Simulation (Modifikation). Die Vorgehensweise bei einer Modifikation von zertifizierten (CE-gekennzeichneten) Fahrzeug-Rückhaltesystemen ist in DIN EN 1317-5 [2] geregelt.

Die dritte Gruppe befasst sich mit der Fragestellung, inwieweit die Simulation geeignet ist, ein erhöhtes Aufhaltevermögen des Fahrzeug-Rückhaltesystems, dessen bisherige Aufhaltstufe bereits durch reale Anprallprüfungen nachgewiesen wurde, einzuschätzen oder nachzuweisen.

Nachfolgend werden die Forschungsinhalte der einzelnen Simulationsstudien aufgelistet und in der Tabelle 35 den eingesetzten Gesamtmodellen zugeordnet.

Gruppe 1 (5.1 bis 5.7, 5.13): Parameterstudien:

- Unterschiedliche Anprallbedingungen (Anprallpunkt, -winkel)
- Einbautoleranzen und Grenzzustände der Leistungsfähigkeit hinsichtlich Einbauhöhe und Neigung von Schutzeinrichtungen, Abschätzung von Sicherheitsreserven
- Unterschiedliche Höhen des Beladungsschwerpunktes bei einem Lkw-Anprall

Gruppe 2 (5.9, 5.12): Übertragung von Versuchsergebnissen unterstützt durch Simulationsergebnisse:

- für den Anschluss unterschiedlicher Schutzeinrichtungen an Übergangskonstruktionen
- für die Vervollständigung der Leistungsmatrix für verkürzte EDSP 2.0 (Übertragung TB11)

Gruppe 3 (5.8, 5.10, 5.11): Beispiele für die Prognose des Fahrzeug- und Systemverhaltens bei einem Anprall mit Fahrzeugtypen außerhalb der Norm:

- Lieferwagen an EDSP 2.0
- TB42 an ESP 2.0
- TB81 an EDSP 2.0

Tabelle 35: Übersicht der Studien und verwendete Modelle (Gesamtmodelle A-N aus Abschnitt 4)

Studien (verwendete Gesamtmodelle)	Pkw mit 900 kg	Pkw mit 1500 kg	Lieferwagen mit 2200 kg	Lkw mit 10 t	Sattelzug mit 38 t
ESP 4.0	1,3,5 (A)				
ESP 2.0		7 (C)		8 (D)	
EDSP 2.0 (verkürzte Aufbaulänge)	9 (E)		10 (F)	2,4,6 (G)	11 (L)
Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0	12 (H-K)				
Übergang ESP 2.0 - EDSP 2.0					
H4b Stahlschutzeinrichtung					13 (M, N)
H4b Ortbetonschutzwand					

5.1 Parameterstudie: Variation Anprallpunkt an der ESP 4.0

Die Prüfbedingungen der Anprallprüfung für Schutzeinrichtungen werden in DIN EN 1317-2:2010 [2] geregelt. Gemäß dieser Norm liegt der Anprallpunkt in der Regel bei etwa einem Drittel der Prüflänge. Folgende Fragestellungen ergeben sich hierdurch: Ist der Anprallpunkt so gewählt, dass die Prüfung in der Lage ist, die maximale Belastung der Schutzeinrichtung festzustellen? Werden so etwaige Schwachpunkte der konstruktiven Ausführung in den Vordergrund gestellt?

Basierend auf den Erfahrungen aus der Durchführung und Begleitung zahlreicher realer Anprallversuche wird erwartet, dass die Lage des Anprallpunkts die Leistungsfähigkeit von Schutzeinrichtungen (Wirkungsbereich, Anprallheftigkeit usw.) beeinflussen könnte. Man erwartet die größte Insassenbelastung bei einem Anprall in unmittelbarer Nähe zum Pfosten, den größten Wirkungsbereich bei einem Anprall in der Mitte zwischen den Pfosten. In dieser Studie wird daher anhand des Systems ESP 4.0 untersucht, ob und in welcher Größenordnung die Lage des Anprallpunkts Einfluss auf das Versuchsergebnis und damit die nachgewiesene Leistungsfähigkeit der ausgewählten, bzw. vergleichbarer Schutzeinrichtungen hat.

Vorgehensweise

Während alle anderen Versuchsparameter konstant gehalten werden, wird die relative Position des Fahrzeuges und der Schutzeinrichtung eines Referenzmodells (Gesamtmodell A) so variiert, dass der Abstand des Anprallpunktes zu den Pfosten unterschiedliche Werte annimmt. Insbesondere sind die Punkte von Interesse, bei denen ein Extremwert der Durchbiegung, bzw. der im Fahrzeug auftretenden Beschleunigung zu erwarten ist. Zudem werden auch Punkte im Abstand von einem Meter, bzw. unmittelbar vor und hinter einem Pfosten einem virtuellen Test unterzogen.

In der Tabelle 36 sind die Positionen relativ zu den Pfosten 3 und 4 aufgelistet (Fall 0 bis 5 und das Referenzmodell) und im Bild 45 skizziert.

Tabelle 36: Simulationsmatrix der Studie 1

Modell	Anprallpunkt
Fall 0	0,13 m (gering) nach Pfosten 3
Referenz	0,83 m nach Pfosten 3
Fall 1	1,83 m nach Pfosten 3
Fall 2	2,00 m nach Pfosten 3 (mittig des Holms)
Fall 3	2,83 m nach Pfosten 3
Fall 4	3,83 m nach Pfosten 3 (quasi- Anprall an Pfosten)
Fall 5	0,13 m (gering) nach Pfosten 4

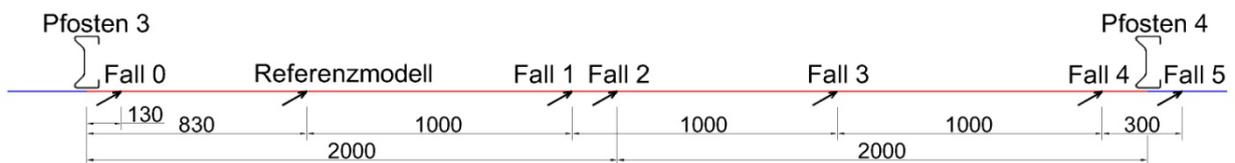


Bild 44: Gewählte Anprallpunkte für die Simulationsstudie und für das Referenzmodell. (Einheit: mm)

Ergebnisse

Die Variation des Anprallpunkts hat kaum Einfluss auf den Ablauf des virtuellen Anprallvorgangs bezüglich des Fahrzeugverhaltens. Die Abhängigkeit des Wirkungsbereiches und der Anprallheftigkeit sind im Diagramm in den Bildern 45 bzw. 46 dargestellt.

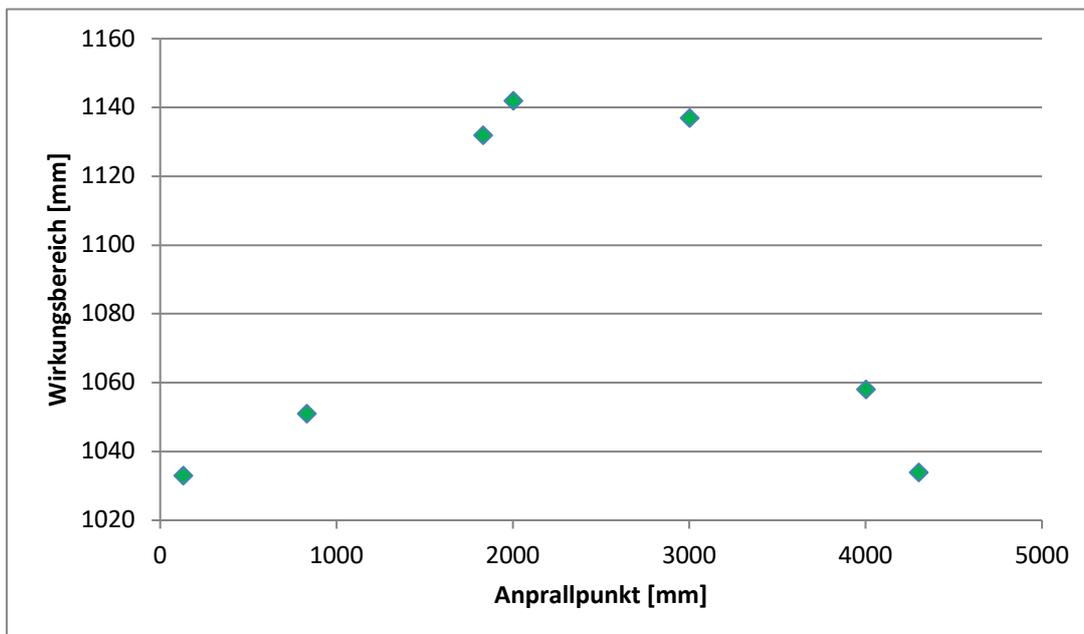


Bild 45: Abhängigkeit von Anprallpunkt und Wirkungsbereich. Die korrespondierenden Entfernungsangaben von dem Pfosten der Schutzeinrichtung sind in Bild 44 dargestellt.

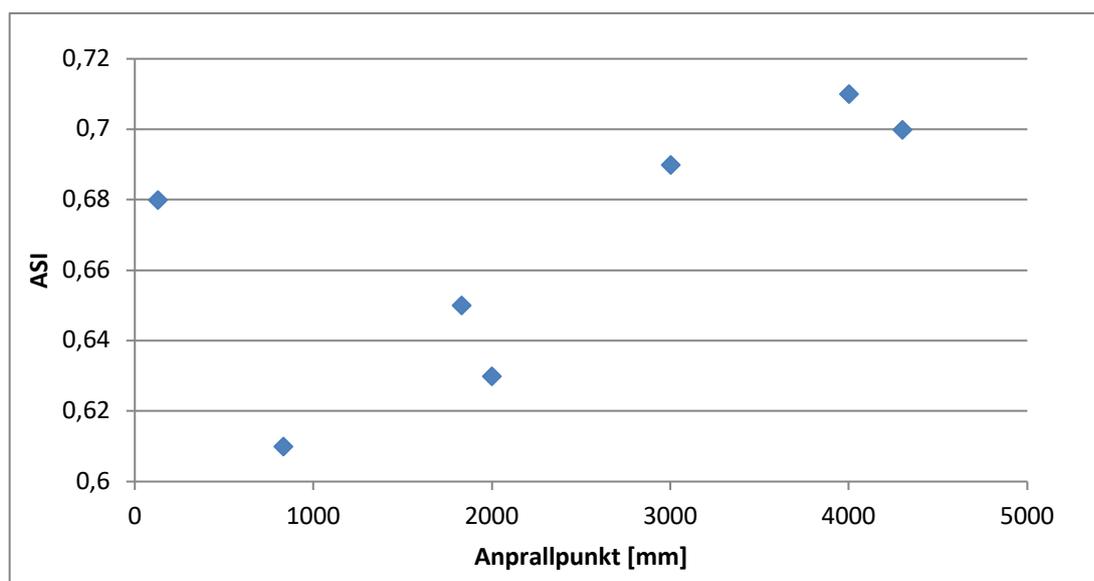


Bild 46: Abhängigkeit der Anprallheftigkeit ASI vom Anprallpunkt. Die korrespondierenden Entfernungsangaben von dem Pfosten der Schutzeinrichtung sind in Bild 44 dargestellt.

Tabelle 37 zeigt die Leistungsdaten in Abhängigkeit der verschiedenen Anprallpunkte. Die Fälle 0, 4 und 5 repräsentieren den Anprall am Pfosten und der Fall 1 und 2 in der Mitte zwischen den Pfosten. Einen zusätzlichen Anprallpunkt zwischen den beiden Extremen wird durch den Fall 3 repräsentiert.

Tabelle 37: Ergebnisse der Simulationsläufe unter verschiedenen Anprallwinkeln mit detaillierten Angaben zu Fahrzeugverhalten, Verformung der Schutzeinrichtung und Anprallheftigkeit.

Kriterien		Fall 0	Referenz	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5
Simulationsbedingungen	Anprallgeschwindigkeit [km/h]	100						
	Anprallwinkel	20°						
	Anprallpunkt [mm]	130	830	1830	2000	3000	4000	4300
	Abprallgeschwindigkeit [km/h] (bei Zeitpunkt [s])	85,6 (0,53)	81,3 (0,57)	79,7 (0,60)	81,6 (0,61)	81,0 (0,58)	84,5 (0,50)	84,7 (0,53)
Fahrzeugverhalten	Überschlag	Nein						
	Fahrzeug aufgehalten	Ja						
	Box-Kriterium	Ja						
	Fahrweg der Räder	Ja						
Verformung der Schutzeinrichtung	Dynamische Durchbiegung D_m [mm]	1009	1038	1114	1128	1099	1001	1013
	Wirkungsbereich W_m [mm]	1031	1051	1132	1142	1137	1058	1034
	Kontaktstrecke [m]	11,2	11,0	11,3	10,3	11,2	12,2	11,9
	Verschiebung Endverankerung (Längsdehnung) [mm]	26,1/ 26,1/ 23,0/ 23,0	25,2/ 25,2/ 21,6/ 21,6	26,8/ 26,8/ 22,3/ 22,3	26,7/ 26,7/ 22,6/ 22,6	26,8/ 26,8/ 23,9/ 23,9	25,1/ 25,1/ 23,6/ 23,6	25,6/ 25,6/ 23,5/ 23,5
Anprallheftigkeit	ASI-EN 1317 1: 1998 [g]	0,68	0,61	0,65	0,63	0,69	0,71	0,70
	ASI-EN 1317 1: 2010 [g]	0,66	0,56	0,64	0,60	0,61	0,66	0,66
	Zeitpunkt ASI: 1998/2010 [s]	0,21/ 0,24	0,21/ 0,07	0,14/ 0,15	0,12/ 0,15	0,26/ 0,28	0,26/ 0,27	0,21/ 0,24
	THIV [km/h]	16,64	17,75	17,24	17,38	18,27	17,98	16,55
	Zeitpunkt THIV [s]	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14

Es zeigt sich, dass die größten Verformungen der Schutzeinrichtung in der Mitte zwischen den Pfosten bei dem Fall 1 und 2 auftreten. Die Erhöhung beträgt etwa 10 % (bezogen auf die in den Fällen 0 und 5 ermittelten Minimalwerte) und ist mit den bisherigen Erfahrungen aus realen Anprallversuchen vergleichbar, dass der Anprall in Feldmitte mit gleichem Abstand zu zwei Pfosten zur größten Systemverformung führt.

Auch können die Erfahrungen bezüglich der Anprallheftigkeit aus realen Anprallversuchen bestätigt werden, dass ein Anprallpunkt in der Nähe des Pfostens zu höheren Werten für den ASI führt als ein Anprall in Feldmitte. Die höchsten ASI-Werte konnten bei den Fällen 4 und 5 gemessen werden, auch der Fall 0 bestätigt diese Tendenz. Insgesamt ergibt sich eine Schwankung von ca. 15 %.

5.2 Variation Anprallwinkel an EDSP 2.0

Der maximale Anprallwinkel eines Fahrzeugs, bei einer Anprallprüfung nach DIN EN 1317-2, beträgt 20°. Dieser Anprallwinkel soll typische reale Anprallszenarien abbilden und wurde von der Normungsgruppe festgelegt. Nicht jeder reale Anprall findet aber unter einem Winkel von bis zu 20° statt, so dass sich die Frage stellt, wie sich die nach Normbedingungen geprüften Schutzeinrichtungen bei abweichenden Winkeln verhalten. In dem BAST-Bericht V192 „Anprall von Pkw unter großen Winkeln gegen

Fahrzeugrückhaltesystem“ [15] wurde bereits über eine Untersuchung mit Hilfe realer Anprallprüfungen berichtet, wobei der Anprall eines 900 kg Fahrzeuges unter einem Winkel von 45° mit der Geschwindigkeit von 100 km/h an eine Stahl- und eine Betonschutzeinrichtung mit höherem Aufhaltevermögen untersucht wurde. In den Anprallversuchen wurde festgestellt, dass die 900 kg Fahrzeuge auch bei einem Anprallwinkel von 45° aufgehalten werden, aber eine enorme Insassenbelastung auftritt. Während bei den Versuchen an den Schutzeinrichtungen mit höherem Aufhaltevermögen für den Einsatz im Mittelstreifen insbesondere die Belastung für PKW-Insassen im Vordergrund der Untersuchung stand, soll hier nun eine Schutzeinrichtung mittleren Aufhaltevermögens, die typischerweise am Fahrbahnrand vorhanden ist, hinsichtlich ihrer Rückhaltefähigkeit bei einem LKW-Anprall unter veränderten Winkeln untersucht werden. Diese Schutzeinrichtung hat ihr Leistungsvermögen nach Norm bei einem 10t-LKW-Anprall unter 15° nachgewiesen.

Der Vorteil der Simulation liegt darin, dass eine ganze Versuchsreihe durchlaufen werden kann, sodass der Grenzfall, bei dem die Schutzeinrichtung noch funktionsfähig ist, besser angenähert werden kann. Dazu wird in dieser Studie das Gesamtmodell G aus Abschnitt 4.4 als Basis dienen, und die Änderung der Leistungsdaten des Fahrzeugrückhaltesystems unter Variation des Anprallwinkels zwischen 15° und 22,5° von einem 10 t schweren Fahrzeug, welches mit der Geschwindigkeit von 72 km/h an eine Stahlschutzeinrichtung anprallt, untersucht.

Vorgehensweise

Die Anprallenergie wird nach der folgenden allgemeinen Formel berechnet:

$$E = \frac{1}{2} m(v \cdot \sin \theta)^2$$

mit: E - Anprallenergie [J];

m - Gesamtmasse des Fahrzeugs [kg];

v - Anprallgeschwindigkeit [m/s];

θ - Anprallwinkel [°].

Der im Referenzmodell G vorgegebene Anprallwinkel wird in einem Intervall von 2,5° schrittweise erhöht, bis die Schutzeinrichtung das Fahrzeug nicht mehr aufhalten kann. Dies geschieht im Fall 3 bei 22,5°. Die Simulationsergebnisse und die Leistungsdaten werden daher nur zu den Simulationsläufen Fall 1 bis Fall 2 und des Referenzmodells dargestellt.

Tabelle 38 zeigt die Leistungsdaten in Abhängigkeit der verschiedenen Anprallpunkte.

Tabelle 38: Ergebnisse der Simulationsläufe unter verschiedenen Anprallwinkeln mit detaillierten Angaben zu Fahrzeugverhalten, Verformung der Schutzeinrichtung und Anprallheftigkeit.

Kriterien		Referenz	Fall 1	Fall 2
Simulations- bedingungen	Anprallgeschwindigkeit [km/h]	70		
	Anprallwinkel [°]	15	17,5	20
	Anprallpunkt	2,20 vor Stoß 3/4		
	Abprallgeschwindigkeit [km/h] (bei Zeitpunkt [s])	53,6 (1,33)	51,1 (1,49)	46,4 (1,97)
Fahrzeug- verhalten	Abheben	Ja	Ja	Ja
	Überschlag	Nein	Nein	Nein
	Fahrzeug aufhalten	Ja	Ja	Ja
	Box-Kriterium	Ja	Ja	Ja
Verformung der Schutzeinrichtung	Dynamische Durchbiegung D_m [m]*	1,73	1,94	2,20
	Wirkungsbereich W_m [m]*	1,94	1,95	2,20
	Fahrzeugeindringung	2,37	2,53	3,21
	Kontaktstrecke [m]	18,42	20,31	26,5

Das Bild 48 zeigt den Anprallvorgang des TB 42 Referenzmodells (Gesamtmodell G) und die Simulationsläufe unter geändertem Anprallwinkeln, 20° und 22,5°. Der Fall 1 mit einem Anprallwinkel von 17,5° ist ähnlich, wie der Fall 2 und wird daher nicht nochmal dargestellt. Es fällt auf, dass die Abstandshalter zwischen dem Holm und dem Pfosten sich im Grenzfall nicht so aufstellen wie bei 15°, sondern heruntergedrückt werden, wodurch die Rückhaltefähigkeit des Systems vermindert wird.

Bei dem Simulationslauf mit einem Anprallwinkel von 22,5° (Fall 3) zeigt sich, dass das Fahrzeug beim Anprall unter diesem oder höheren Winkeln umzukippen droht. Der Anprall unter einem Anprallwinkel von 22,5° (gegenüber 20°) entspricht nach obiger Formel einer Energieerhöhung um 25 %. Hierbei wird die Schutzeinrichtung überfahren, und die Räder verlieren den Kontakt zur Fahrbahn. Weiterhin fällt auf, dass die Fahrzeugeindringung überproportional mit dem Anprallwinkel zunimmt.

Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass der Grenzwinkel für einen Anprall, bei dem das Fahrzeug, entsprechend eines TB 42 Anprallversuchs, gerade noch aufgehalten wird, wahrscheinlich zwischen 20° und 22,5° liegt. Die Fahrzeugeindringung erhöht sich mit steigendem Anprallwinkel überproportional. Die Genauigkeit dieser Aussage ist relativ zum Validierungsstand des Gesamtmodells G zu betrachten.

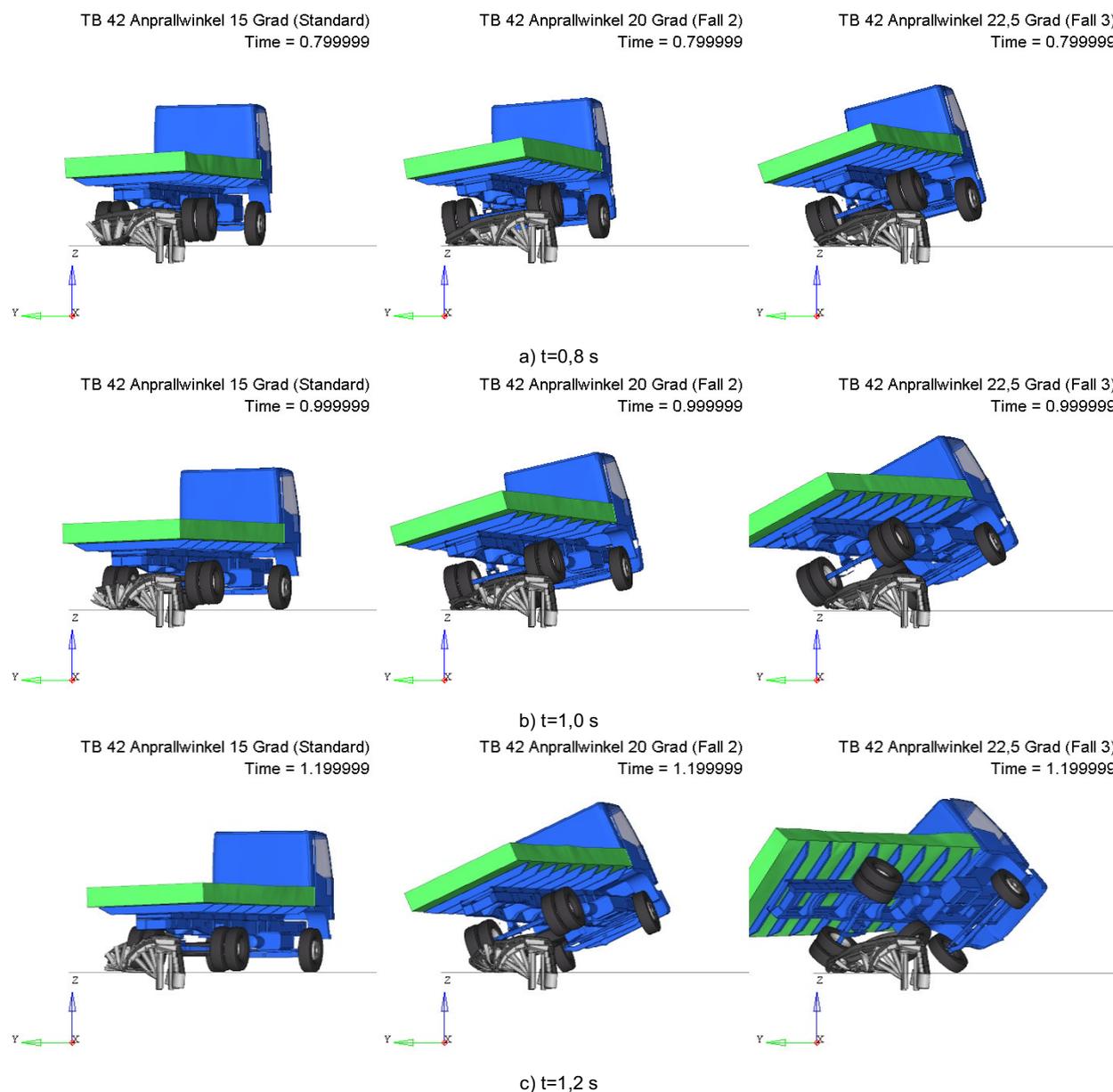


Bild 47 Variation des Anprallwinkels unter gleichen Bedingungen, wie TB 42. Dargestellt ist der Anprallvorgang unter 15° (links) und zum Vergleich die Winkel 20° (Mitte) und 22,5° (rechts). Die zeitliche Entwicklung schreitet von oben nach unten fort.

5.3 Variation Höhe ESP 4.0

Die Standard-Schutzeinrichtungen in Deutschland, wie ESP oder EDSP haben eine Sollhöhe von 0,75 m über Fahrbahnoberkante (FOK) und werden im Regelfall in dieser Höhe entlang der Straßen errichtet. Zulässige Abweichungen der Einbauhöhe sind in den ZTV FRS [16] geregelt. Danach darf die Höhe einer Schutzeinrichtung von der Sollhöhe nicht mehr als 3 cm abweichen. Doch auch während der Nutzungsdauer kann sich die Einbauhöhe der Schutzeinrichtungen, z.B. durch Instandsetzung der Fahrbahn im Hocheinbau ohne Anpassung der Schutzeinrichtungen oder Setzungen im Bankettbereich, verändern.

Für einen Fahrzeuganprall bergen sowohl die Erhöhung als auch die Erniedrigung von Schutzeinrichtungen Risiken. Bei zu niedrig positionierten Stahlschutzeinrichtungen besteht die Gefahr in der Überfahrt des Systems, während eine Erhöhung zur Unterfahrt und somit zu erheblichen Schäden am Fahrzeug und Gefahren für die Insassen führen kann. Zudem wird durch einen erhöhten Einbau die dynamische Durchbiegung erhöht, da durch die erhöhte Länge der Pfosten über der Einspannung im Boden bei gleicher Kräfteinwirkung ein größeres Drehmoment wirken kann.

Mit dieser Studie sollen funktionale Grenzen und Sicherheitsreserven ermittelt werden, bei einem Anprall eines kleinen Pkw an die ESP 4.0 bei unterschiedlichen Einbauhöhen. Dazu wird die Einbauhöhe der Schutzeinrichtung schrittweise erhöht und erniedrigt, mit dem Ziel Extremsituationen zu finden, die zu einer Über- oder Unterfahrt führen.

Vorgehensweise

Die Auswirkungen des Anpralls infolge eines erhöhten bzw. erniedrigten Einbaus wurden virtuell untersucht. Die Auswirkungen auf die Leistungsdaten einer Schutzeinrichtung aus Stahl bei einer Erhöhung oder Erniedrigung des Systems, ist erwartungsgemäß umso größer, je größer der Pfostenabstand ist. Der Unterschied der Leistungsdaten wird daher bei einer Schutzeinrichtung mit großem Pfostenabstand, wie der ESP 4.0, am besten sichtbar. Das Referenzmodell (aus Gesamtmodell A), wird dahingehend verändert, dass die Einbauhöhe schrittweise variiert wird (Tabelle 39). Einerseits werden die Systemgrenzen ermittelt, in dem die Einbauhöhe erhöht bzw. erniedrigt wird, bis eine Unter- bzw. Überfahrt zu sehen ist. Andererseits soll die Streuung der Größe des Wirkungsbereiches erfasst werden, indem die Höhe in einem kleinen Bereich von 5 mm variiert wird.

Tabelle 39: Untersuchte Fälle der Studie 3 (Parameterstudie Variation Höhe ESP 4.0)

ESP 4.0 Variation der Höhe		
Modell	Systemhöhe [cm]	Höhenabweichung [cm]
Referenzmodell (Gesamtmodell A)	75	0
Erhöhte Einbauhöhe	76	+1
	77	+2
	78	+3
	85	+10
	90	+15
	95	+20
Erniedrigte Einbauhöhe	74	-1
	73	-2
	72	-3
	65	-10
	60	-15
	55	-20

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation bez. des Wirkungsbereichs sind in Bild 48 grafisch dargestellt. Ein einfacher Zusammenhang ist nicht zu erkennen, aber es gibt einen klaren Trend zu erhöhten Wirkungsbereichen bei hohen Einbauhöhen, wie es zu erwarten war. Bei einer geringfügigen Abweichung um 3 cm ist eine Streuung des Wirkungsbereiches zu sehen. Diese ist verhältnismäßig groß, denn die Einspannhöhe der Pfosten variiert mit der Änderung der Höhe der gesamten Schutzeinrichtung. Diese Modellierung wurde gewählt, um eine grobe Abschätzung zu erhalten. In der Simulation zeigt sich, dass das Fahrzeug einer TB 11 Prüfung nach DIN EN 1317 von einer ESP 4.0 Schutzeinrichtung, die niedriger als 65 cm oder höher als 90 cm eingebaut wird, nicht aufgehalten würde. Bei einer Abweichung der Einbauhöhe innerhalb dieser Grenzen kann sich der Wirkungsbereich um rund 4 cm bis 6 cm erhöhen. Eine Abweichung der Einbauhöhe um 3 cm, wie sie in der ZTV FRS [16] geregelt ist, hat für die untersuchte Schutzeinrichtung keine Abweichungen des Wirkungsbereiches innerhalb der Streugrenzen zur Folge.

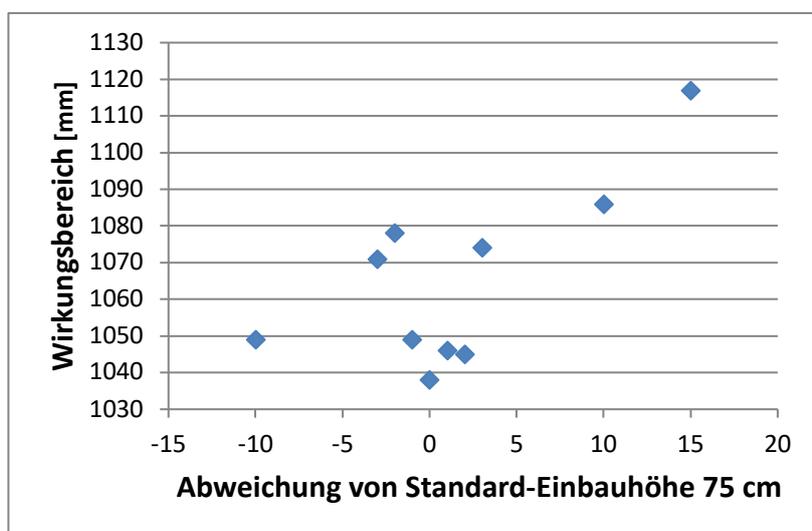


Bild 48: Durch Simulation ermittelte Wirkungsbereiche in Abhängigkeit der Einbauhöhe der Schutzeinrichtung. Für eine niedrigere Einbauhöhe als 65 cm, bzw. höher als 90 cm wird das Fahrzeug gemäß dieser Simulation von der untersuchten Schutzeinrichtung nicht aufgehalten.

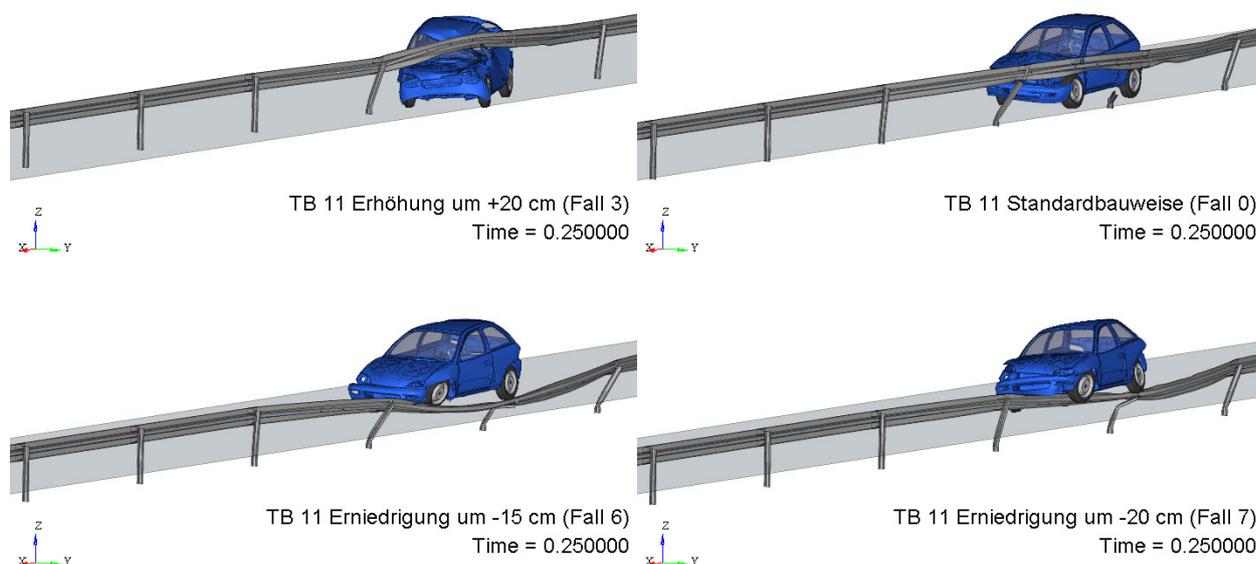


Bild 49: Zusätzlich zum Referenzmodell sind hier die Fälle dargestellt, bei denen die Schutzeinrichtung entweder zu hoch oder zu niedrig eingebaut war, um das Fahrzeug aufhalten zu können.

5.4 Variation Höhe EDSP 2.0

Analog zu der Studie 5.3 wird hier zusätzlich untersucht, welchen Einfluss eine Höhenänderung an einer typischen Stahlschutzeinrichtung der Aufhaltestufe H1 auf den Ablauf eines Anpralls eines 10-t-Lkw hat. Im Fokus steht hierbei die Fragestellung, bei welcher Einbauhöhe mit einem Umkippen des Fahrzeuges, oder einem Überrollen des Fahrzeugs über die Schutzeinrichtung zu rechnen ist.

Vorgehensweise

Es wurde ein Anprall eines 10-t-Lkw an die Stahlschutzeinrichtung EDSP 2.0 (verkürzte Aufbauhöhe) mit der Aufhaltestufe H1 verwendet (Gesamtmodell G). Die Anprallparameter Geschwindigkeit und Winkel, wurden unverändert übernommen. Ein Unterfahren des Systems ist im Fall eines Lkw-Anpralls nicht möglich. Wie die nachfolgende Tabelle zeigt, werden daher gegenüber der Solleinbauhöhe verringerte Einbauhöhen in 5 cm Schritten untersucht, solange die Schutzeinrichtung nicht überfahren wird, oder ein Umkippen des Fahrzeuges eintritt.

Tabelle 40: Untersuchte Einbauhöhen der EDSP 2.0

TB 42 EDSP 2.0 Variation der Höhe			
Modell		Systemhöhe [cm]	Höhenabweichung [cm]
Referenzmodell	Fall 0	75	0
Einbauhöhe	Fall 1	65	- 10
	Fall 2	60	- 15
	Fall 3	55	- 20
	Fall 4	50	- 25
	Fall 5	45	- 30
	Fall 6	40	- 35

Ergebnisse

Das Bild 50 zeigt die Simulationsergebnisse unter dem Einfluss der Variation der Höhe der EDSP 2.0 beim Anprall des TB 42. Bis zu einer Reduzierung der Höhe der EDSP um 30 cm gegenüber der Soll-Einbauhöhe wird der Lkw in den Simulationen aufgehalten und umgelenkt, bei einer noch niedrigeren Höhe fährt der Lkw auf die Schutzeinrichtung und kippt dann um.

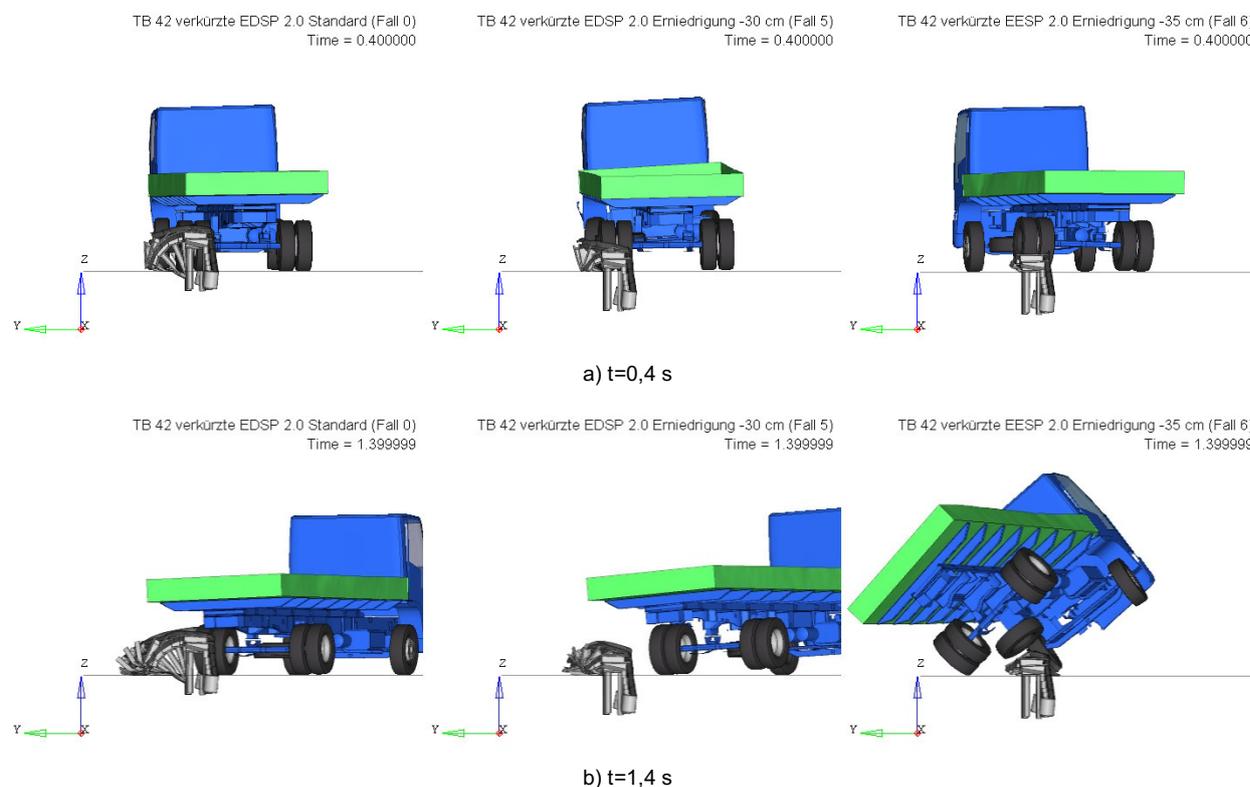


Bild 50: Die Anprallvorgänge bei der verringerten Höhe der EDSP 2.0. Dargestellt sind das Referenzmodell und der Extremfall, bei dem die Schutzeinrichtung überfahren wird. Dies geschieht bei Einbauhöhen niedriger als 45 cm (Fall 6).

Die Simulationsstudien zeigen, dass die EDSP 2.0 auch bei einer Höhe, die mit 45 cm über FOK deutlich unter der Sollhöhe von 75 cm liegt, gerade noch in der Lage ist, den Lkw aufzuhalten. Gegenüber den Ergebnissen der Studie 3 scheinen hier die Spielräume für eine Höhenreduzierung ohne wesentlichen Einfluss auf das System- und Fahrzeugverhalten größer zu sein. Dies könnte mit der Wirkungsweise der EDSP im Anprallfall zusammenhängen, bei der es aufgrund der Funktionsweise der Abstandhalter nicht so einfach zu einem Herunterdrücken des Schutzplankenholms kommt. Eine Übertragung der ermittelten Grenzwerte auf reale Anprallsituationen sollte jedoch nicht ohne weitere Untersuchungen, z.B. für andere Fahrzeugtypen vorgenommen werden.

5.5 Variation Neigung ESP 4.0

Wie eine Höhenabweichung von Schutzeinrichtungen, die in den vorausgehenden Studien untersucht wurden, ist auch das Auftreten einer Neigung der Pfosten während der Lebensdauer möglich. Die maximale Abweichung von der lotrechten Einrammung soll laut ZTV FRS [16] nicht mehr als 10 % (ca. 6°) betragen. Jedoch könnte es infolge eines vorherigen leichten Anpralls oder witterungsbedingten Veränderungen im Boden zu einer zusätzlichen Neigung kommen. Eine geneigte Stellung von Schutzeinrichtungen verringert ihre effektive Höhe, was eine Beeinflussung der Leistungsdaten nach sich ziehen könnte, wie in der Studie im Abschnitt 5.3 schon festgestellt wurde.

Vorgehensweise

Für die Untersuchung des Einflusses der Neigung auf die Leistungsdaten dient als Referenzmodell (s. Tabelle 41, Fall 0) ein 900 kg Pkw Anprall an der ESP 4.0 (Gesamtmodell A). Das Gesamtmodell ohne Neigung wird als Referenzmodell betrachtet. In den darauffolgenden Durchläufen wird der gleiche Anprall simuliert, wobei die Schutzeinrichtung geneigt eingebaut ist. Die Neigung wird in 10° Schritten erhöht (s. Tabelle 41) bis eine Überfahrt beobachtet wird.

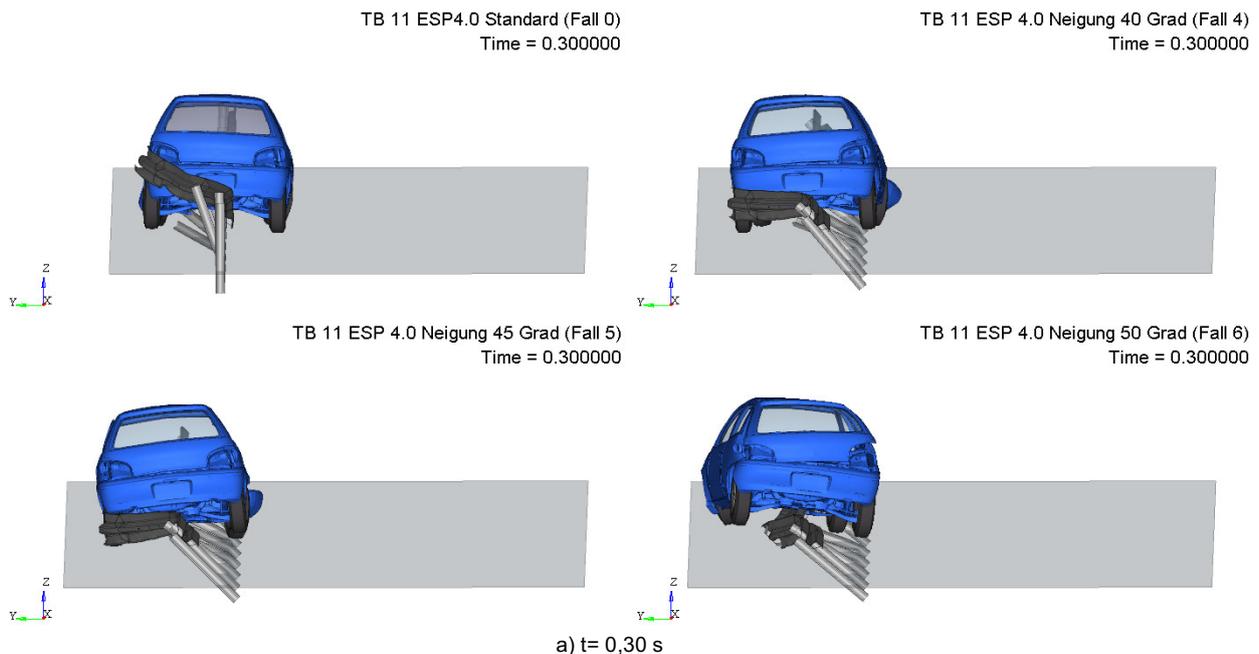
Tabelle 41: Untersuchte Fälle in der Studie 5

TB 11 ESP 4.0 mit Neigung			
Modell		Neigung	Effektive Systemhöhe [cm]
Referenzmodell (Gesamtmodell A)	Fall 0	0°	75
	Mit Neigung		
	Fall 1	10°	74
	Fall 2	20°	70,5
	Fall 3	30°	65
	Fall 4	40°	57
	Fall 5	45°	53
	Fall 6	50°	48

Ergebnisse

In Bild 51 sind die Momentaufnahmen der virtuellen Anprallvorgänge bei 0,30 s, 0,45 s und 0,75 s nach dem ersten Anprall mit dem System für die in der Tabelle 41 aufgelisteten Fälle 4, 5, 6 und das Referenzmodell (Fall 0) dargestellt.

Im Verlauf der Simulation mit der um 50° geneigten Schutzeinrichtung (Fall 6) wird das System überfahren. Dies entspricht einer extremen Neigung und einer effektiven Systemhöhe von ca. 48 cm. Dieses Ergebnis ist insofern überraschend, da in der Studie 3 (Abschn. 5.3) eine für das Aufhalten des Fahrzeuges minimale Systemhöhe von 65 cm festgestellt wurde.



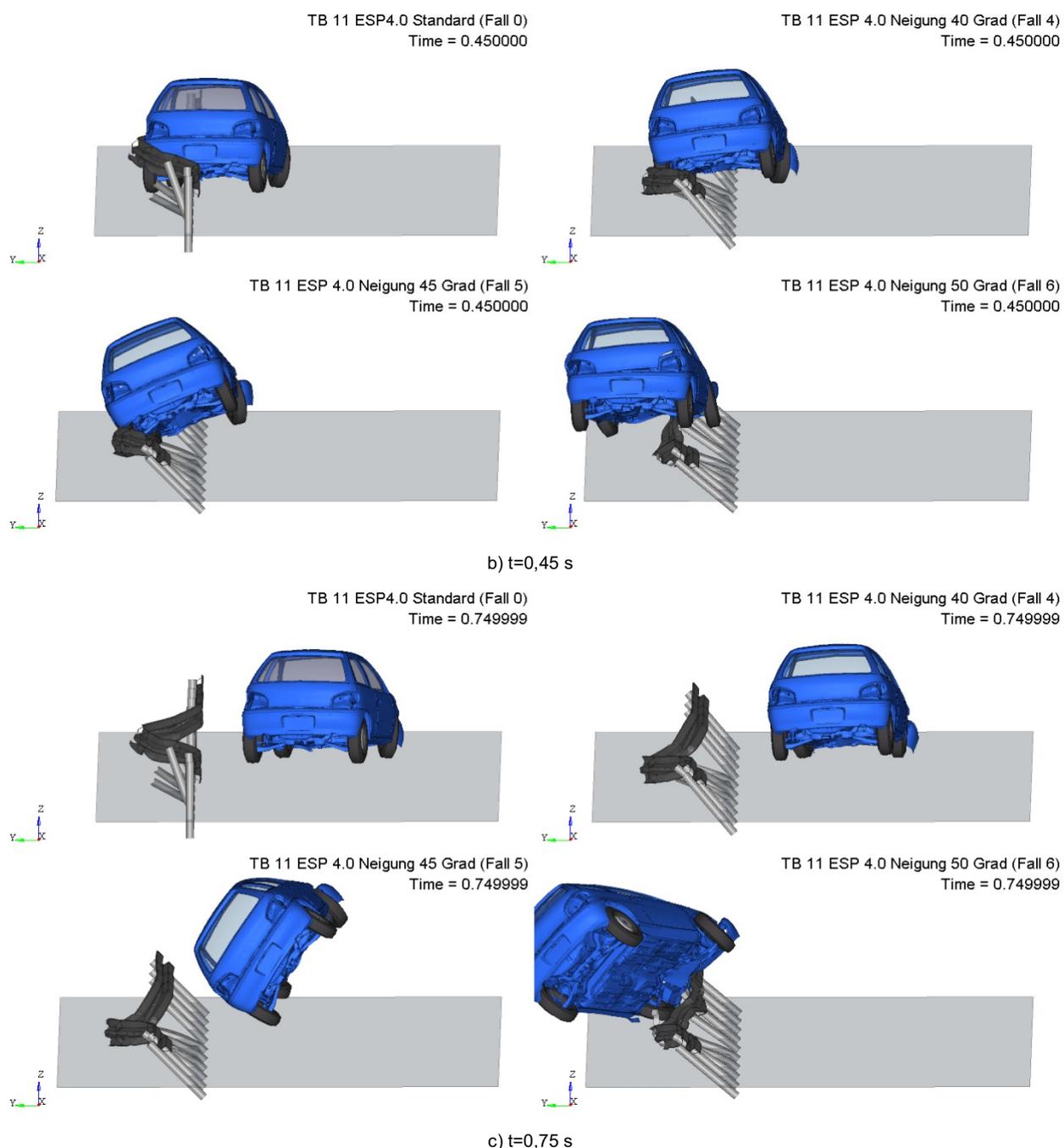


Bild 51: Die Anprallvorgänge bei geneigter ESP 4.0

Im Folgenden soll der Fahrtverlauf näher betrachtet werden, um eine mögliche Erklärung für die Unterschiede zu Studie 3 zu finden. Das Fahrzeug fährt in den Fällen 4 und 5 auf die geneigte Schutzeinrichtung zu. Nach dem ersten Kontakt mit dem Holm, während des Umlenkungsvorganges, wirkt auf das Fahrzeug ein Drehmoment um die zur Fahrtrichtung parallele Achse (Längsachse). Dieses Drehmoment ist umso größer, je niedriger der Holm am Fahrzeug angreift. Im Fall 6 ist der Holm dann schließlich so niedrig, dass das Fahrzeug das System überqueren kann und kein effektives Drehmoment mehr wirksam wird. Das unterschiedliche Fahrzeugverhalten zu dem in der Studie 3 (Abschn. 5.3) besteht darin, dass das wirksame Drehmoment durch das Auffahren auf die Schutzeinrichtung in die entgegengesetzte Richtung gerichtet ist, sodass die Anprallseite des Fahrzeugs höher liegt, und es leichter über das System fährt, ohne von dem Holm erfasst zu werden. Die geneigte Schutzeinrichtung kann also trotz verminderter Höhe das Fahrzeug besser aufhalten. Jedoch ist das Drehmoment im Fall 5 so stark, dass das Fahrzeug im weiteren Verlauf umkippt. In allen drei Durchläufen ist die Auswirkung der vom Fahrzeug überquerten Pfosten nicht weiter untersucht, was auch noch zu Unterschieden führen könnte. Des Weiteren spielen die Einspannung

der Pfosten im Boden und die Verformungen der Pfosten hier eine Rolle, die das Ergebnis beeinflussen könnten. Die Ergebnisse können daher nur eine Tendenz aufzeigen.

5.6 Variation Neigung EDSP 2.0

Analog zur Parameterstudie im Abschnitt 5.5 wird auch der Anprall eines 10 t-Lkws an eine geneigte H1-Schutzeinrichtung untersucht.

Vorgehensweise

Der Anprall eines 10 t Lkw an der verkürzten EDSP 2.0 (Gesamtmodell G) dient als Referenzmodell (Fall 0) und wird mit Simulationsmodellen verglichen, die eine Neigung der Schutzeinrichtung aufweisen (s. Tabelle 42).

Tabelle 42: Anprall des Lkw an die EDSP 2.0 mit Neigung

Modell		Neigung	Effektive Systemhöhe [cm]
Referenzmodell	Fall 0	0°	75
Untersuchte Systeme mit Neigung	Fall 1	5°	74,7
	Fall 2	10°	73,9
	Fall 3	15°	72,4
	Fall 4	20°	70,5
	Fall 5	25°	68
	Fall 6	30°	65
	Fall 7	35°	61

Ergebnisse

Im Bild 52 sind die entscheidenden Momentaufnahmen für den Zeitpunkt $t = 1,4$ s zu sehen. Man erkennt, dass bei einer Neigung der Schutzeinrichtung um 35° das abkommende Fahrzeug nicht mehr vollständig aufgehalten wird. Das linke Hinterrad des Lkw überquert das System. Bei einem Neigungswinkel von 30° wird ein grenzwertiges Fahrzeugverhalten beobachtet.

Der Neigungswinkel von 35° entspricht einer effektiven Höhe von 61 cm. Im Vergleich zu der Studie 4 (Abschn.5.4), in der die Grenze zum Aufhaltevermögen bei 45 cm Einbauhöhe gesehen wurde, wird diese Grenze bei einer geneigt aufgebauten EDSP relativ früh erreicht. Man hat es hier also mit dem entgegengesetzten Effekt zu tun, wie bei dem Anprall des Pkw an die erniedrigt bzw. geneigt aufgebaute ESP. Hierbei spielen das höhere Massenträgheitsmoment des Lkw und die größeren Lkw-Reifen eine wichtige Rolle. Dadurch bleibt der Lkw im Verlauf des Anpralls nahe am Boden, was zu einer geringeren Reibung der Reifen der Schutzeinrichtung zugewandten Seite mit dem Holm führt. Der hintere Teil des Lkw verliert dabei die Haftung mit der Fahrbahn und bricht seitlich aus. Außerdem hat der Holm während des Anpralls lediglich Kontakt mit den Reifen des Lkw, nicht mit der Seitenwand der Karosserie, wie bei dem Pkw. Auch hier spielen die Einspannung der Pfosten im Boden und die Verformungen der Pfosten am Übergang zum Boden eine Rolle, die das Ergebnis beeinflussen könnten.

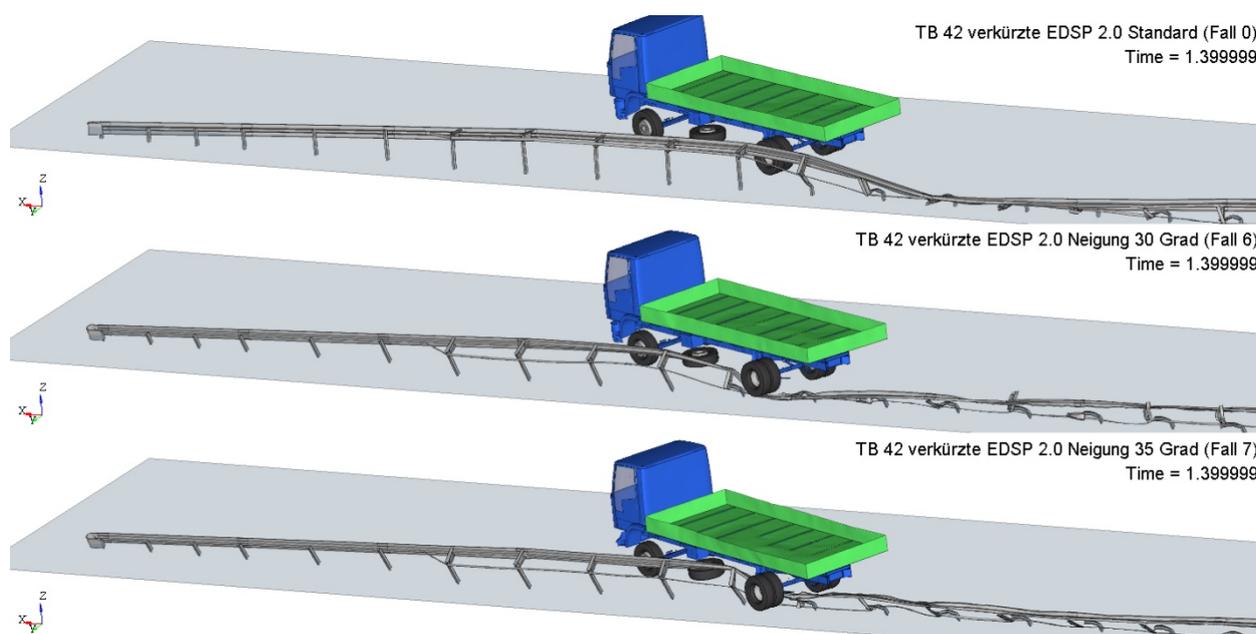


Bild 52: Die Anprallvorgänge bei der EDSP 2.0 mit zusätzlicher Neigung.

5.7 Variation Kurvenradius der ESP 2.0 in Kurven [17]

Reale Anprallprüfungen werden nach der Norm DIN EN 1317 [2] an gerade aufgestellten Schutzeinrichtungen durchgeführt. Jedoch ist es für die Praxis von großem Interesse, Anprallvorgänge auch in Kurven zu untersuchen. Untersuchungen des Statistischen Bundesamtes belegen: „Jeder vierte Unfall mit Personenschaden (24,6 %) auf Landstraßen ereignete sich in einer Kurve. Im Jahr 2017 starben dabei 647 Menschen, das waren 36,0 % aller Verkehrstoten auf Landstraßen. Diese Unfälle passierten in der Regel, weil der Fahrer oder die Fahrerin in der Kurve die Kontrolle über das Fahrzeug verloren hatte und von der Straße abkam.“ [18] Durch die Krümmung erwartet man Änderungen der Leistungsdaten der Schutzeinrichtung, die bisher nicht systematisch untersucht wurden. In dieser Studie wird untersucht, wie sich System- und Fahrzeugverhalten verändern, wenn die Schutzeinrichtung in einer Anprallprüfung entlang einer Kurve aufgestellt wird.

Vorgehensweise

Als Referenzmodell dient hierbei die in Kurven auf Landstraßen häufig eingesetzte Schutzeinrichtung ESP 2.0 welche im Gesamtmodell C gerade aufgestellt und mit einem TB 32 Fahrzeug kombiniert wurde. Basierend darauf werden Modelle erstellt, bei denen die Schutzeinrichtung in einer Kurve verläuft (Bilder 53 – 56). Um eine geeignete Abschätzung geben zu können, wurden Kurvenradien R gewählt, die in Deutschland anzutreffen sind, wie z.B. auf kurvigen Landstraßen oder aber auch bei Rampen.

Tabelle 43: Gerade Schutzeinrichtung als Referenzmodell und Variation der Krümmungsradien der Schutzeinrichtung

TB 32 ESP 2.0 Variation Kurvenradius		
Modell		Krümmungsradius R [m]
Referenzmodell		Ohne Krümmung
Variation der Krümmung	Fall 1	120
	Fall 2	90
	Fall 3	60

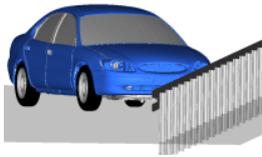


Bild 53: Ausgangsmodell
Gesamtmodell
C

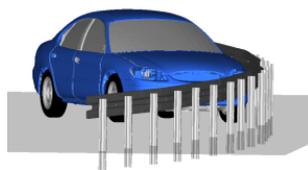


Bild 54: Schutzeinrichtung in einer Kurve, $R = 120$ m

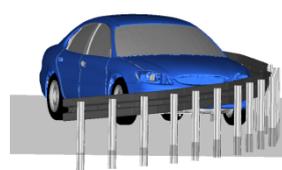


Bild 55: Schutzeinrichtung in einer Kurve, $R = 90$ m

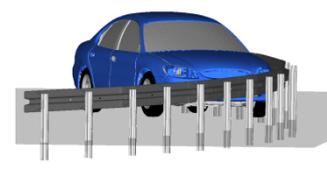


Bild 56: Schutzeinrichtung in einer Kurve, $R = 60$ m

Ergebnisse

Die dynamischen Durchbiegungen für das Ausgangsmodell und die Variationen sind in Bild 57 zusammengestellt. Die maximale dynamische Durchbiegung der Modelle der Schutzeinrichtungen in konkaven Kurven fällt, vom Krümmungsradius der Kurve weitgehend unabhängig, ca. 10 % geringer aus, als die des Ausgangsmodells mit gerade aufgestellter Schutzeinrichtung.

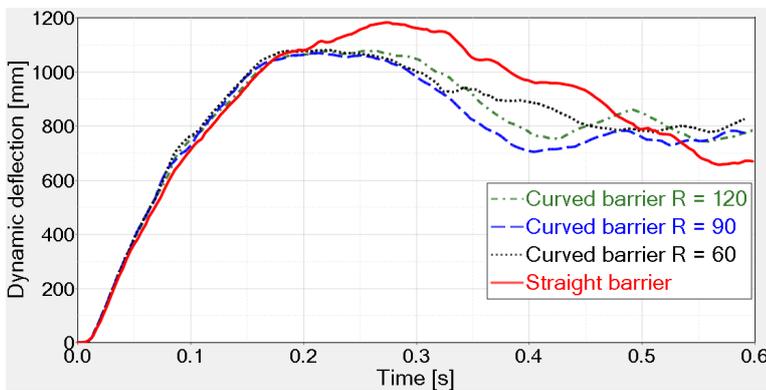


Bild 57: Maximale dynamische Durchbiegungen im zeitlichen Verlauf während des Anpralls an die gerade aufgestellte Schutzeinrichtung (rot durchgezogen) und an die Schutzeinrichtungen in Kurven. Die Durchbiegung in der Kurve ist nicht erhöht. Die Stelle auf der Schutzeinrichtung, an der die maximale Auslenkung auftritt, ist in diesem Diagramm nicht dargestellt, und hängt vom Kurvenradius ab.

Tabelle 44: Leistungsdaten der ESP 2.0 in Kurven mit Krümmungsradius R

Leistungsdaten	Gerade	$R = 120$ m	$R = 90$ m	$R = 60$ m
dynamische Durchbiegung D_N [m]	1,20	1,10	1,10	1,10
Anprallheftigkeit (ASI)	0,72	0,9	0,92	0,96

Die ASI-Werte für das Ausgangsmodell und die Variationen sind in Bild 58 zusammengestellt. Auffällig ist dabei die Kurve für $R = 60$ m, die bei 0,35 s einen weiteren Peak zeigt. Um zu überprüfen, welche Ursache dieser Peak hat, wurde die Berechnung näher betrachtet. Die Bilder unter der Grafik zeigen das vergrößerte Modell während des Anpralls. Im roten Kreis befindet sich ein Element, das von dem Kontakt-Algorithmus des Berechnungsprogramms nicht richtig erfasst wird und daher nicht-physikalische Ergebnisse erzeugt. Dies ist die Ursache für die Spitze bei 0,35 s im Fall der 60 m Kurve. Der Simulationsverlauf bis zu diesem Zeitpunkt ist aber nicht davon betroffen. Der maximale ASI-Wert erhöht sich im Fall einer Krümmung um ca. 25 % bis 30 % gegenüber der gerade aufgestellten Schutzeinrichtung. Aber in keinem der untersuchten Fälle kommt es zu einer Änderung der Anprallheftigkeitsstufe (s. EN 1317-2 [2]) infolge der Krümmung.

Die Änderung der Leistungsdaten der gerade aufgestellten Schutzeinrichtung gegenüber der in einer Kurve lässt sich folgendermaßen verstehen: Ihre Durchbiegung ist in der Kurve geringer als in der Geraden, da sie in der gleichen Richtung vorgekrümmt ist, wie es das Fahrzeug durch den Anprall bewirken könnte. Dagegen erhöht sich die Anprallheftigkeit, da das Fahrzeug aufgrund der Krümmung einen größeren

Rotationswinkel benötigt, um von der Schutteinrichtung umgelenkt zu werden. Das dafür notwendige Drehmoment erhöht die Anprallheftigkeit.

Eine Erweiterung dieser Studie um virtuelle Anprallprüfungen an weiteren Arten von Schutteinrichtungen mit verschiedenen Aufhaltestufen wäre im Hinblick auf Vollständigkeit und Bestärkung der Aussagekraft sinnvoll.

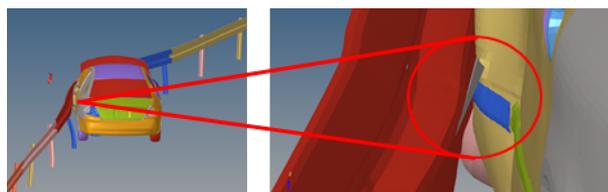
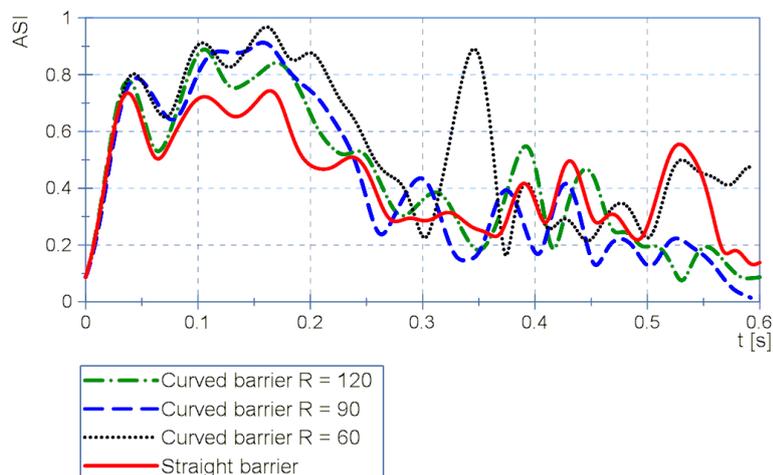


Bild 58: Insassenbelastung (ASI-Werte) im zeitlichen Verlauf während des Anpralls an die gerade aufgestellte Schutteinrichtung (rot durchgezogen) und an die gekrümmte Schutteinrichtung. Der Vergleich zeigt eine erhöhte Insassenbelastung im Kurvenbereich.

5.8 Erweiterung der Aufhaltstufe für ESP 2.0

Die ESP 2.0 hat durch eine TB32 Prüfung (BASt 2000 7D 07) die Aufhaltstufe N2 (Anprall eines Pkw mit 1500 kg, 110 km/h und Anprallwinkel 20°) nachgewiesen. Es besteht die Frage, ob die ESP 2.0 das Potenzial hat, auch eine höhere Aufhaltstufe zu erreichen. Die nächsthöhere Stufe ist H1 (TB 42). Es handelt sich um den Anprall eines Lkw mit 10 t und 70 km/h, Anprallwinkel 15°. Das Gesamtmodell G (Abschn. 4.4) ist als Grundlage für diese Studie geeignet, wobei die Schutteinrichtung EDSP gegen eine ESP ausgetauscht wird. Die Auswertung der Simulationsergebnisse wird gemäß DIN EN 1317-2 durchgeführt.

Ergebnis

Bild 59 zeigt den Verlauf des Anprallvorgangs. Der Lkw prallt 1,53 m nach dem Stoß 2/3 an. Ab 0,2 s wird der Lkw allmählich umgelenkt. Nach einer Kontaktstrecke von 18,9 m verlässt der Lkw die Schutteinrichtung.

Die Beschädigungen des Systems erstrecken sich über die Holme 3 bis 8 und insgesamt 11 Pfosten (Pfosten 3-1 bis 8-1). Davon werden Pfosten 4-1 bis Pfosten 7-2 von dem System getrennt und Pfosten 3-2 wird stark gebogen. Die Leistungsdaten der ESP für den simulierten TB 42-Anprall sind in Tabelle 45 dargestellt.

Tabelle 45: Leistungsdaten der TB 42 für ESP 2.0

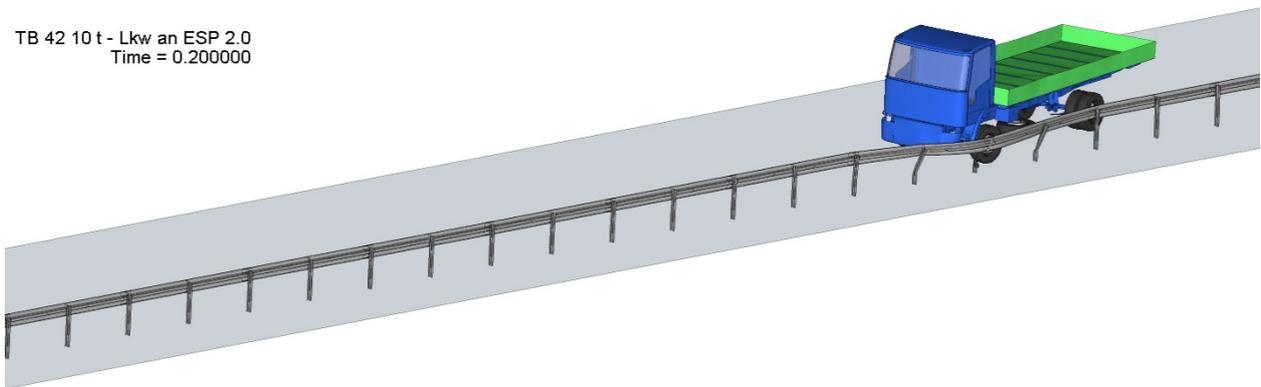
Leistungsdaten und Parameter	
dynamische Durchbiegung D_N [m]	1,38

Wirkungsbereich W_N [m]	1,54
Wirkungsbereichsklasse	W5
Fahrzeugeindringung V_{IN}^* [m]	1,92
Kontaktstrecke [m]	18,9

(*Aufgrund fehlender Beladung wird die Fahrzeugeindringung bezogen auf Ladebett gemessen.)

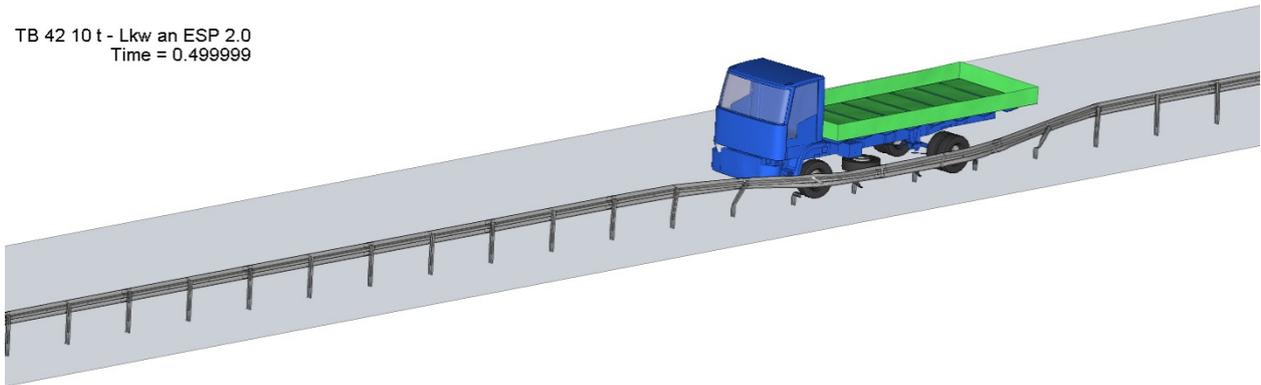
Die Simulation zeigt, dass die ESP 2,0 das Potenzial haben könnte, auch einen 10 t-LKW aufzuhalten. Vergleicht man die erreichten Werte mit am Markt verfügbaren H1-Schutzeinrichtungen, die der ESP 2.0 ähnlich sind (Eco-Safe 2.0), kann man davon ausgehen, dass das Leistungsvermögen mit der Simulation gut abgeschätzt wurde. Für einen Einsatz als H1-Schutzeinrichtung wären jedoch reale Anprallversuche erforderlich, da es sich um eine wesentliche Änderung des validierten Simulationsmodells handelt. Außerdem soll eine höhere Aufhaltstufe festgestellt werden, welches allein mit der Simulation nicht nachgewiesen werden kann.

TB 42 10 t - Lkw an ESP 2.0
Time = 0.200000



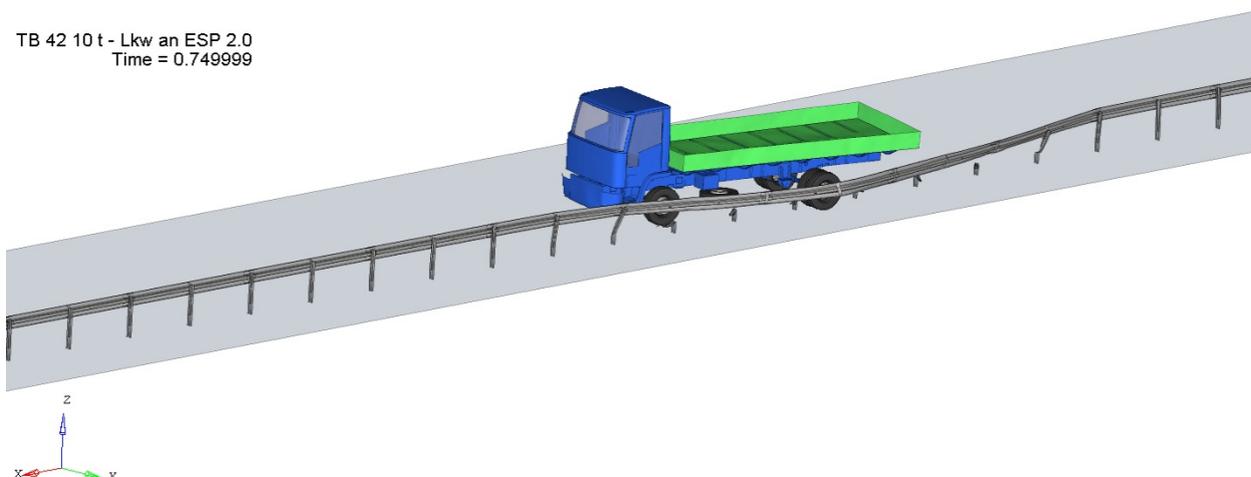
a) $t=0,2$ s

TB 42 10 t - Lkw an ESP 2.0
Time = 0.499999



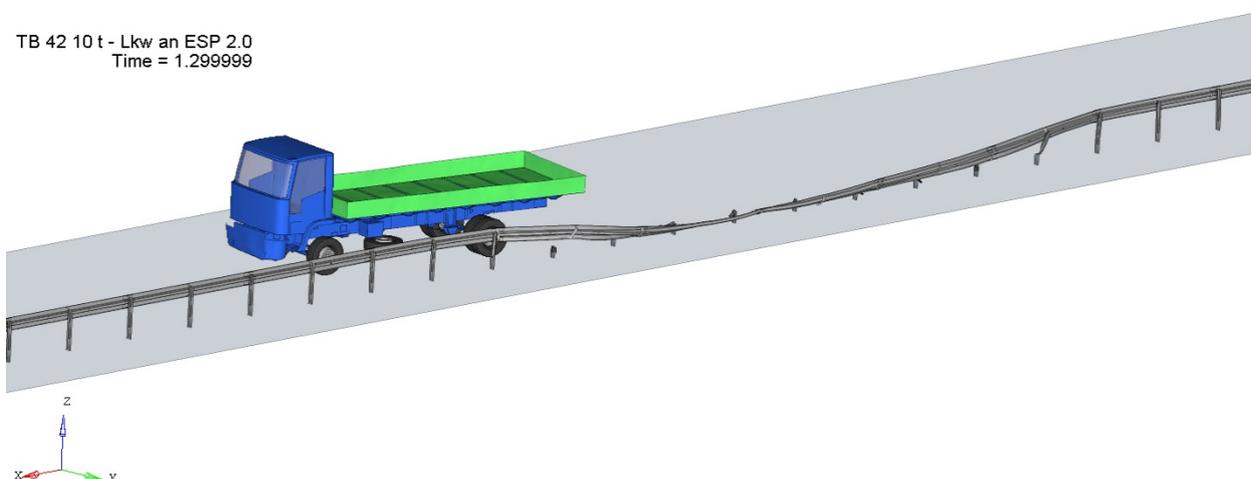
b) $t=0,5$ s

TB 42 10 t - Lkw an ESP 2.0
Time = 0.749999



c) $t=0,75$ s

TB 42 10 t - Lkw an ESP 2.0
Time = 1.299999



d) $t=1,3$ s

Bild 59: Anprallvorgang des TB 42 an eine ESP 2.0

5.9 Virtueller TB 11 Anprallversuch an der verkürzt aufgebauten EDSP 2.0

Die EDSP 2.0 wurde mit einer Aufbauhöhe von 60 m in realen Tests hinsichtlich der Aufhaltestufe H1 geprüft. Beide notwendigen Prüfungen, TB 11 (BASt 1994 7D 10) und TB 42 (BASt 1994 7D 11) an der EDSP 2.0, wurden durchgeführt und bestanden.

In weiteren Anprallversuchen wurde die EDSP 2.0 mit einer verkürzten Aufbauhöhe von 32 m geprüft (BASt 2011 7D 02). In dieser Aufbaukonstellation wurde jedoch nur der Versuch mit dem Lkw (TB 42) durchgeführt. Auf die Durchführung einer weiteren TB 11 Prüfung an der verkürzten Variante wurde verzichtet. Da erfahrungsgemäß ein Anprall an der verkürzten EDSP 2.0 bei einem TB 11 Versuch ähnlich verlaufen wird, wie ein Anprall an der EDSP 2.0 mit einer Aufbauhöhe von 60 m, wurde auf Grundlage der Erfahrungen eingeschätzt, dass sich die Leistungsfähigkeit aufgrund eines verkürzten Aufbaus nicht deutlich unterscheidet. Nun bietet die Simulation die Möglichkeit, diese Einschätzung zu überprüfen, indem ein TB 11 Anprall an eine verkürzte EDSP 2.0 in einer Simulationsstudie untersucht wird.

Vorgehensweise

Als Referenzmodell dient das Gesamtmodell G (Abschn. 4.4). Um einen TB 11 Versuch virtuell durchführen zu können, muss in diesem Modell der Lkw gegen ein 900 kg Fahrzeug ausgetauscht werden.

Ergebnis

Der 900 kg Pkw prallt mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h und einem Anprallwinkel von 20° an die verkürzte EDSP 2.0 an.

Der Anprallpunkt in der Simulation befindet sich 0,6 m vor Stoß 2/3. Nach 0,2 s wird das Fahrzeug allmählich umgelenkt. Nach einer Kontaktstrecke von 10,3 m wird die Schutzeinrichtung wieder verlassen. Nach dem Abprall zeigt sich eine Rotation des Fahrzeugs um das blockierte linke Vorderrad.

Die Beschädigungen des Systems erstrecken sich von Holm 2 bis 5. Davon werden 2 Pfosten (Pfosten 7 und 8) abgelöst. Der Pfosten 6 wird gedreht und stark nach unten gedrückt, aber nicht komplett vom System getrennt.

Die oben genannten Fahrtverläufe und qualitative Deformation/Beschädigungen des Systems sind mit der Anprallprüfung mit einer 60 m - langen EDSP 2.0 vergleichbar. Dies veranschaulichen auch Bild 60 und Bild 61. Auf Bild 60 sind die Anprallvorgänge dargestellt mit der 60 m langen (real) und der 32 m langen (virtuell) EDSP 2.0. Bild 62 zeigt den Vergleich der Verformungen nach dem Anprall.

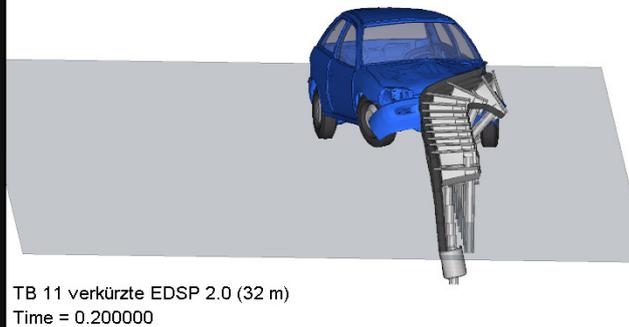
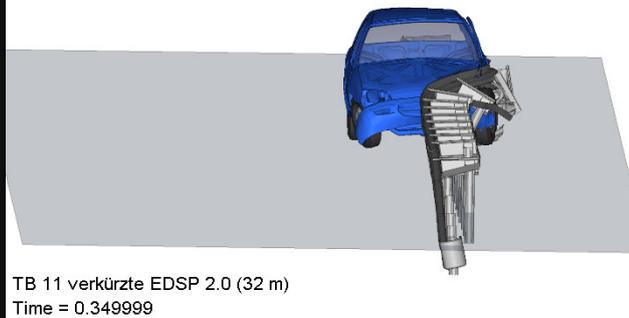
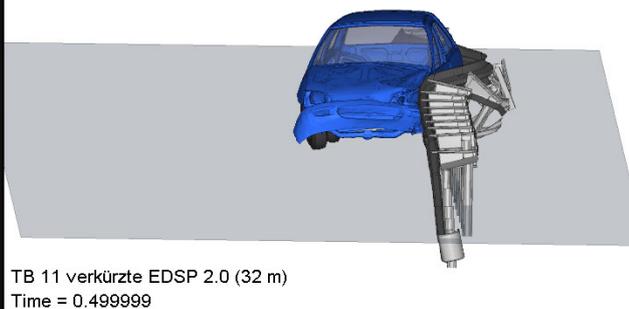
a) $t = 0,2$ sb) $t = 0,35$ sc) $t = 0,5$ s

Bild 60: Vergleich der Anprallvorgänge der EDSP 2.0 mit einer verkürzten Aufbauhöhe (real) und mit einer Standardbauhöhe (virtuell)



Bild 61: Vergleich der Verformung der EDSP 2.0 mit einer verkürzten Baulänge (rechts) mit einer Standardbaulänge (links)

Die Tabelle 46 fasst die Leistungsdaten des TB 11 für die EDSP 2.0 mit einer verkürzten Aufbau­länge (zweite Spalte) und einer Standardaufbau­länge (dritte Spalte) zusammen.

Tabelle 46: Der Vergleich der Leistungsdaten der TB 11 für die EDSP 2.0 mit verschiedenen Aufbau­längen

Leistungsdaten und Parameter	Simulation EDSP 2.0 mit 32 m Länge	Anprallversuch EDSP 2.0 mit 60 m Länge
dynamische Durchbiegung D_N [m]	0,88	0,88
Wirkungsbereich W_N [m]	1,2	1,2
Wirkungsbereichsklasse	W4	W4
Kontaktstrecke [m]	10,3	8,9
Anprallheftigkeitsstufe	A	A
ASI [-]	0,92	0,97
THIV [km/h]	20,7	19,2

Die quantitativen Merkmale der beiden Systeme (virtueller, und realer Anprallversuch) sind fast identisch. Obwohl die Angabe des Wirkungsbereiches bei einer TB 11 Prüfung nicht vorgesehen ist, wird hier trotzdem der Vergleich gezogen, um die Übereinstimmung im Verhalten bezüglich Verformung hervorzuheben. Für beide fällt der Wirkungsbereich in die Stufe W4. Die Anprallheftigkeit ist bei der 32 m - langen EDSP 2.0 etwas geringer als bei der 60 m - langen EDSP 2.0. Die Situation für THIV-Wert ist gerade umgekehrt. Die Kontaktstrecke unterscheidet sich um ca. 10%. Diese kleinen Unterschiede haben keinen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Schutzeinrichtung und können auch als Streuung betrachtet werden, solange nicht weitere Untersuchungen stattfinden, wie z. B. der Vergleich der realen TB 11 Anprallprüfung der 60 m langen EDSP mit einer virtuellen TB 11 Prüfung einer EDSP gleicher Länge. Da es sich um eine verhältnismäßig geringe Modifikation handelt, kann mit der Simulation der Nachweis erbracht werden, dass die Leistungsdaten der verkürzten EDSP 2.0 bei einer TB 11 Prüfung sich von den Leistungsdaten der EDSP 2.0 mit 60 m Aufbau­länge nicht wesentlich unterscheiden.

5.10 Virtueller Anprall eines Lieferwagens an einer EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau- länge)

In der Praxis sind neben den von der Norm EN 1317 abgedeckten Testfahrzeugen weitere Klassen von Fahrzeugen auf deutschen Straßen unterwegs. Lieferwagen beispielsweise werden in den Anprallversuchen nicht berücksichtigt, aufgrund ihrer erhöhten Masse und des erhöhten Schwerpunktes im Vergleich zu schweren PKW aber unter dem Aspekt der Verkehrssicherheit von Interesse.

Vorgehensweise

Um das Anprallverhalten von Lieferwagen zu untersuchen, wurde das Gesamtmodell F erstellt (Abschn. 3.3.6). Dort wird der Anprall eines Lieferwagens mit 2200 kg an die EDSP 2.0 unter einem Anprallwinkel von 20 Grad modelliert.

Ergebnis

Das Bild 62 zeigt den Fahrtverlauf des Anpralls mit einem Lieferwagen. Das Fahrzeug fährt nach dem Anprall zuerst in Anprallrichtung weiter. Danach wird das Fahrzeug allmählich umgelenkt. Kurz darauf dreht sich das Fahrzeug um das linke Vorderrad. Nach einer Kontaktstrecke von 16,6 m wendet sich das Fahrzeug von der Schutzeinrichtung ab und verliert den Kontakt.

Die Beschädigungen des Systems erstrecken sich vom Holm 1 bis Holm 4. Davon sind die Pfosten 2-1 bis 5-1 stark niedergedrückt. Es werden aber keine Pfosten vom System getrennt.

Die in der Simulation erreichten Leistungsdaten sind in der Tabelle 47 zusammengestellt. Aufgrund von Fahrzeugspezifikationen, die von der Norm EN 1317 nicht abgedeckt sind, ist eine Normalisierung des Wirkungsbereichs nicht möglich. Wenn dieser Wirkungsbereich gemäß DIN EN 1317-2 eingeordnet würde, würde er die Stufe W4 nachweisen. Betrachtet man die Anprallheftigkeit, liegen ASI und THIV noch innerhalb der Anprallheftigkeitsstufe A.

Tabelle 47: Leistungsdaten der EDSP beim Anprall mit dem Lieferwagen

Leistungsdaten und Parameter	
dynamische Durchbiegung D_m [m]	0,97
Wirkungsbereich W_m [m]	1,26
Wirkungsbereichsklasse	W4
Kontaktstrecke [m]	16,6
Anprallheftigkeitsstufe	A
ASI	0,94
THIV	28,64

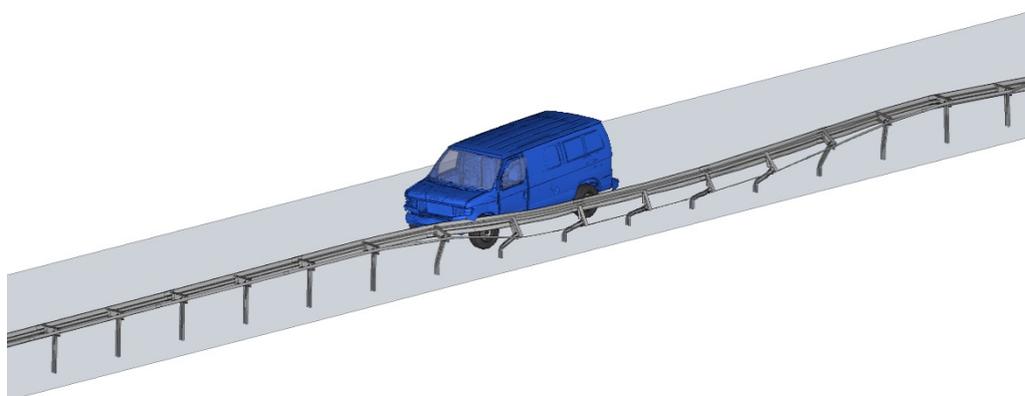
Insgesamt konnte mit Hilfe der virtuellen Prüfung gezeigt werden, dass die verkürzte EDSP 2.0 in der Lage ist, einen 2200 kg schweren Lieferwagen mit einem Wirkungsbereich W4 und einer Anprallheftigkeitsstufe A aufzuhalten. Da das zugrunde gelegte Gesamtmodell F nicht an einer realen Prüfung validiert ist, kann eine präzise Aussage über die Leistungsfähigkeit hinsichtlich des Wirkungsbereichs und Anprallheftigkeit nicht getroffen werden. Jedoch wurde die hier verwendete Schutzeinrichtung EDSP 2.0 im Gesamtmodell G validiert (Abschn. 4.4). Da das Gewicht des hier verwendeten Fahrzeuges zwischen dem eines TB 11 und eines TB 42 Fahrzeuges liegt, kann mit der Validierung bzw. der Studie in den Abschnitten 4.4 und 5.9 eine gewisse Sicherheit der hier präsentierten Ergebnisse gegeben werden, und diese Simulation kann daher als fundierten Hinweis auf das Aufhaltevermögen und die Leitungsfähigkeit beim Anprall eines Lieferwagens dienen.



a) $t=0,1$ s



b) $t=0,4$ s



c) $t=0,7$ s

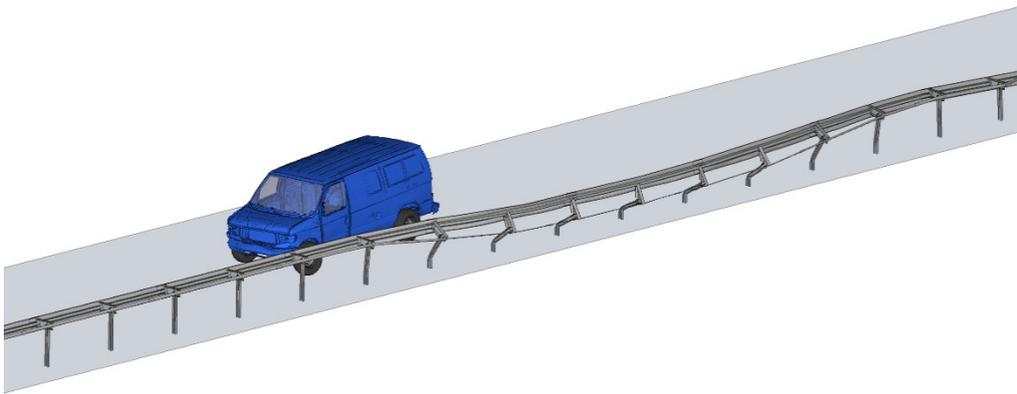
d) $t=1,0$ s

Bild 62: Anprallvorgang an der EDSP 2.0 mit einem Lieferwagen

5.11 Virtueller Anprall eines 22 t Sattelzuges an einer EDSP 2.0 (verkürzte Aufbau- länge)

Die Schutteinrichtung EDSP 2.0 (Abschnitt 3.1.3) hat in Anprallversuchen bisher erfolgreich die Aufhaltstufe H1 (Anprall eines 10-t Lkw) nachgewiesen. Jedoch stellt sich die Frage, ob die EDSP 2.0 auch in der Lage ist, einen Lkw mit 22 t aufzuhalten.

Vorgehensweise

Es wird der virtuelle Anprall eines Sattelzuges mit 22 t an die verkürzte EDSP 2.0 durchgeführt. Die anderen Prüfbedingungen bleiben wie bei einer TB 81 Prüfung, d.h. mit einer Anprallgeschwindigkeit von 65 km/h und einem Anprallwinkel von 20° . Dabei findet das eigens dafür erstellte Gesamtmodell L (Abschnitt 3.3.12) Verwendung.

Ergebnis

Die Höhe des Schwerpunktes liegt bei 1,8 m (Gemäß der Norm EN1317 [2] bei $CGZ=1,9$ m, +15%, -5%). In Bild 63 sind die Momentaufnahmen des Anprallvorganges des Sattelzuges dargestellt. Der Anprall erfolgt 1,87 m nach Stoß 1/2. Der Sattelzug fährt weiter in Anprallrichtung und drückt eine Reihe von Pfosten, sowie den Holm, die Abstandhalter und den Abspanngurt zu Boden. Ab 0,4 s wird die Zugmaschine allmählich umgelenkt. Das heruntergedrückte System kann schließlich kaum noch eine Wirkung entfalten und ist somit nicht mehr in der Lage, den Auflieger zurückzulenken. Der Auflieger überfährt das System. Das hier beobachtete Verhalten des Fahrzeuges widerspricht der Regelung gemäß DIN EN 1317-2, dass während oder nach dem Anprall nicht mehr als ein Rad des Fahrzeuges die Schutteinrichtung vollständig über- oder unterqueren darf. Somit wurde in dieser Simulation gezeigt, dass die verkürzte EDSP 2.0 nicht in der Lage ist, einen 22t - Sattelzug unter den Versuchsbedingungen eines TB 81-Anprallversuchs zurückzuhalten.

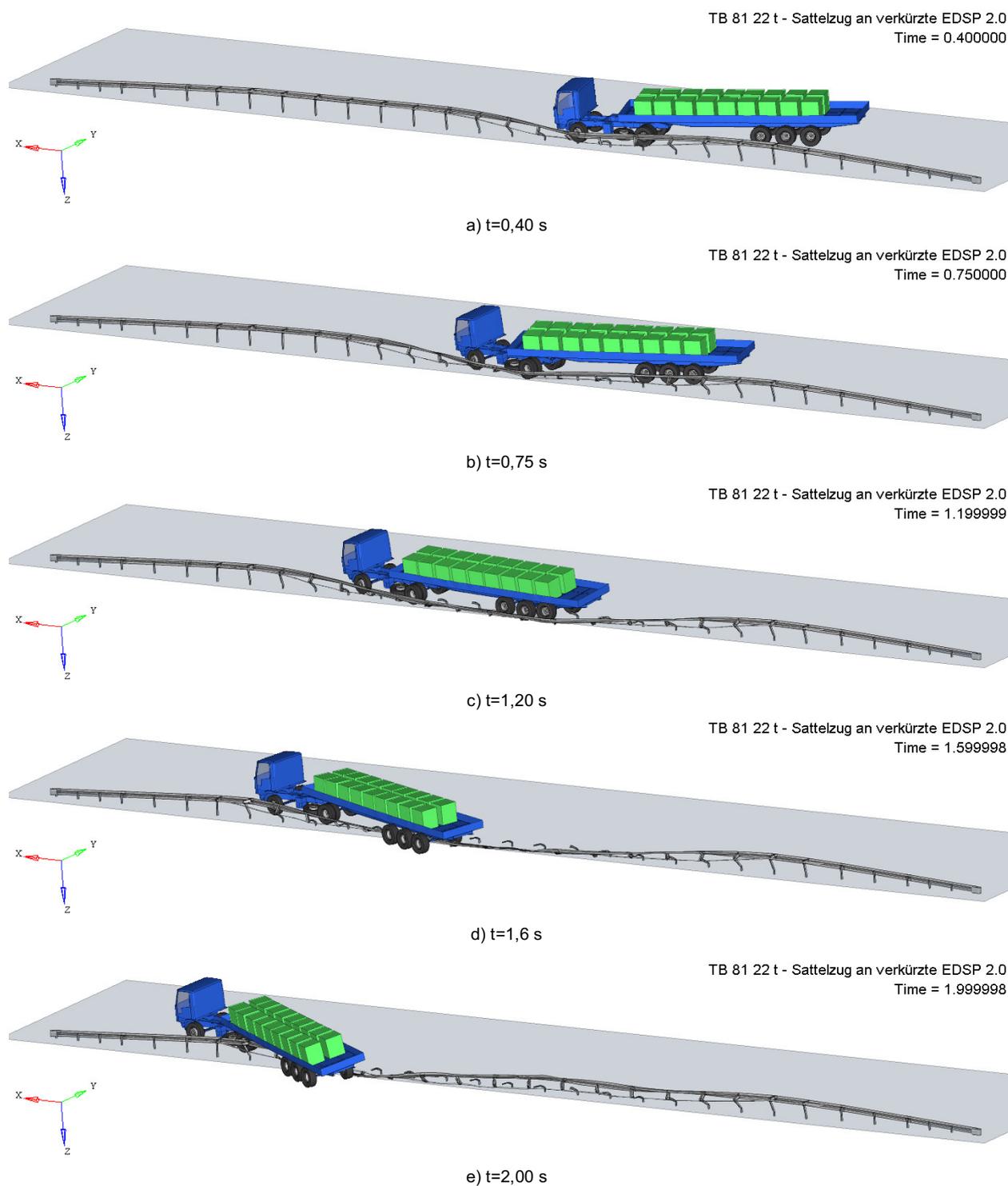


Bild 63: Simulationsergebnisse des Anprallvorgangs des 22 t - Sattelzugs an die verkürzte EDSP 2.0

5.12 Überprüfung der Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen von der Übergangskonstruktion ESP 4.0 – EDSP 2.0 auf die ESP 2.0 - EDSP 2.0

Die Übergangskonstruktion "ESP 4.0 - EDSP 2.0" (Quellsystem) verbindet die Schutzeinrichtungen ESP 4.0 und EDSP 2.0 miteinander. Sie wurde nach DIN V ENV 1317-4 geprüft und erreichte die Aufhaltstufe N2. Die Übergangskonstruktion „ESP 2.0 - EDSP 2.0" (Zielsystem) ist der geprüften Variante sehr ähnlich, bis auf den Pfostenabstand einer der angeschlossenen Schutzeinrichtungen, die statt 4 m nur 2 m beträgt. Dadurch verkürzt sich die Länge der Übergangskonstruktion auch von 8 m auf 4 m. Der kleinere Pfostenabstand könnte Auswirkungen hinsichtlich der Anprallheftigkeit und des Wirkungsbereiches haben, wurde jedoch selbst nicht in Anprallversuchen nach DIN V ENV 1317-4 geprüft, sondern die Prüfergebnisse der o.g. Übergangskonstruktion nach einer ingenieurmäßigen Abschätzung der Auswirkungen der Modifikation übertragen.

Mit dieser Simulationsstudie soll überprüft werden, ob die veränderte Übergangskonstruktion ein ähnliches System- und Fahrzeugverhalten zeigt wie das Ursprungssystem und daher die Übertragung der Leistungsfähigkeit vom Quellsystem gerechtfertigt ist.

Vorgehensweise

Es werden zwei Arten von Anprallprüfungen behandelt, die TB 11 Prüfung mit einem leichten, und die TB 32 Prüfung mit einem schwereren PKW. Diese zwei virtuellen Anprallprüfungen werden sowohl für das Quellsystem als auch für das Zielsystem durchgeführt. Dadurch ergibt sich eine Vielfalt von vier ähnlichen Simulationsmodellen, wobei sinngemäß die zwei TB 11 Prüfungen und die zwei TB 32 Prüfungen untereinander verglichen werden. Das leichtere der beiden Fahrzeuge (TB 11) ist bei einem Anprall gegenüber der Insassenbelastung empfindlicher. Somit wird die Anprallheftigkeit mit der TB 11 Prüfung erfasst. Der Wirkungsbereich ist bei einem Anprall mit dem schwereren Fahrzeug größer. Daher ist zur Feststellung dieses Leistungsmerkmals eine TB 32 Prüfung vorgesehen. Die in Abschnitt 4.5 bzw. 4.6 behandelten Gesamtmodelle H und J, die jeweils mit den Anprallprüfungen 2009 7G 11 (TB 11) und 2009 7G 12 (TB 32) abgeglichen wurden, dienen hier als Referenzmodelle. Beide werden im Folgenden mit den Simulationsmodellen I bzw. K verglichen, wobei der Pfostenabstand der angeschlossenen Schutzeinrichtung ESP von 4 m auf 2 m geändert wurde. Da an den gegenüber dem Ursprungssystem steiferen System mit geringerem Pfostenabstand die größte Anprallheftigkeit erwartet wird, wurde im Gesamtmodell I auch der Anprallpunkt verschoben.

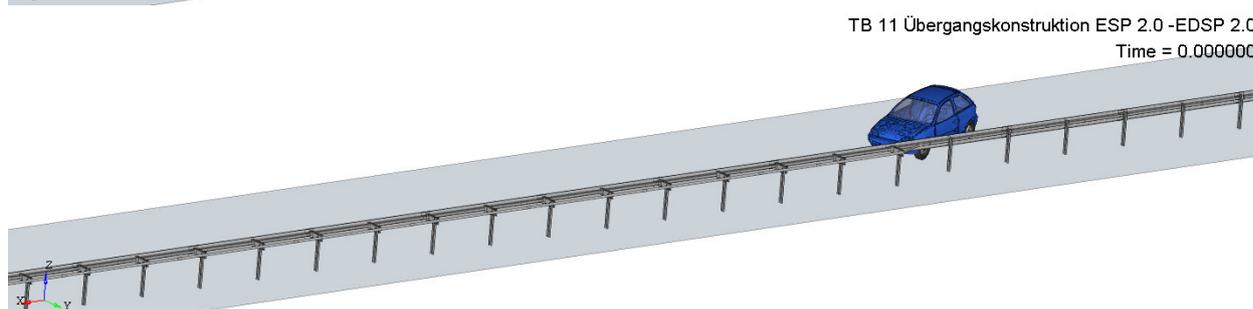
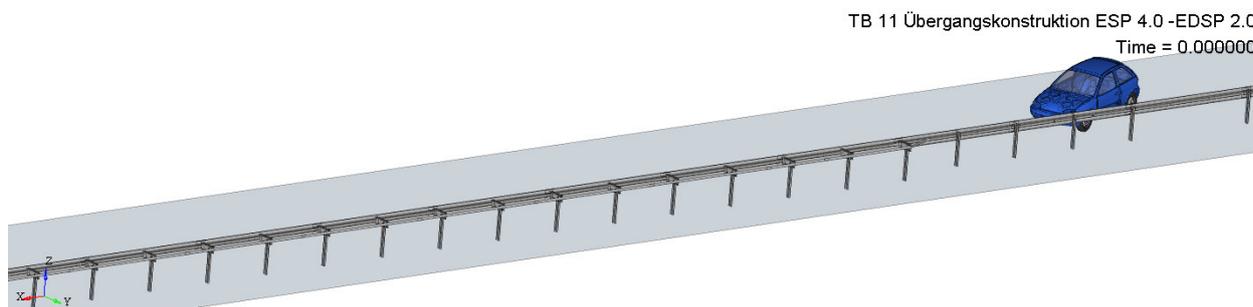
Ergebnis

Als erstes erfolgt die Beschreibung des Verlaufs der virtuellen TB 11 Prüfung an der Übergangskonstruktion bei geändertem Pfostenabstand. Der Verlauf der virtuellen Anprallprüfung am Quellsystem wurde bereits in Abschnitt 4.5 behandelt. Dann werden diese beiden Simulationsverläufe miteinander verglichen. Im zweiten Teil dieses Abschnittes wird analog hierzu mit den TB 32 Prüfungen verfahren.

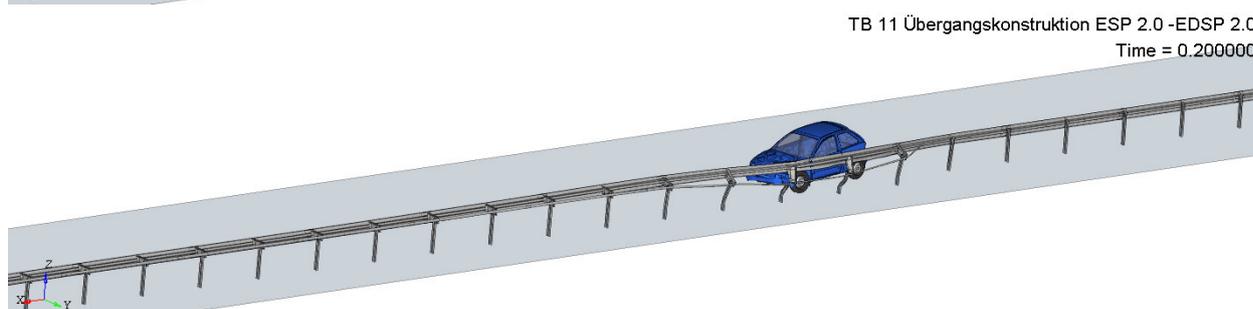
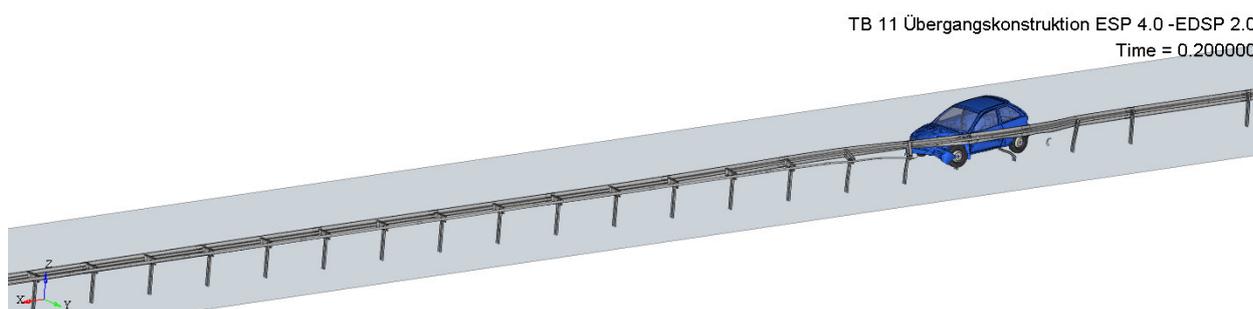
Der TB11-PKW prallt 0,37 m vor Stoß 7/8 mit einer Anprallgeschwindigkeit von 100 km/h und einem Anprallwinkel von 20° an die Übergangskonstruktion an. Das Fahrzeug dringt in das System ein und das System verformt sich. Ab 0,57 s prallt das Fahrzeug ab und fährt weiter in Vorwärtsrichtung.

Die Beschädigungen des Systems erstrecken sich über die gesamte Kontaktstrecke von 10,65 m bis zum Holm 10. Insgesamt werden 6 Pfosten nach hinten gebogen, wobei 2 Pfosten vom PKW heruntergedrückt werden und sich dabei vom Holm lösen.

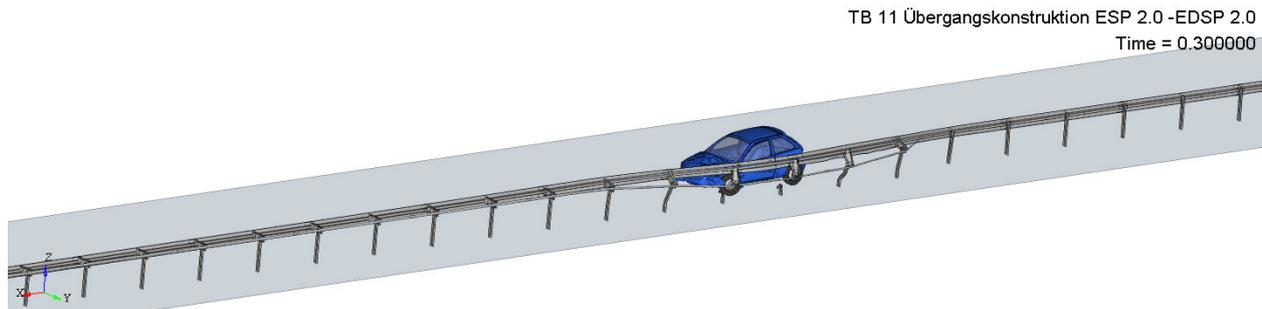
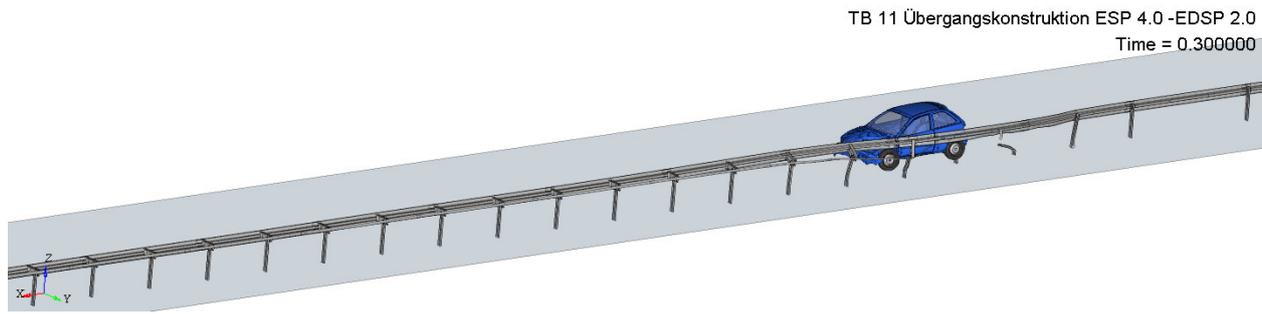
Der Vergleich der beiden virtuellen TB11-Prüfungen zeigt, dass sich die Längen der Kontaktstrecken nur geringfügig unterscheiden. Dies weist darauf hin, dass sich das Systemverhalten durch die Modifikation nicht deutlich verändert. Während sich die Kontaktstrecke bei der 4.0-Ursprungsvariante überwiegend im Bereich der ESP befindet, ist die bei der 2.0-Variante eher im Bereich der EDSP. Aus der Tabelle 48 ist weiterhin zu entnehmen, dass sich sowohl die dynamische Durchbiegung als auch der Wirkungsbereich erhöhen. Die Erhöhung des Wirkungsbereichs ist in der sich ändernden Systembreite begründet. Wie bereits in Abschnitt 5.1 behandelt, ist eine Schwankung der Durchbiegung um 10 % möglich. Inwieweit dieses Verhalten numerische Einflüsse beinhaltet, kann das Simulationsmodell nicht beantworten, da hierzu weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Anprallpunkten notwendig wären. Jedoch ist der Aufwand nur im Fall einer Grundlagenuntersuchung der Simulationsmodelle gerechtfertigt, da eine TB 11 Prüfung keine Aussage über den Wirkungsbereich beinhaltet.



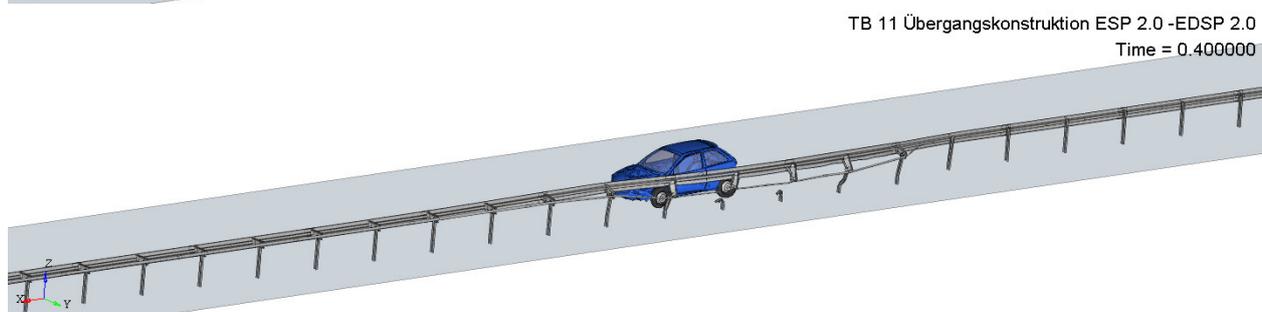
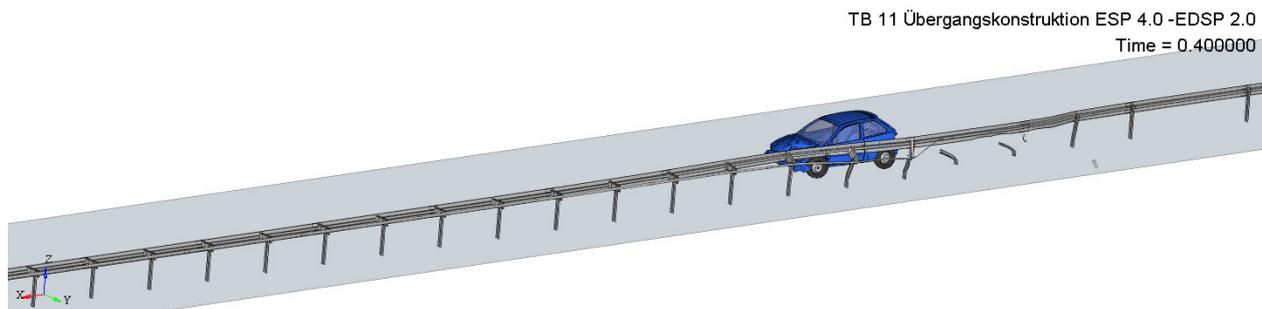
a) $t=0,0$ s



b) $t=0,2$ s



c) $t=0,3$ s



d) $t=0,4$ s

Bild 64: Vergleich der Anprallvorgänge der virtuellen TB 11 Prüfungen

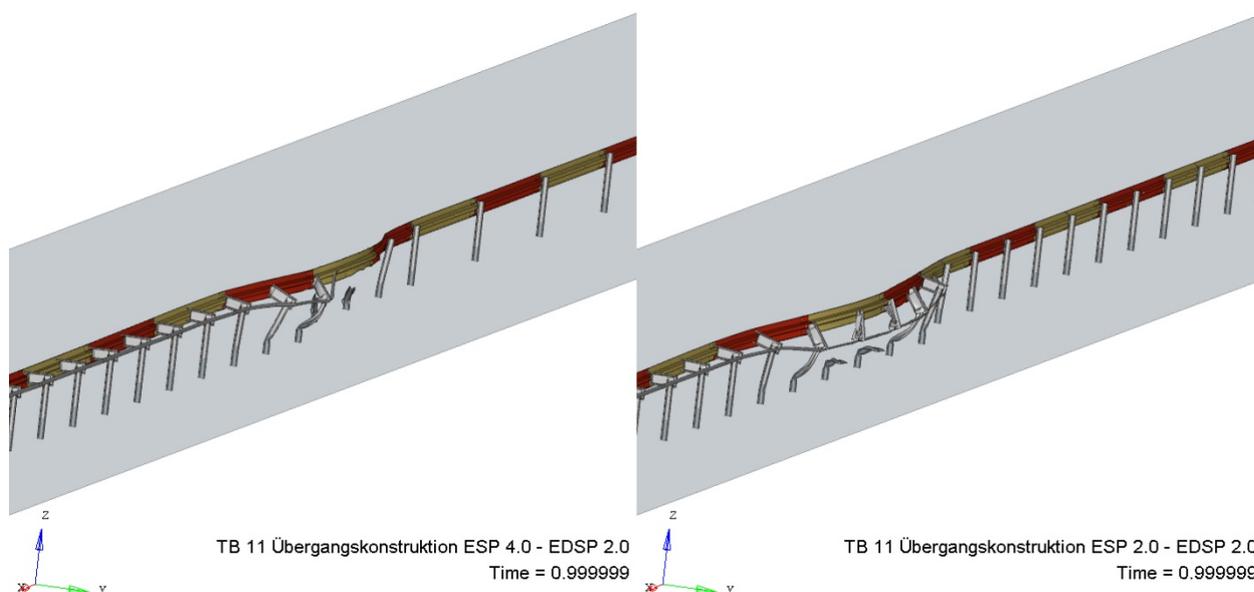


Bild 65: Vergleich der Verformungen der Systeme der virtuellen TB 11 Prüfungen

Tabelle 48: Vergleich der quantitativen Kriterien der TB 11 für ÜK "ESP 4.0 - EDSP 2.0" und ÜK "ESP 2.0 - EDSP 2.0"

Leistungsdaten und Parameter des TB 11	ÜK "ESP 4.0 - EDSP 2.0"	ÜK "ESP 2.0 - EDSP 2.0"
dynamische Durchbiegung D_N [m]	0,76	0,86
Wirkungsbereich W_N [m]	0,96	1,16
Wirkungsbereichs-klasse	W2	W3
Kontaktstrecke [m]	9,21	10,65
Anprallheftigkeitsstufe	A	A
ASI	0,96	0,91
THIV	21,5	18,3

Wie oben schon erwähnt ist die TB 11 Prüfung bei der Auswertung der Anprallheftigkeit entscheidend. Die Ergebnisse zeigen, dass die Werte für den ASI und den THIV beide innerhalb der Messunsicherheiten gering abfallen. Dadurch kann die Aussage getroffen werden, dass die Anprallheftigkeit im Rahmen der Messunsicherheiten konstant bleibt, oder sich gar möglicherweise aufgrund der Wahl der jeweiligen Anprallpunkte verringert. Insgesamt kann die Simulation zeigen, dass die Modifikationen keine signifikanten Einflüsse auf das System- und Fahrzeugverhalten sowie die Leistungsdaten haben, was indirekt auch durch ein vergleichbares Fahrzeugverhalten und vergleichbare Beschädigung des Fahrzeugs unterstützt wird.

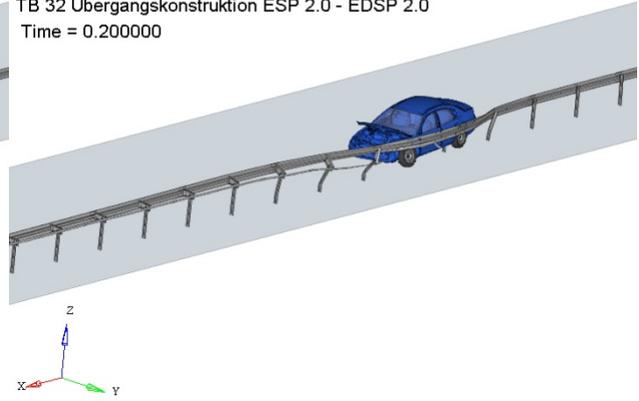
In der virtuellen TB 32 Prüfung der modifizierten Übergangskonstruktion "ESP 2.0 - EDSP 2.0" wurden alle Prüfbedingungen einschließlich des Anprallpunkts von der Anprallprüfung des Quellsystems übernommen. Aufgrund der gleichen Prüfbedingungen ist das Fahrzeug- und Systemverhalten voneinander kaum zu unterscheiden. Daher ist die Verformung der Übergangskonstruktion "ESP 2.0 - EDSP 2.0" während des Anpralls im Fokus der Betrachtungen.

Bei der modifizierten Übergangskonstruktion "ESP 2.0 - EDSP 2.0" werden fünf Pfosten (Pfosten 7-1 bis Pfosten 9-1) vom Holm gelöst. Im Anprallverlauf der Übergangskonstruktion "ESP 4.0 - EDSP 2.0" werden nur vier Pfosten (7-1 bis Pfosten 8-2) abgelöst. Insgesamt erstrecken sich die Verformungen der beiden Systeme bis zum Holm 10 mit einer ähnlichen Kontaktstrecke.

TB 32 Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0
Time = 0.200000

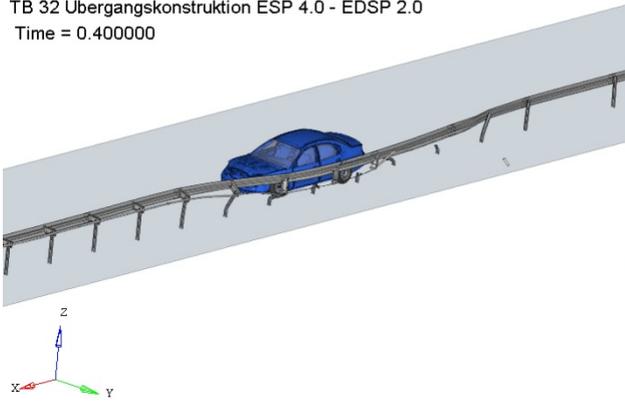


TB 32 Übergangskonstruktion ESP 2.0 - EDSP 2.0
Time = 0.200000



a) t=0,2 s

TB 32 Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0
Time = 0.400000

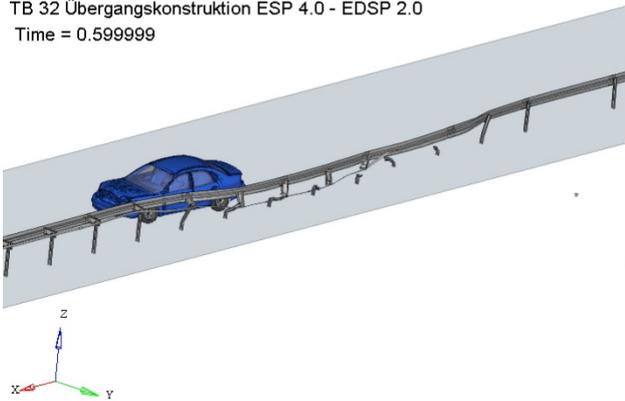


TB 32 Übergangskonstruktion ESP 2.0 - EDSP 2.0
Time = 0.400000



b) t=0,4 s

TB 32 Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0
Time = 0.599999



TB 32 Übergangskonstruktion ESP 2.0 - EDSP 2.0
Time = 0.599999



c) t=0,6 s

Bild 66: Vergleich der Anprallvorgänge der virtuellen TB 32 Prüfungen

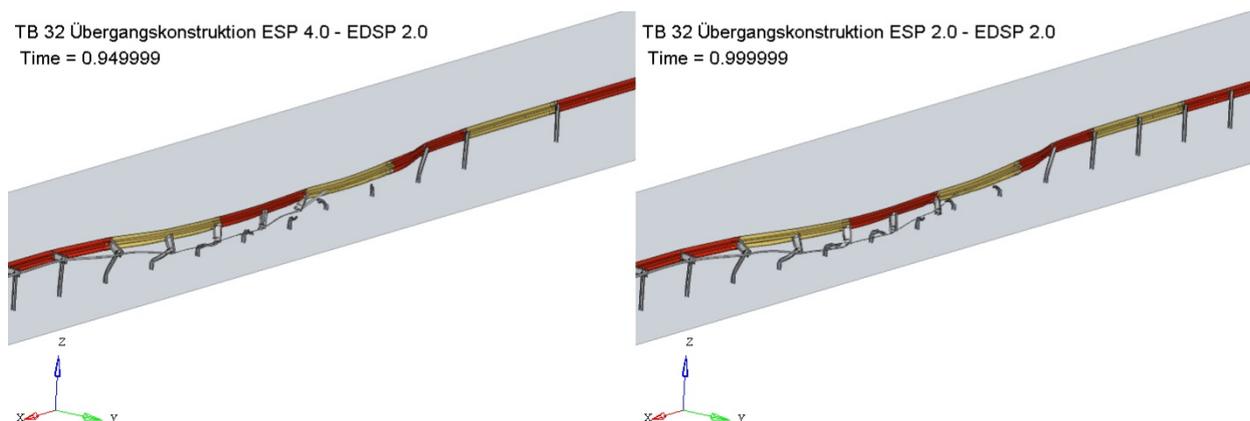


Bild 67: Vergleich der Verformungen der Systeme im Falle der virtuellen TB 32 Prüfungen

Sowohl bei der Übergangskonstruktion "ESP 2.0 - EDSP 2.0" als auch bei der Übergangskonstruktion "ESP 4.0 - EDSP 2.0" sind die Verformungen der Systeme sehr ähnlich. Jedoch kann man bei näherer Betrachtung feststellen, dass die Abstandhalter bei der Übergangskonstruktion "ESP 2.0 - EDSP 2.0" stärker nach hinten gedrückt werden und sich daher der Abspanngurt stärker verformt. Daher ist der Wirkungsbereich vergrößert, während die dynamische Durchbiegung gleichbleibt. Der Wirkungsbereich wird jedoch in beiden Fällen in die Stufe W5 eingeteilt.

Die Anprallheftigkeit verändert sich nicht und bleibt daher nach wie vor in der Stufe A. Zusammenfassend kann als Ergebnis des Vergleichs der virtuellen Prüfungen festgehalten werden, dass sich sowohl bei der TB 11 als auch bei der TB 32 Prüfung die Leistungsdaten durch die Modifikation nicht wesentlich verändern. Die vorgenommene ingenieurmäßige Übertragung der Versuchsergebnisse von der Übergangskonstruktion ESP 4.0 – EDSP 2.0 auf die Übergangskonstruktion ESP 2.0 - EDSP 2.0 konnte mithilfe dieser virtuellen Versuche bestätigt werden.

Tabelle 49: Vergleich der quantitativen Kriterien der TB 32 für ÜK "ESP 4.0 -EDSP 2.0" und ÜK "ESP 2.0 - EDSP 2.0"

Leistungsdaten und Parameter des TB 32	ÜK "ESP 4.0 - EDSP 2.0"	ÜK "ESP 2.0 - EDSP 2.0"
dynamische Durchbiegung D_N [m]	1,15	1,15
Wirkungsbereich W_N [m]	1,41	1,52
Wirkungsbereichs- klasse	W5	W5
Kontaktstrecke [m]	15,00	15,34
Anprallheftigkeits- stufe	A	A
ASI	0,64	0,64
THIV	15,9	16,4

5.13 Untersuchung eines erhöhten Beladungsschwerpunktes eines Sattelzuges bei einem Anprall an eine H4b Schutzeinrichtung

Schutzeinrichtungen mit dem bisher höchsten Aufhaltevermögen gemäß DIN EN 1317 haben erfolgreich die Aufhaltstufe H4b, also einen Anprall mit einem 38 t Sattelzug nachgewiesen. Die Spezifikation des Sattelzuges wird in DIN EN 1317-1 [2] geregelt, wobei die niedrigste Höhe des Massenschwerpunkts der Beladung 1,8 m über Fahrbahnoberkante (CGZ=1,9 m, +15%, -5%) beträgt.

Die im Forschungsprojekt über Lang-Lkw [19] [20] von der BAST untersuchte Fragestellung zum Einfluss eines erhöhten Beladungsschwerpunktes von Sattelzügen, bzw. der Kombination von Lkw und Sattelanhänger, lehnt ihre Analyse an zwei reale Anprallprüfungen, die von der DEKRA durchgeführt wurden, an. Es wurde der Anprall eines Sattelzuges (15,45 m Gesamtlänge), mit einem Lang-Lkw (Lkw und Sattelanhänger, 24,8 m Gesamtlänge und einem erhöhten Beladungsschwerpunkt auf 2,5 bis 2,6 m) verglichen.

Die Anprallprüfung wurde an einer H4b Schutzeinrichtung einmal aus Ortbeton und einmal aus Stahl durchgeführt. Das Ergebnis dieser Versuche war, dass der Lang-LKW zwar in beiden Prüfungen (Beton, Stahl) aufgehalten wird, jedoch Teile der Fahrzeugkombination im Ausgang des Versuchs auf der Seite liegen bleiben. Es ist auch möglich, dass nicht allein der erhöhte Schwerpunkt eine Rolle spielt, sondern der untersuchte Lang-Lkw aus zwei Fahrzeugteilen (Lkw und Sattelanhänger) wesentliche Unterschiede im Hinblick auf das Fahrzeugverhalten gegenüber dem Standard-Lkw nach DIN EN 1317 mit sich bringt. Als ein möglicher Grund für dieses Verhalten wird eine Wechselwirkung zwischen den Einflussparametern angeführt: die Beladungsverteilung und der sich daraus ergebende, erhöhte Beladungsschwerpunkt, ein erhöhtes Gesamtgewicht oder von der Norm abweichende Fahrzeugtypen. Die dort mit einer für die Verkehrsunfallrekonstruktion entwickelte, vereinfachte Simulationssoftware durchgeführten Simulationen sagen auch ein erhöhtes Risiko für das Umkippen eines solchen Fahrzeuges voraus. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt auch die Untersuchung mithilfe von virtuellen FEM-Simulationen im EU-Projekt TRANSFORMERS [13], wobei dort die standardmäßige Länge des Sattelzuges (16,1 m Gesamtlänge, Radstand 12,2 m) verwendet, und zusätzlich auch das Gesamtgewicht auf 40 t, bzw. 41 t erhöht wurde. In diesem Fall könnte zusätzlich das erhöhte Gesamtgewicht der Grund für das instabile Anprallverhalten sein. Aus diesen vorangegangenen Untersuchungen ergibt sich daher die Fragestellung, ob der erhöhte Beladungsschwerpunkt auch bei Sattelzügen der Gesamtlänge 16,1 m und einem Gesamtgewicht von 22 t zu einem ähnlich grenzwertigen Verhalten führen kann. Mit der hier durchgeführten Untersuchung hat man damit die Möglichkeit, das beobachtete Verhalten des Fahrzeugs, bei einem Anprall umzukippen, auf den erhöhten Beladungsschwerpunkt zurückzuführen.

Vorgehensweise

Die Gesamtmodelle M und N dienen in dieser Untersuchung als Referenz. Sie werden verglichen mit dem Anprall eines Lkw mit 22 t Gesamtgewicht und erhöhtem Schwerpunkt an zwei verschiedenen Schutzeinrichtungen aus Stahl und Beton der Aufhaltestufe H4b.

Das Referenzmodell ist ein 38 t Sattelzug mit dem Beladungsschwerpunkt $CGZ = 1,8$ m (Fall 0). In den folgenden Simulationen soll einmal die Gesamtmasse gesenkt, und dann der Beladungsschwerpunkt schrittweise angehoben werden. Die sonstigen Prüfbedingungen werden beibehalten, d.h. der Anprallwinkel beträgt 20° und die Anprallgeschwindigkeit 65 km/h.

Tabelle 50: Untersuchten Fälle in der Studie 13

Fahrzeugspezifikationen	Schutzeinrichtung Beton				Schutzeinrichtung Stahl			
	Fall C0	Fall C1	Fall C2	Fall C3	Fall S0	Fall S1	Fall S2	Fall S3
Gesamtmasse	38 t	22 t			38 t	22 t		
CGZ	1.8 m	1.8 m	2.1 m	2.4 m	1.8 m	1.8 m	2.1 m	2.4 m

Ergebnisse

Das Bild 68 zeigt die Momentaufnahmen der virtuellen Anprallversuche an der H4b Betonschutzwand bei $t=1,0$ s und $t= 2,5$ s. In Tabelle 51 ist ein Relativvergleich der dynamischen Durchbiegung und der Wirkungsbereiche dargestellt, der sich durch den jeweiligen Anprall ergibt. Die H4b Schutzeinrichtung ist in jedem Fall in der Lage, das Fahrzeug aufzuhalten. Jedoch kippt das Fahrzeug im Fall des auf 2,4 m erhöhten Beladungsschwerpunktes nach dem Anprall auf die Seite.

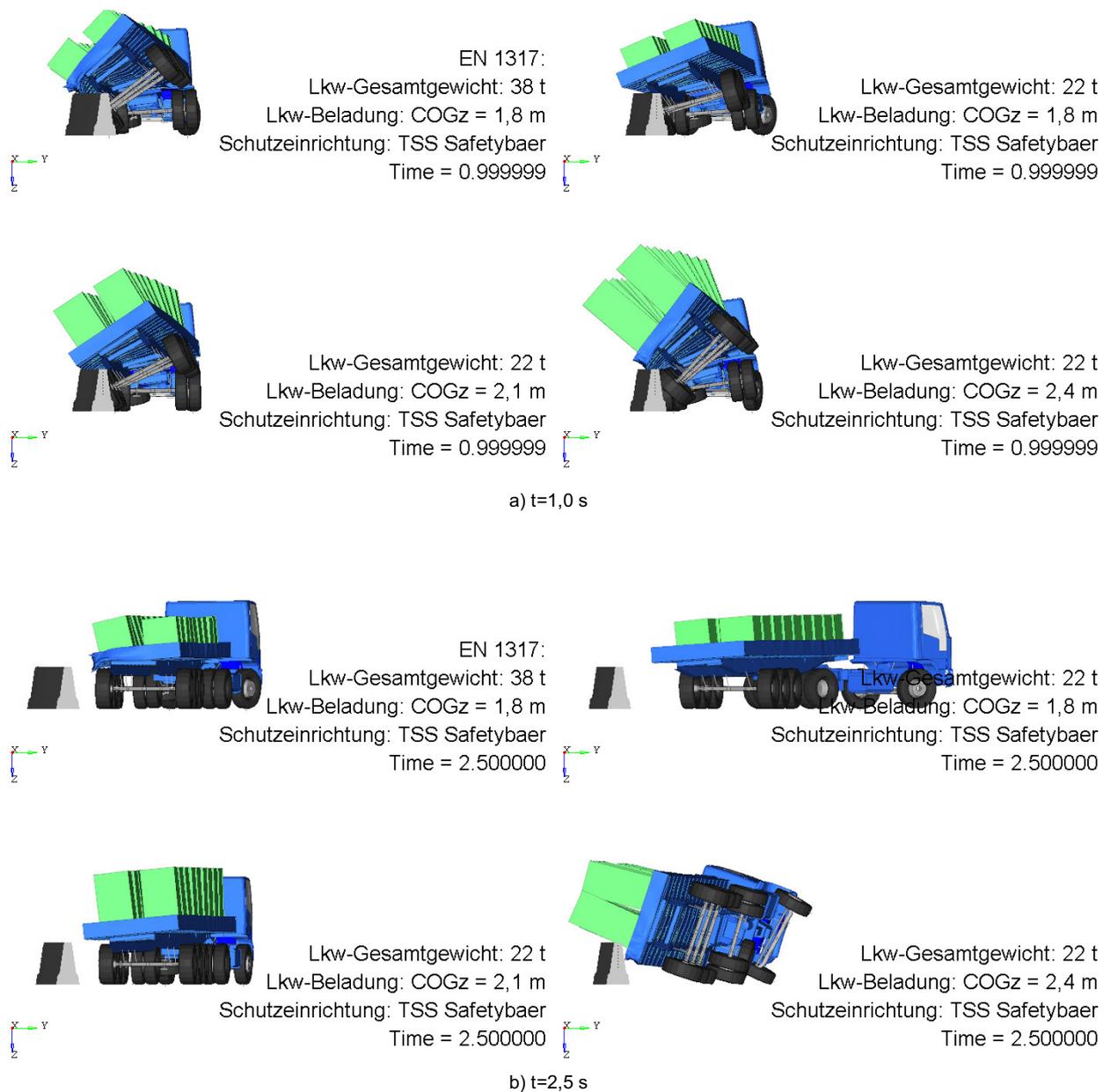
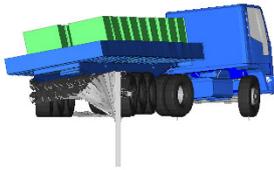


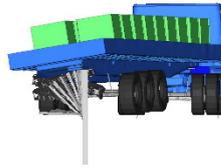
Bild 68: Simulationsergebnisse mit H4b Betonschutzwand

Tabelle 51: Ergebnisse des virtuellen Anprallversuchs an die Betonschutzwand

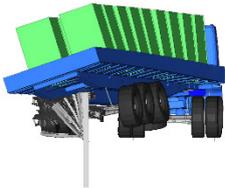
	Fall C0	Fall C1	Fall C2	Fall C3
Gesamtmasse	38 t	22 t		
COGz der Beladung	1.8 m	1.8 m	2.1 m	2.4 m
Aufhaltevermögen	Ja	Ja	Ja	Ja, (Fahrzeug kippt auf die Seite)
Dynamische Durchbiegung (relative Werte)	100%	-37%	-31%	-54%
Wirkungsbereich (relative Werte)	100%	-19%	-16%	-27%



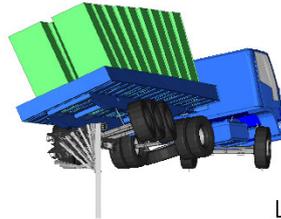
EN 1317:
Lkw-Gesamtgewicht: 38 t
Lkw-Beladung: COGz = 1,8 m
Schutzeinrichtung: Super-Rail
Time = 1.199999



Lkw-Gesamtgewicht: 22 t
Lkw-Beladung: COGz = 1,8 m
Schutzeinrichtung: Super-Rail
Time = 1.199999



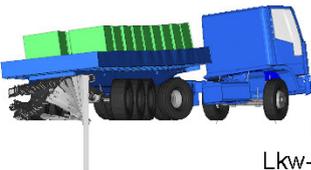
Lkw-Gesamtgewicht: 22 t
Lkw-Beladung: COGz = 2,1 m
Schutzeinrichtung: Super-Rail
Time = 1.199999



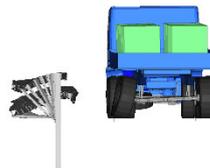
Lkw-Gesamtgewicht: 22 t
Lkw-Beladung: COGz = 2,4 m
Schutzeinrichtung: Super-Rail
Time = 1.199999



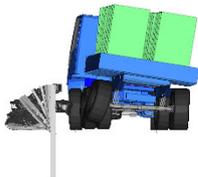
a) t=1,2 s



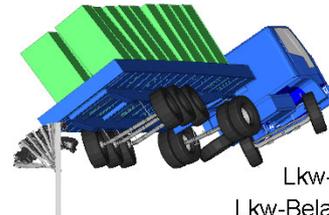
EN 1317:
Lkw-Gesamtgewicht: 38 t
Lkw-Beladung: COGz = 1,8 m
Schutzeinrichtung: Super-Rail
Time = 1.999998



Lkw-Gesamtgewicht: 22 t
Lkw-Beladung: COGz = 1,8 m
Schutzeinrichtung: Super-Rail
Time = 1.999998



Lkw-Gesamtgewicht: 22 t
Lkw-Beladung: COGz = 2,1 m
Schutzeinrichtung: Super-Rail
Time = 1.999998



Lkw-Gesamtgewicht: 22 t
Lkw-Beladung: COGz = 2,4 m
Schutzeinrichtung: Super-Rail
Time = 1.999998



b) t= 2,0 s

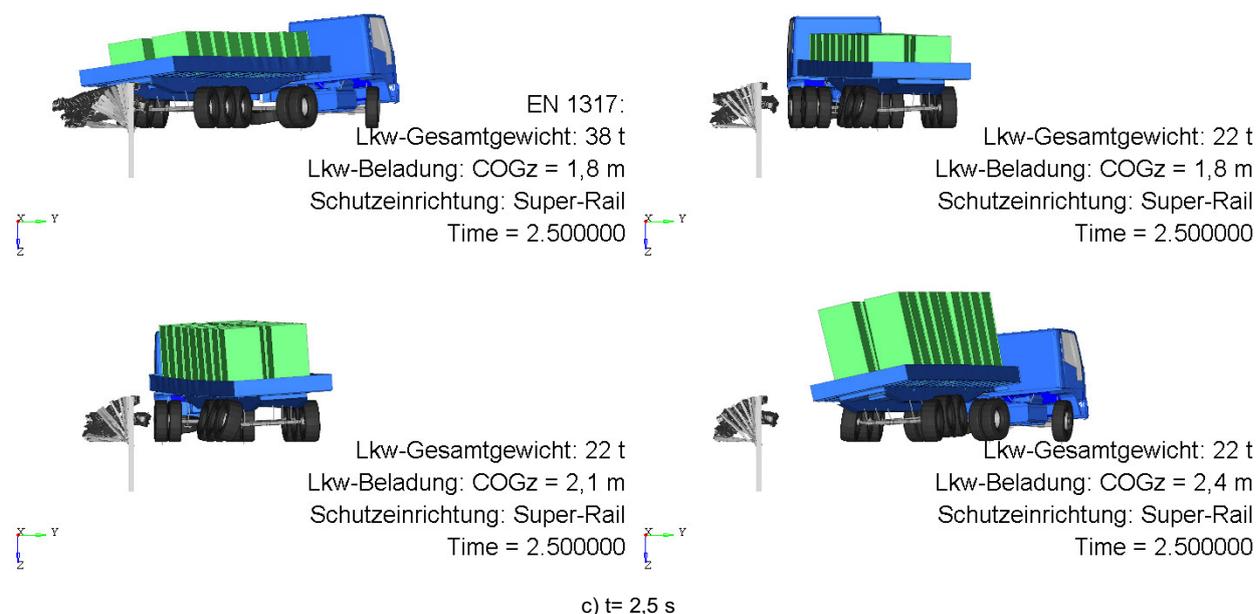


Bild 69: Simulationsergebnisse mit H4b Stahlschutzvorrichtung

Tabelle 52: Ergebnisse des Anpralls an die H4b Stahlschutzvorrichtung

Leistungsdaten	Fall S0	Fall S1	Fall S2	Fall S3
Gesamtmasse	38 t	22 t		
COGz der Beladung	1.8 m	1.8 m	2.1 m	2.4 m
Aufhaltevermögen	Ja	Ja	Ja	Ja
Dynamische Durchbiegung	100%	-35%	-39%	-34%
Wirkungsbereich	100%	-34%	-36%	-34%

Im Fall des Anprallversuchs des Lkw an der H4b Stahlschutzvorrichtung, dessen Verlauf im Bild 69 dargestellt ist, wird der Lkw unabhängig von seinem Beladungsschwerpunkt aufgehalten und sicher zurückgeleitet. Ein Umkippen auf die Fahrzeugseite ist hier nicht zu beobachten. Die Ergebnisse des Anpralls an die Stahlschutzvorrichtung sind in der Tabelle 52 zusammengefasst.

Die virtuellen Anprallprüfungen des Lkw mit der Gesamtmasse 22 t und 16,1 m Gesamtlänge bei erhöhtem Schwerpunkt der Beladung zeigen unterschiedliche Ausgänge für Beton und Stahl. Im Fall der Betonschutzwand kippt der Lkw ab einer bestimmten Höhe des Schwerpunkts, wohingegen dieses Verhalten bei der Stahlschutzvorrichtung nicht beobachtet werden kann. In den o.g. DEKRA Versuchen mit Lang-Lkw ist das Fahrzeugverhalten bei beiden Arten von Schutzvorrichtungen ähnlich.

6 Weiterentwicklungen und Empfehlungen

6.1 Weiterentwicklung von Simulationsmodellen von Anprallprüfungen bezüglich der numerischen Stabilität

Die Verifikation einer Anprall-Simulation beinhaltet u.a., dass die Gesamtenergie (TOTAL ENERGY) während des Anprallverlaufs konstant bleibt. Aufgrund der Verringerung der Geschwindigkeit des Fahrzeuges durch den Anprall an die Schutzvorrichtung erfolgt eine Abnahme der kinetischen Energie (KINETIC ENERGY). Sie geht über in die Verformungsenergie (INTERNAL ENERGY) der Schutzvorrichtung und der Fahrzeugkomponenten. Betrachtet man das System aus Schutzvorrichtung und Fahrzeug als physikalisch abgeschlossen, dann muss die Summe aus der kinetischen Energie und der Verformungsenergie konstant bleiben. Unter der Annahme, dass diese beiden Energieformen den weitaus größten Beitrag leisten, ist

diese Konstante die Gesamtenergie des Systems. Weitere Energieformen, wie z.B. Wärme, die durch Reibung entsteht, sind vernachlässigbar.

In der numerischen Behandlung des physikalischen Vorgangs eines Anpralls sind aufgrund der notwendigen Diskretisierung Maßnahmen erforderlich, die in der Natur nicht vorhandene Energieformen erzeugen. So z.B. gibt es Elemente, die sich in der Form einer Sanduhr verformen. Diese Elemente müssen künstlich steifer gemacht werden, um eine numerische Instabilität zu vermeiden. Die dabei aufgebrauchte Energie ist die sog. „HOURGLASS ENERGY“. Sie sollte, um das reale Verhalten nicht übermäßig zu beeinflussen, nur einen kleinen Bruchteil der Gesamtenergie ausmachen.

Eine weitere numerisch bedingte Energiekomponente ist die Kontaktenergie (SLIDING ENERGY), bestehend aus einer normalen und einer tangentialen Komponente. Die tangentielle Komponente beinhaltet die Reibung und ist physikalischer Natur. Die normale Komponente ist rein numerisch. Das Eindringen eines Knotens, einer Fläche oder eines Segmentes in ein anderes Element infolge des Anprallvorgangs wird verhindert, um einen Kontakt zweier Elemente zu simulieren. Der Algorithmus erkennt, wenn z.B. ein Knoten in eine Fläche eingedrungen ist, und drückt diese wieder an die Oberfläche. Dadurch entsteht eine Energieform, die nicht physikalisch ist, da in der Natur zwei aufprallende Materialien sich, makroskopisch gesehen, nur „berühren“, ohne einzudringen. Idealerweise ist die numerische Eindringtiefe gleich groß, wie die Entfernung zur Oberfläche. Aufgrund hochdynamischer Vorgänge kann es passieren, dass ein Knoten weiter herausgedrückt wird, als es ursprünglich eingedrungen ist. Dadurch kann eine negative Energiebilanz dieser Energiekomponente entstehen, die sich aufgrund sehr vieler solcher Einzelereignisse zu einem beträchtlichen Defizit aufsummieren kann.

Bei dieser Betrachtung ist es wichtig zu erwähnen, dass die Anprallprüfungen an Fahrzeugrückhaltesysteme einen relativ langen Kontakt zwischen Fahrzeug und Schutzeinrichtung beschreiben, der im Bereich von einigen Zehnteln einer Sekunde liegt. Die hier verwendete Software LS-DYNA ist für gewöhnliche Crashsimulationen an Fahrzeugen in der Fahrzeugsicherheit ausgelegt. Der Kontakt bei dieser Art von Simulationen dauert in der Regel nur etwa 50 ms. Zudem ist der Aufprall überwiegend frontal, das bedeutet, das sich bewegende Element hat vorwiegend eine normale Komponente zu dem Hindernis und die Reibung kann meist vernachlässigt werden. Somit besteht bei den Simulationen der Anprallprüfungen an Fahrzeugrückhaltesystemen die Herausforderung, dass sich diese in der Zeitdauer und in der Aufprallrichtung deutlich von den üblichen Crashsimulationen in der Fahrzeugtechnik unterscheidet und daher an die besondere Situation angepasst werden muss.

Folgende Vorgehensweise stellte sich als empfehlenswert heraus: Es ist zunächst der häufigere Fall zu prüfen, der in diesen Simulationsmodellen auftreten kann, ob sog. „initial penetrations“, also Fehler in der Modellierung bezüglich sich gegenseitig durchdringender Elemente zum Anfangszeitpunkt des Simulationsdurchlaufs vorkommen. Die hier benutzte Software LS-DYNA bietet die Möglichkeit einer Kompensation durch einen Algorithmus an. Ist dadurch das Problem der negativen Energie nicht gelöst, so muss eine tiefere Untersuchung stattfinden, wobei die Parameter nach jedem Durchlauf der Simulation angepasst werden, bis eine Besserung eintritt. Dieser Schritt kann aufgrund der Komplexität des Problems zeitlich sehr aufwändig sein. Es ist daher unbedingt vorher abzuwägen, mit welcher Genauigkeit die Ergebnisse versehen sein müssen.

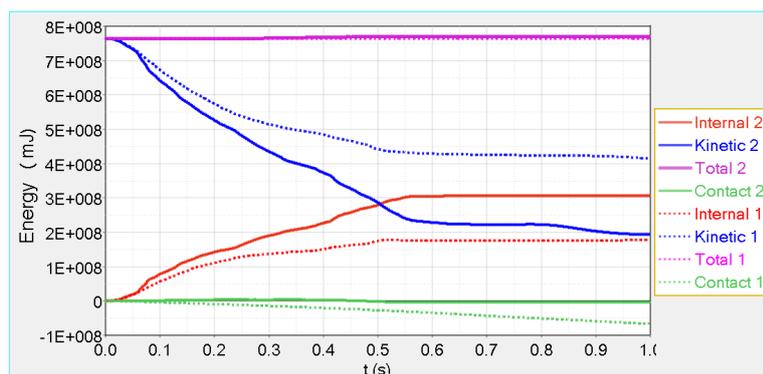


Bild 70: Energieentwicklungen während des Anpralls des Gesamtmodells C in diesem Bericht (2) und der unveränderten Version (1) des Modells aus Meywerk et. al. [5].

In Bild 70 sind die Energieentwicklungen während des Anpralls des Gesamtmodells C (Abschn. 4.3) vor und nach der Parameteranpassung dargestellt. Die Kurven geben die zeitliche Entwicklung während des Anprallvorgangs folgender Größen wieder: Die Gesamtenergie (Total 1 und Total 2 entspr. den Versionen 1 und 2) in Magenta, die kinetische Energie (Kinetic 1 und Kinetic 2) in Blau, die Verformungsenergie (Internal 1 und Internal 2) in Rot und die numerisch bedingte Kontaktenergie (Contact 1 und Contact 2) in Grün. Der Unterschied zwischen den beiden Versionen besteht darin, dass im Gesamtmodell ein Wechselwirkungsalgorithmus für den Kontakt zwischen Fahrzeug und Schutzeinrichtung (*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE) und die zur Verfeinerung benötigten Einstellparameter IGNORE=1, VDC=10, SST=MST=0.6, SOFT=1, DEPTH=3, SBOPT=0 ausgesucht wurden, die dem relativ langen, gleitenden Kontakt zwischen Fahrzeug und Schutzeinrichtung angepasst sind. In dieser neuen Version ist ab einem Zeitpunkt von ca. 50 ms eine Diskrepanz der zeitlichen Verläufe der Energien erkennbar. Die Verformungsenergie nimmt deutlich stärker zu, und infolge dessen nimmt die kinetische Energie entsprechend stärker ab. Dadurch ergeben sich auch Änderungen der dynamischen Durchbiegung und der Anprallheftigkeit. In den Bildern 71 und 72 sind diese im zeitlichen Verlauf von der älteren und der neueren Version (Simulation 1 bzw. Simulation 2) dargestellt. Die dynamische Durchbiegung ist in der neuen Version (Simulation 2) etwas erhöht, entsprechend der hier größeren Verformung. Die Erhöhung der Verformungsenergie und die stärkere Abnahme der kinetischen Energie in der Simulation 2 erklärt auch die Zunahme der Fläche unter der Anprallheftigkeitskurve. Bis zum Zeitpunkt von 0,1 s nach dem ersten Anprall sind die Verläufe sehr ähnlich. Erst danach beginnt die Diskrepanz der Kurven. Ist man an einer präzisen Vorhersage bei späteren Zeitpunkten interessiert, so muss eine entsprechende numerische Stabilität, wie oben beschrieben, vorhanden sein. Zusätzlich sollten die in Tabelle 53: Energietypen im Verhältnis zur Gesamtenergie (wie in prEN163032 gefordert) aufgeführten Energiekomponenten im Verhältnis zur Gesamtenergie oder der inneren Energie die dort angegebenen Grenzwerte erfüllen (wie auch in EN 16303 [6] gefordert). Gegebenenfalls kann es notwendig sein, die Masse von einzelnen Elementen künstlich zu erhöhen, um Algorithmen-interne Optimierungen vorzunehmen. Dies geschieht entweder automatisch durch den Lösungsalgorithmus oder manuell. Da solche Eingriffe das Ergebnis ändern können, sind vorgegebene Grenzen zu beachten.

Bild 71: Zeitliche Entwicklung der dynamischen Durchbiegung des älteren und des weiterentwickelten Simulationsmodells

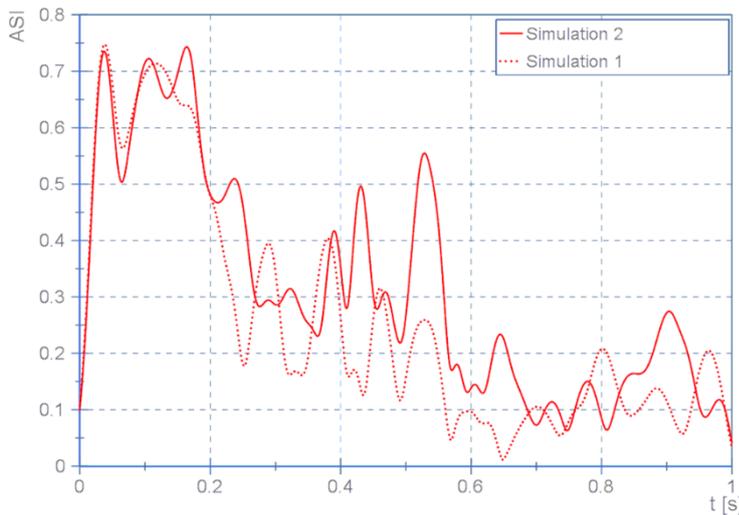
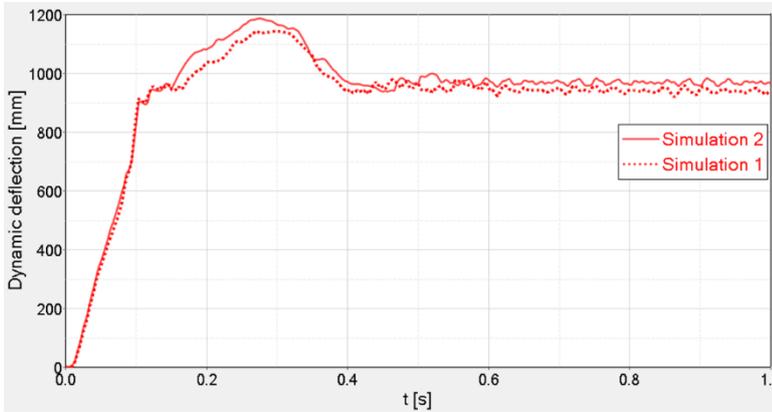


Bild 72: Zeitlicher Verlauf der Anprallheftigkeit (Insassenbelastung) des älteren und des weiterentwickelten Simulationsmodells

Tabelle 53: Energietypen im Verhältnis zur Gesamtenergie (wie in prEN16303² gefordert)

Komponente	ratio [%]	Bezogen auf
Gesamtenergie	≈100	Gesamtenergie
Kontakt-Energie	< 2	Innere Energie
Hourglass-Energie	< 6	Gesamtenergie
Hourglass-Energie	< 15	Innere Energie
Hourglass-Energie pro Bauteil	< 3	Innere Energie pro Bauteil
Hinzugefügte Masse	< 2.5	Gesamtmasse
Hinzugefügte Masse pro Bauteil	< 20	Gesamtmasse des Bauteils

6.2 Eignung von Simulationsmodellen für verschiedene Anwendungsbereiche

Die bei der Erstellung der hier aufgeführten Simulationsmodelle und durchgeführten Studien gesammelten Erfahrungen deuten darauf hin, dass die Simulation in den Bereichen besonders gut anwendbar ist, wo eine hohe zeitliche Auflösung und eine in alle drei Raum-Dimensionen notwendig wird, oder eine unmittelbare Kontrolle von Eingangsparametern für die Beantwortung einer speziellen Fragestellung herangezogen werden muss. So kann z.B. ein Anprall in einem Simulationsmodell aus beliebigen Richtungen betrachtet

werden, während man bei realen Anprallversuch auf die zuvor festgelegten Kamerapositionen beschränkt ist. Modellierungs- und Rechenzeit einer Simulation sind davon abhängig, welche Ansprüche man an die Genauigkeit und Vollständigkeit der Ergebnisse stellt. Würde man ein Simulationsmodell ganz realitätsgetreu und ohne vereinfachende Annahmen erstellen, dann würde das die benötigten Kapazitäten dermaßen in die Höhe treiben, dass eine praktische Anwendung ausgeschlossen ist. Ein praktisch durchführbares Simulationsmodell zu erstellen, bedeutet auch immer die Annahmen so zu treffen, dass hinsichtlich der Verhältnismäßigkeit des Aufwandes die Simulationsergebnisse so genau, wie möglich bleiben.

Vom wirtschaftlichen Gesichtspunkt aus betrachtet muss das Hinzuziehen der Simulation zu realen Anprallprüfungen stets einer Abwägung relativ zum Erkenntnisgewinn durch eine virtuelle Untersuchung und zum erforderlichen Validierungsgrad standhalten. Statt der Durchführung von mehreren realen Anprallprüfungen ist zwar nur eine reale Anprallprüfung zur Validierung des Simulationsmodells notwendig. Die Testserie kann dann virtuell durchgeführt werden. Die Zeit- und Kostenersparnis muss jedoch von Fall zu Fall abgeschätzt werden. Denn die erforderlichen Genauigkeiten und Vorhersagefestigkeiten der Simulationsergebnisse könnten unter Umständen unter dem Strich aufwändiger sein, als die Durchführung von mehreren realen Anprallprüfungen. Die Entscheidung für den Einsatz von Simulationstechniken bei der Untersuchung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Abkommunfällen muss individuell erfolgen, da sie von der Größe und Komplexität des Modells, dem zeitlichen Ablauf, dem Grad an zu erwartenden Verformungen und Beschleunigungen abhängig ist.

Andererseits besteht der Vorteil bei der Bearbeitung von verkehrssicherheitstechnischen Fragestellungen in Zusammenhang mit Fahrzeuggückhaltesystemen und anderen passiven Gegenständen der Straßenausstattung mithilfe der Simulation, dass viele sehr spezielle Sonderfälle behandelt werden können, für die sonst ein eigens dafür aufgebautes Testfeld (z.B. Böschung) notwendig wäre. Oftmals wäre das zu aufwendig, so dass auf reale Versuche eher verzichtet würde. Mithilfe der Simulation können ähnliche Studien relativ einfach vervielfältigt und modifiziert, oder eine bereits durchgeführte Studie noch einmal zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgegriffen werden, um zusätzliche Fragen beantworten zu können, oder die Aussagegenauigkeit zu präzisieren. Die Kosten hierfür würden durch das schon vorher erstellte Grundmodell deutlich gesenkt werden. Kurz gesagt, der intelligente Einsatz der Simulation unter Berücksichtigung der oben genannten Punkte führt zu einem direkten wirtschaftlichen Vorteil, wobei zeitlich flexiblere und kostengünstigere Optionen mit weniger Randbedingungen ausgeschöpft werden können.

Bei der Beurteilung einer Simulation, ob selbst durchgeführt, oder durch die Begleitung von externen Forschungsprojekten oder Beauftragungen entstanden, muss beachtet werden, dass eine lückenlose Dokumentation ein wesentlicher Aspekt für das Vertrauen in die Richtigkeit der so gewonnenen Ergebnisse darstellt, wobei besonderes Augenmerk auf die getroffenen Annahmen des Simulationsmodells zu richten ist. Die Kenntnis aller Details liegt jedoch allein bei der die Simulation durchführenden Person. Idealerweise befähigt die Dokumentation und Offenlegung der digitalen Beschreibung des Simulationsmodells zu einer Reproduktion durch eine unabhängige, beurteilende Seite. Nur durch diesen unabhängigen Vergleich können alle Fragen geklärt werden, die zu einer Annahme oder einer Ablehnung der Ergebnisse führen.

7 Zusammenfassung

Es wurden vierzehn umfangreiche Simulationsmodelle aufgebaut, an realen Anprallprüfungen validiert, und Simulationsstudien durchgeführt und ausgewertet, die einerseits auf beispielhafte Weise demonstrieren sollen, wie breit gefächert die Simulation in der Beurteilung von Fahrzeugrückhaltesystemen bezüglich der Funktionsweise und des Einsatzbereichs zum Zuge kommen kann. Die Genauigkeit dieser Simulationsmodelle bezüglich der Vorhersagen stand dabei nicht im Vordergrund. Nichtsdestotrotz entstanden auf dieser Grundlage qualitative und relative Formulierungen, die im weiteren, zukünftigen Forschungsprojekten wertvolle Hinweise geben können. Im Entwicklungsstadium von besonders groß angelegten Forschungsprojekten kann die Effektivität für den Gesamtaufwand dadurch gesteigert werden, dass von einer hohen Genauigkeit und einem hohen Validierungsgrad in dieser Projektphase abgesehen wird, um dann in einer späteren Phase mit entsprechend höherem Aufwand das Vertrauensniveau zu erhöhen.

Andererseits konnte mit den Simulationsstudien gezeigt werden, dass durch eine zeitlich und fachlich intensive Auseinandersetzung mit den numerischen Eigenheiten der Simulation in dem sehr speziellen Bereich der Fahrzeugrückhaltesysteme die Genauigkeit der Vorhersage der Leistungsdaten einer Schutzeinrichtung - insbesondere die Vorhersage der Anprallheftigkeit und Insassenbelastung des anprallenden Fahrzeuges - in Präzision und zeitlicher Entfernung zum ersten Anprall erheblich gesteigert werden kann. Dadurch ist es möglich, Untersuchungen mit höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung zu betrachten und feinere Unterschiede in Parameterstudien zu erkennen. Die so gemachten Erfahrungen und erworbenen Kenntnisse können in Zukunft auf weitere Simulationsmodelle angewendet werden.

Die Studien 1 und 2 beschäftigen sich mit der Auswirkung variierender Prüfbedingungen (Anprallpunkt bzw. Anprallwinkel) auf Anprallvorgänge von Stahlschutzplanken. Die Studie 1 legt nahe, dass der Anprall an den Pfosten zur höchsten Anprallheftigkeit führt, während der Anprall um die Mitte des Holms die größte seitliche Verformung der Schutzeinrichtung bewirkt. Dieses Ergebnis bestätigt die Vorgehensweise bei Anprallprüfungen den Anprallpunkt so zu wählen, dass ein extremes Verhalten des Fahrzeug-Rückhaltesystems zu erwarten ist. In der Studie 2 wird das Verhalten der Schutzeinrichtung und eines Lkw unter einem Anprallwinkel bewertet, welcher von dem in Anprallprüfungen festgelegten Winkel abweicht, und es wird eine nur geringfügige Sicherheitsreserve der Schutzeinrichtung festgestellt.

Die Studien 3, 4, 5 und 6 befassen sich mit den Auswirkungen von unterschiedlichen, nicht standardmäßigen, situationsbedingten Einbaugeometrien (Einbauhöhe oder Neigung der Schutzeinrichtung), oder Veränderungen der Umgebung nach dem Einbau der Schutzeinrichtung und folglich eine veränderte Geometrie der Schutzeinrichtung relativ zur Fahrbahn. Hierbei werden die Stahlschutzplanken ESP 4.0 und EDSP 2.0 und die Prüfbedingungen mit einem leichten (TB 11) und einem schweren Fahrzeug (TB 42) verwendet. Es stellt sich heraus, dass die virtuell geprüften Systeme in einem relativ weiten Bereich unempfindlich sind gegenüber Höhenschwankungen oder Veränderungen der Neigung.

Die Studie 7 bearbeitet die Fragestellung, ob die Aufstellung einer Schutzeinrichtung in einer Kurve ihre Leistungsdaten wesentlich verändert. Es werden Untersuchungen an Kurvenradien durchgeführt, die an Landstraßen in Deutschland typischerweise vorkommen. Ein Durchbruch der untersuchten Einfachen Schutzplanke, die mit einem 1635 kg schweren Fahrzeug angeprallt wird, ist nicht zu erwarten. Die Insassenbelastung kann sich jedoch erheblich steigern.

Die Studie 8 zeigt, dass die ESP 2.0, die mit einer Aufhaltstufe N2 geprüft wurde, auch in der Lage sein kann, einen Lkw aufzuhalten. Obwohl hier eine wesentliche Änderung des validierten Modells vorliegt, dass nämlich statt einem Pkw ein Lkw zum Einsatz kommt, und somit ein ausschließlich virtueller Nachweis der Leistungsfähigkeit nicht ausreicht, kann diese Prüfung trotzdem ein Hinweis auf ein unterschätztes Aufhaltvermögen der ESP 2.0 sein, die mit realen Prüfungen belegt werden könnte.

Die Studie 9 ersetzt ein, aus Erfahrungswerten abgeschätztes Verhalten eines leichten Fahrzeuges bei einem Anprall an eine verkürzt aufgebaute Einfache Distanzschutzplanke (EDSP 2.0). Da eine reale Prüfung bisher nur mit einem Lkw vorliegt, wurde eine TB 11 Prüfung virtuell nachgeholt.

In der Studie 10 wird untersucht, wie eine EDSP 2.0 sich verhalten würde, wenn ein Lieferwagen mit 2200 kg Gesamtgewicht aufgehalten werden müsste. In Anprallprüfungen ist dieser Fahrzeugtyp nicht vorgesehen, beantwortet aber aufgrund der hohen Anzahl solcher Fahrzeuge auf deutschen Straßen eine berechtigte Fragestellung im Rahmen der Verkehrssicherheitsarbeit.

In der Studie 11 wird überprüft, inwieweit ein erhöhtes Aufhaltevermögen der EDSP 2.0 gegenüber einem 22-t Sattelzug besteht. Die Simulation zeigt jedoch hier ein negatives Ergebnis. Damit liegt eine quantitative Abschätzung der Leistungsgrenze der EDSP 2.0 vor.

Die Studie 12 ist ähnlich, wie die Studie 9, ein virtueller Nachweis eines zuvor aus Erfahrungswerten abgeschätzten Verhaltens. Hierbei bezieht sich die Untersuchung auf das Fahrzeugverhalten bezüglich der Anprallheftigkeit und des Wirkungsbereichs einer modifizierten Übergangskonstruktion zur Verbindung der Schutzeinrichtungen ESP und EDSP.

Die Studie 13 untersucht das Verhalten von einem Sattelzug, dessen Schwerpunkt schrittweise von 1,8 m auf 2,4 m über Fahrbahnoberkante erhöht wird, beim Anprall an eine Beton- und eine Stahlschutzeinrichtung. Bei einem hohen Beladungsschwerpunkt ist der Sattelzug in beiden Fällen einem erhöhten Risiko des Umkippen ausgesetzt.

Der Vorgang der Validierung des Simulationsmodells einer Anprallprüfung, d.h. ein Abgleich des numerisch Errechneten mit dem physikalischen Prozess unter dem Einsatz von realen Materialien ist eine *conditio sine qua non* für vertrauenswürdige Vorhersagen der Simulation. Mit anderen Worten, eine Theorie (Simulationsmodell) kann nur dann als ohne Zweifel gerechtfertigt gelten, wenn ein entsprechender experimenteller Nachweis (Anprallprüfung) erbracht wurde. Zusätzlich bedarf es einer Verifizierung, die sicher stellt, dass das Simulationsmodell selbst ein realitätsgetreues Abbild der Wirklichkeit darstellt.

Eine numerische Simulation ist immer ein Kompromiss zwischen der Genauigkeit ihrer Vorhersagen und der Komplexität des Modells. Diese beiden Punkte müssen von Fall zu Fall bewertet und optimiert werden, um den Zeit- und Kostenaufwand zu minimieren, und die vorliegende Fragestellung gleichzeitig befriedigend beantworten zu können. Das Vertrauen in eine Simulation ist immer von der numerischen Genauigkeit und ihrem Validierungsgrad abhängig. Jede Modifikation eines bereits validierten Simulationsmodells, das können statische Veränderungen an einzelnen Bauteilen, Materialeigenschaften oder Materialmodelle sein, oder dynamische Veränderungen der Geschwindigkeit oder Winkel des Anpralls, des Anprallpunktes usw., bedeutet auch immer eine Abweichung des Verhaltens von den durch Validierung gesicherten Werten (z.B. Leistungsdaten eines Fahrzeugrückhaltesystems in der realen Anprallprüfung). Ist die Modifikation klein genug, sodass das Ergebnis der Simulation von dem der bereits validierten nicht zu stark abweicht, kann eine Aussage unter dem Zusatz getroffen werden, dass es sich um eine theoretische Vorhersage mit entsprechender, numerischer Genauigkeit handelt. Eine Abwägung der benötigten Sicherheiten (insbesondere in Anwendungsbereichen, die die Verkehrssicherheit betreffen) ist zu prüfen und, falls Zweifel bestehen, der reale Versuch vorzuziehen.

8 Ausblick

Die FEM Simulation bietet für die Forschung und unterstützende Bearbeitung von Fragestellungen bezüglich Fahrzeug-Rückhaltesystemen einen großen Vorteil. Einerseits, als Ergänzung zu realen Anprallprüfungen, können durch ein Simulationsmodell wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Aber auch in der Verkehrssicherheitsarbeit können aktuelle Aspekte eingehender bearbeitet werden. Typische Situationen im Straßennetz können mit der Simulation nachgebildet werden, um zu untersuchen, wie sich die unter standardisierten Bedingungen geprüften Schutzeinrichtungen in der Praxis verhalten.

So ist es z.B. möglich, ein Abkommen von der Straße in Gegenwart einer ansteigenden Böschung zu untersuchen und zu bewerten. Der aufwändige Aufbau eines eigens dafür konzipierten Testgeländes fällt in der ersten Phase der Untersuchungen weg. Gegebenenfalls kann das Simulationsmodell eine Entscheidungsgrundlage dafür geben, ein Testgelände mit den entsprechenden Randbedingungen zu planen.

Neue Fahrzeuge mit alternativen Konzepten zur nachhaltigen Mobilität werden mittelfristig in erhöhter Zahl auf deutschen Straßen unterwegs sein. Sie weichen wesentlich von den nach der Norm EN 1317 [2] für die Fahrzeuge festgelegten Prüfbedingungen ab. Sie haben eine erhöhte Masse oder einen anderen Schwerpunkt, was ein anderes Fahrzeugverhalten erwarten lässt. Die Simulation gibt hier die Möglichkeit vorhandene, schon validierte Modelle zu nutzen, um die veränderten Parameter zu implementieren und etwaige Änderungen am Verhalten des Anpralls und des Fahrzeug-Rückhaltesystems abzuleiten.

Der Einsatz der FEM-Simulation bei der wissenschaftlichen Untersuchung von Fragestellungen zu Fahrzeugrückhaltesystemen hat sich als besonders gut geeignet herausgestellt. Sie kann insbesondere bei den

aktuellen Fragestellungen im Hinblick auf die gestiegenen Anforderungen von Fahrzeugrückhaltesystemen eine zufriedenstellende Antwort geben, die Ergebnisse in angemessener Zeit hervorbringen und auch bei einer umfangreichen Versuchsreihe in einem moderaten Kostenrahmen bleiben.

Gleichzeitig gilt es, die wissenschaftlichen Erkenntnisse und Randbedingungen in die europäischen Normen und nationalen Regelwerke so zu integrieren, dass die Simulation zielgerichtet für die Verbesserung der Verkehrssicherheit, z.B. durch Ergänzung der realen Anprallprüfungen durch Simulationen für weitere Anprallszenarien, eingesetzt wird.

Literatur

- [1] „GENESIS-Online Datenbank des Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021 | Stand: 04.08.2021,“ Lizenztext unter www.govdata.de/dl-de/by-2-0, 2021 | Stand: 04.08.2021 Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0 .
- [2] European Committee for Standardization, EN 1317 Road restraint systems - Part 1,2,3 and 5, Brüssel.
- [3] A. S. Martin Meywerk, „Simulation von Anprallprüfungen nach EN 1317 (Forschungsprojekt FE 82.0356, unveröffentlichter Abschlussbericht),“ 2012.
- [4] U. Freundt, C. Könke, D. Michael und A. Schmidt, „Simulation von dynamischen Anprallvorgängen an Fahrzeugrückhaltesystemen-Parameteranalyse des dynamischen Systemverhaltens (Forschungsprojekt FE 03.0487, unveröffentlichter Abschlussbericht),“ Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, 2015.
- [5] M. Meywerk und J. Kraft, „Simulation von dynamischen Anprallvorgängen an Fahrzeugrückhaltesystemen, Wissenschaftliche Betrachtung der Grenzen und Möglichkeiten (Forschungsprojekt FE 03.0488, unveröffentlichter Abschlussbericht),“ Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2014.
- [6] European Committee for Standardization, CEN/TR 16303 Road restraint systems - Guidelines for computational mechanics of crash testing against vehicle restraint system - Part 1-4, Brüssel, 2012.
- [7] „Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (RPS),“ FGSV, Köln, 1989.
- [8] „Technische Lieferbedingungen für Stahlschutzplanken (TL-SP 99),“ FGSV, Köln, 1999.
- [9] U. Ellmers, M. Balzer-Hebborn, J. Fleisch, H. Friedrich, R. Keppler, G. Lukas, W. Schulte, R. Seliger, „Eignung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen gemäß den Anforderungen nach DIN EN 1317, V 106,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2003.
- [10] R. Klöckner, J. Fleisch unter Mitarbeit von M. Balzer-Hebborn, U. Ellmers, H. Friedrich, J. Kübler, G. Lukas, „Prüfung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen an Straßen durch Anprallversuche gemäß DIN EN 1317, Heft V157,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2007.
- [11] L. Meisel unter Mitwirkung von M. Balzer-Hebborn, U. Ellmers, I. Jungfeld, H. Klostermeier, J. Kübler, S. Schmitz, H. Schwedhelm, X. Yu, „Anprallprüfungen an Fahrzeug- Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen, V 328,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2020.
- [12] BASt, „Technische Übersichtsliste für Fahrzeug-Rückhaltesysteme in Deutschland.,“ 2022. [Online]. Available: www.bast.de.
- [13] H. Schwedhelm, I. Jungfeld und X. Yu, „Impact of new vehicle configurations on road equipments, above all safety barriers,“ Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, Vienna, Austria, 2018.
- [14] BASt, „Dokumente: Fahrzeug-Rückhaltesysteme,“ <https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Qualitaetsbewertung/Dokumente/Dokumente.html>.
- [15] M. Gärtner und M. Egelhaaf, „Anprall von Pkw unter großen Winkeln gegen Fahrzeugrückhaltesystem,“ Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach, August 2010.
- [16] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fahrzeug-Rückhaltesysteme“ Ausgabe 2013*, 2017.

- [17] B. Fröhlich, „Virtual testing of curved vehicle restraint systems,“ in *12th European LS-DYNA Conference*, https://www.dynalook.com/conferences/12th-european-ls-dyna-conference-2019/restraint-systems/froehlich_bast.pdf, Koblenz, 2019.
- [18] *Statistisches Bundesamt, Unfallentwicklung auf deutschen Straßen*, 2017.
- [19] DEKRA, „Untersuchungen zum Verhalten von Lang-Lkw beim Anprall an Schutzeinrichtungen aus Beton.,“ https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-lang-lkw/Berichte/Berichte_node.html, Stuttgart, 2014.
- [20] DEKRA, „Untersuchungen zum Verhalten von Lang-Lkw beim Anprall an Schutzeinrichtungen aus Stahl.,“ https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-lang-lkw/Berichte/Berichte_node.html, Stuttgart, 2014.

Tabellen

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten FRS	13
Tabelle 2: Materialparameter für die ESP 4.0	14
Tabelle 3: Versagenskriterien der Schrauben [5]	14
Tabelle 4: Modellaufbau der ESP 4.0	15
Tabelle 5: Modellaufbau der ESP 2.0 (inklusive 12 m-Regelabsenkungen)	16
Tabelle 6: Modellaufbau der EDSP 2.0 (inklusive Regelabsenkungen)	16
Tabelle 7: Modellaufbau der ÜK ESP 4.0- EDSP 2.0	17
Tabelle 8: Modellaufbau der ÜK ESP 2.0- EDSP 2.0	18
Tabelle 9: Materialparameter für die Schalen-Elemente der H4b Stahlschutzeinrichtung.....	20
Tabelle 10: Materialparameter für die Balkenelemente der Schraubverbindungen	20
Tabelle 11: Schraubverbindungen der H4b-Stahlschutzeinrichtung mit gewählten Parametern für Balkenelemente	21
Tabelle 12: Übersicht des Modellaufbaus der H4b Stahlschutzeinrichtung	22
Tabelle 13: Materialparameter für den Beton	23
Tabelle 14: Materialparameter für die Bewehrung B500B	23
Tabelle 15: Modellaufbau der H4b Ortbetonschutzeinrichtung	24
Tabelle 16: Fahrzeugeigenschaften des Pkws mit 900 kg	24
Tabelle 17: Modellaufbau des Pkws mit 900 kg	25
Tabelle 18: Physikalische Eigenschaften des Pkws mit 1500 kg	25
Tabelle 19: Übersicht des Modellaufbaus des Pkws mit 1500 kg.....	26
Tabelle 20: Physikalische Eigenschaften des Lieferwagens mit 2200 kg.....	26
Tabelle 21: Übersicht des Modellaufbaus des Lieferwagens mit 2200 kg	26
Tabelle 22: Physikalische Eigenschaften des Lkws mit 10 t	27
Tabelle 23: Übersicht des Modellaufbaus des Lkw mit 10 t	27
Tabelle 24: Eigenschaften des Sattelzuges mit 38 t.....	28
Tabelle 25: Übersicht des Modellaufbaus des Sattelzugs mit 38 t.....	28
Tabelle 26: Gesamtmodelle - Kombinationen von Fahrzeug und Fahrzeugrückhaltesystem.....	29
Tabelle 27: Anprallparameter und Ergebnisse von Prüfung und Simulation (Gesamtmodell A).....	39
Tabelle 28: Vergleich der Leistungsdaten der Anprallprüfung und der Simulation (Gesamtmodell B).....	41
Tabelle 29: Vergleich der Leistungsdaten der Anprallprüfung und der Simulation (Gesamtmodell C)	43
Tabelle 30: Vergleich der Leistungsdaten der Anprallprüfung und Simulation (Gesamtmodell G)	44
Tabelle 31: Vergleich der Leistungsdaten von Anprallprüfung und Simulation (Gesamtmodell H).....	47
Tabelle 32: Vergleich der Leistungsdaten der Anprallprüfung und Simulation (Gesamtmodell J)	49
Tabelle 33: Vergleich der Leistungsdaten der Anprallprüfung und Simulation (Gesamtmodell M).....	51
Tabelle 34: Vergleich der Leistungsdaten der Anprallprüfung und Simulation (Gesamtmodell N)	53
Tabelle 35: Übersicht der Studien und verwendete Modelle (Gesamtmodelle A-N aus Abschnitt 4).....	55
Tabelle 36: Simulationsmatrix der Studie 1.....	56
Tabelle 37: Ergebnisse der Simulationsläufe unter verschiedenen Anprallwinkeln mit detaillierten Angaben zu Fahrzeugverhalten, Verformung der Schutzeinrichtung und Anprallheftigkeit.....	58
Tabelle 38: Ergebnisse der Simulationsläufe unter verschiedenen Anprallwinkeln mit detaillierten Angaben zu Fahrzeugverhalten, Verformung der Schutzeinrichtung und Anprallheftigkeit.....	60
Tabelle 39: Untersuchte Fälle der Studie 3 (Parameterstudie Variation Höhe ESP 4.0).....	62
Tabelle 40: Untersuchte Einbauhöhen der EDSP 2.0.....	64
Tabelle 41: Untersuchte Fälle in der Studie 5	66
Tabelle 42: Anprall des Lkw an die EDSP 2.0 mit Neigung	68
Tabelle 43: Gerade Schutzeinrichtung als Referenzmodell und Variation der Krümmungsradien der Schutzeinrichtung.....	69
Tabelle 44: Leistungsdaten der ESP 2.0 in Kurven mit Krümmungsradius R.....	70
Tabelle 45: Leistungsdaten der TB 42 für ESP 2.0.....	71
Tabelle 46: Der Vergleich der Leistungsdaten der TB 11 für die EDSP 2.0 mit verschiedenen Aufbaulängen.....	75
Tabelle 47: Leistungsdaten der EDSP beim Anprall mit dem Lieferwagen.....	76

Tabelle 48: Vergleich der quantitativen Kriterien der TB 11 für ÜK "ESP 4.0 -EDSP 2.0" und ÜK "ESP 2.0 - EDSP 2.0" 83

Tabelle 49: Vergleich der quantitativen Kriterien der TB 32 für ÜK "ESP 4.0 -EDSP 2.0" und ÜK "ESP 2.0 - EDSP 2.0" 85

Tabelle 50: Untersuchten Fälle in der Studie 13..... 86

Tabelle 51: Ergebnisse des virtuellen Anprallversuchs an die Betonschutzwand..... 87

Tabelle 52: Ergebnisse des Anpralls an die H4b Stahlschutzeinrichtung..... 89

Tabelle 53: Energietypen im Verhältnis zur Gesamtenergie (wie in prEN16303² gefordert) 92

Bilder

Bild 1: Finite-Elemente-Modell der ESP 4.0	15
Bild 2: Finite-Elemente-Modell der ESP 2.0	16
Bild 3: Finite-Elemente-Modell der EDSP 2.0.....	17
Bild 4: Finite-Elemente-Modell der Übergangskonstruktion ESP 4.0 - EDSP 2.0	18
Bild 5: Finite-Elemente-Modell der Übergangskonstruktion ESP 2.0 - EDSP 2.0	19
Bild 6: Schraubenmodellierung bei der H4b-Stahlschutzeinrichtung.....	20
Bild 7: Skizze der Schraubenverbindung von H4b Stahlschutzeinrichtung.....	21
Bild 8: Ausschnitt aus dem Modell der H4b Stahlschutzeinrichtung in der An- und Draufsicht sowie im Querschnitt	22
Bild 9: Modell der H4b Ortbetonschutzwand im Querschnitt.....	23
Bild 10: Finite-Element-Modell des 900 kg schweren Fahrzeugs.....	24
Bild 11: Finite-Element-Modell des 1500 kg schweren Fahrzeugs.....	25
Bild 12: Finite-Element-Modells des 2200 kg schweren Lieferwagens.....	26
Bild 13: Finite-Element-Modell des 10t schweren Fahrzeugs	27
Bild 14: Finite-Modell-Element des 38t schweren Sattelzugs.....	28
Bild 15: Gesamtmodell A: TB 11 an ESP 4.0	30
Bild 16: Gesamtmodell B: TB 31 an ESP 2.0	30
Bild 17: Ausgangsmodell Gesamtmodell C	31
Bild 18: Gesamtmodell D: TB 42 an ESP 2.0.....	31
Bild 19: Gesamtmodell der TB 11 an EDSP 2.0.....	32
Bild 20: Gesamtmodell des Lieferwagens an EDSP 2.0	32
Bild 21: Gesamtmodell der TB 42 an EDSP 2.0.....	32
Bild 22: Gesamtmodell der TB 11 an Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0.....	33
Bild 23: Gesamtmodell der TB 11 an Übergang ESP 2.0 - EDSP 2.0.....	33
Bild 24: Gesamtmodell der TB 32 an Übergang ESP 4.0 - EDSP 2.0.....	33
Bild 25: Gesamtmodell der TB 32 an Übergang ESP 2.0 – EDSP 2.0	34
Bild 26: Gesamtmodell L: 22 t Sattelzug an EDSP 2.0	34
Bild 27: Gesamtmodell M: TB 81-Fahrzeug an H4b-Stahlschutzeinrichtung	35
Bild 28: Gesamtmodell N: TB 81-Fahrzeug an H4b-Ortbetonschutzwand.....	35
Bild 29: Modellierungstechniken der Boden-FRS-Interaktion [4].....	36
Bild 30: Vereinfachter Ansatz AEK: Holmverlängerung mit erhöhter Elastizität.....	36
Bild 31: Realitätsnahe Modellierung der 12 m - Regelabsenkung der ESP 2.0.....	37
Bild 32: Verformung der ESP 4.0 in der Anprallprüfung (oben) und in der Simulation (unten).....	38
Bild 33: Verformung und Beschädigung der ESP 2.0 in der Anprallprüfung (oben) und in der Simulation (unten).....	40
Bild 34: Vergleich des zeitlichen ASI-Verlaufs von Anprallprüfung und Simulation (Ermittlung nach EN1317-1,2 1998/2006).....	42
Bild 35: Verformung der EDSP 2.0 in der Anprallprüfung (oben) und in der Simulation (unten.....	44
Bild 36: Vergleich der Verformungen der Systeme in der Anprallprüfung (oben) und in der Simulation unten).....	45
Bild 37: Vergleich der Beschädigungen der Fahrzeuge in der Anprallprüfung (oben) und in der Simulation (unten).....	46
Bild 38: Zeitlicher ASI-Verlauf in der Simulation (Ermittlung nach EN1317-1,2 1998/2006).....	47
Bild 39: Vergleich der Verformungen der Systeme in der Anprallprüfung (oben) und in der Simulation (unten).....	48
Bild 40: Anprallvorgang des 38t-Lkw an die H4b Stahlschutzeinrichtung in Heckansicht nach 1,5 s und 3,5 s	49
Bild 41: Verformungen der simulierten H4b-Stahlschutzeinrichtung nach 3,5s	50
Bild 42: Anprallvorgang des 38t-Lkw an die H4b Ortbetonschutzwand in Heckansicht nach 1,5 s und 3,5 s	52
Bild 43: Durchbiegung der simulierten H4b-Ortbetonschutzwand nach 3,5s.....	53
Bild 44: Gewählte Anprallpunkte für die Simulationsstudie und für das Referenzmodell. (Einheit: mm)...	56

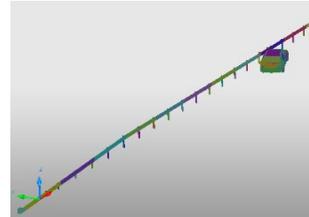
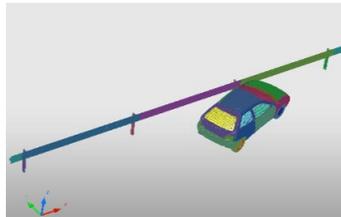
Bild 45: Abhängigkeit von Anprallpunkt und Wirkungsbereich. Die korrespondierenden Entfernungangaben von dem Pfosten der Schutzeinrichtung sind in Bild 44 dargestellt.....	56
Bild 46: Abhängigkeit der Anprallheftigkeit ASI vom Anprallpunkt. Die korrespondierenden Entfernungangaben von dem Pfosten der Schutzeinrichtung sind in Bild 44 dargestellt.....	57
Bild 47 Variation des Anprallwinkels unter gleichen Bedingungen, wie TB 42. Dargestellt ist der Anprallvorgang unter 15° (links) und zum Vergleich die Winkel 20° (Mitte) und 22,5° (rechts). Die zeitliche Entwicklung schreitet von oben nach unten fort.	61
Bild 48: Durch Simulation ermittelte Wirkungsbereiche in Abhängigkeit der Einbauhöhe der Schutzeinrichtung. Für eine niedrigere Einbauhöhe als 65 cm, bzw. höher als 90 cm wird das Fahrzeug gemäß dieser Simulation von der untersuchten Schutzeinrichtung nicht aufgehalten.	63
Bild 49: Zusätzlich zum Referenzmodell sind hier die Fälle dargestellt, bei denen die Schutzeinrichtung entweder zu hoch oder zu niedrig eingebaut war, um das Fahrzeug aufhalten zu können.....	63
Bild 50: Die Anprallvorgänge bei der verringerten Höhe der EDSP 2.0. Dargestellt sind das Referenzmodell und der Extremfall, bei dem die Schutzeinrichtung überfahren wird. Dies geschieht bei Einbauhöhen niedriger als 45 cm (Fall 6).....	65
Bild 51: Die Anprallvorgänge bei geneigter ESP 4.0	67
Bild 52: Die Anprallvorgänge bei der EDSP 2.0 mit zusätzlicher Neigung.....	69
Bild 53: Ausgangsmodell Gesamtmodell C.....	70
Bild 54: Schutzeinrichtung in einer Kurve, R = 120 m	70
Bild 55: Schutzeinrichtung in einer Kurve, R = 90 m	70
Bild 56: Schutzeinrichtung in einer Kurve, R = 60 m	70
Bild 57: Maximale dynamische Durchbiegungen im zeitlichen Verlauf während des Anpralls an die gerade aufgestellte Schutzeinrichtung (rot durchgezogen) und an die Schutzeinrichtungen in Kurven. Die Durchbiegung in der Kurve ist nicht erhöht. Die Stelle auf der Schutzeinrichtung, an der die maximale Auslenkung auftritt, ist in diesem Diagramm nicht dargestellt, und hängt vom Kurvenradius ab.....	70
Bild 58: Insassenbelastung (ASI-Werte) im zeitlichen Verlauf während des Anpralls an die gerade aufgestellte Schutzeinrichtung (rot durchgezogen) und an die gekrümmte Schutzeinrichtung. Der Vergleich zeigt eine erhöhte Insassenbelastung im Kurvenbereich.....	71
Bild 59: Anprallvorgang des TB 42 an eine ESP 2.0	73
Bild 60: Vergleich der Anprallvorgänge der EDSP 2.0 mit einer verkürzten Aufbauhöhe (real) und mit einer Standardbauhöhe (virtuell)	74
Bild 61: Vergleich der Verformung der EDSP 2.0 mit einer verkürzten Aufbauhöhe (rechts) mit einer Standardbauhöhe (links)	75
Bild 62: Anprallvorgang an der EDSP 2.0 mit einem Lieferwagen	78
Bild 63: Simulationsergebnisse des Anprallvorgangs des 22 t - Sattelzugs an die verkürzte EDSP 2.0 ..	79
Bild 64: Vergleich der Anprallvorgänge der virtuellen TB 11 Prüfungen.....	82
Bild 65: Vergleich der Verformungen der Systeme der virtuellen TB 11 Prüfungen.....	83
Bild 66: Vergleich der Anprallvorgänge der virtuellen TB 32 Prüfungen.....	84
Bild 67: Vergleich der Verformungen der Systeme im Falle der virtuellen TB 32 Prüfungen	85
Bild 68: Simulationsergebnisse mit H4b Betonschutzwand	87
Bild 69: Simulationsergebnisse mit H4b Stahlschutzeinrichtung.....	89
Bild 70: Energieentwicklungen während des Anpralls des Gesamtmodells C in diesem Bericht (2) und der unveränderten Version (1) des Modells aus Meywerk et. al. [5].....	91
Bild 71: Zeitliche Entwicklung der dynamischen Durchbiegung des älteren und des weiterentwickelten Simulationsmodells	92
Bild 72: Zeitliche Entwicklung der dynamischen Durchbiegung des älteren und des weiterentwickelten Simulationsmodells.....	92
Bild 73: Zeitlicher Verlauf der Anprallheftigkeit (Insassenbelastung) des älteren und des weiterentwickelten Simulationsmodells.....	92

Anhang

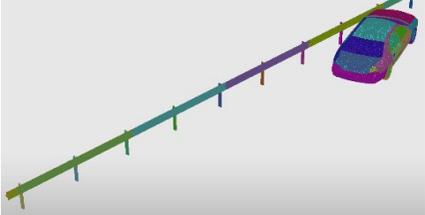
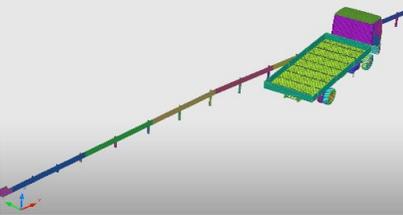
Anlage - Anprallparameter-Leitungsdaten Anprallversuch - Simulation

Spalte1	A	A2	B	B2	
Anprallparameter/ Leistungsdaten		Simulationsmodell: TB 11 ESP 4.0	1994 7D 02 TB 11 ESP 4,0 (B-Profil)	Simulationsmodell: TB 31 ESP 2.0	2009 7D 10 TB 31 ESP 2,0 (B-Profil)
Geschw. [km/h]		99,99	100,2	80,00	81,4
Anprallwinkel [°]		20,00	20	20,00	20,6
Fahrzeugmasse [kg]		899,90	908	1514,00	1500
Anprallpunkt		0,83 m nach 2/3	0,83 m hinter Pfosten 6	1,3 m nach 5/6	1,71 m nach 5/6
Gesamtaufbaulänge [m]		37	60	84,7	60
D_m gemessen [m]		-	-	0,68	0,50
D_N norm. [m]		1,03	-	0,67	0,46
W_m gemessen [m]		-	-	0,72	0,60
W_N norm. [m]		1,05	-	-	-
Wirkungsbereichsklasse [m]		-	-	W2	W1
THIV [km/h]		17,1	18,3	15	17,2
ASI		0,61	0,77	0,47	0,6
Anprallheftigkeitsstufe		A	A	A	A
VI gemessen [m]		-	-	-	-
VI norm. [m]		-	-	-	-
Kontaktstrecke [m]		8,73	11,34	7,79	7,29

Bild



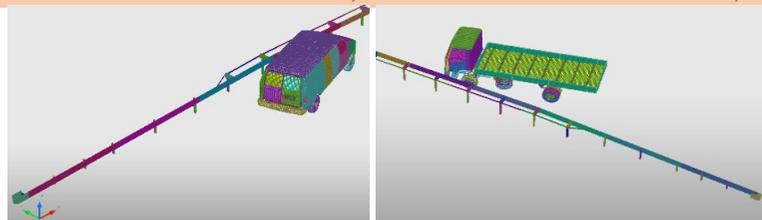
Anlage - Anprallparameter-Leitungsdaten Anprallversuch - Simulation

Spalte1	C	C22	D	E		
Anprallparameter/ Leistungsdaten	Simulationsmodell: TB 32 (1635 kg) ESP 2.0					
	2000 7D 07 TB 32 ESP 2,0 (A-Profil)					
	Simulationsmodell: TB 42 ESP 2.0					
	Simulationsmodell: TB 11 EDSP 2.0 verkürzt mit AEK					
	Geschw. [km/h]	110,00		113,5	72,09	100,01
	Anprallwinkel [°]	20,00		20	15,00	20,00
	Fahrzeugmasse [kg]	1635,00		1570	10173,70	899,90
	Anprallpunkt	bei 4/5 1,73 m vor 6/7 (Pfosten 13)		1,4 m nach 5/6		3 m nach 4/5
	Gesamtaufbaulänge [m]	37		60	84,7	56,7
	D_m gemessen [m]	1,20		1,30	-	-
	D_N norm. [m]	1,10		-	1,38	0,88
	W_m gemessen [m]	-		1,30	-	-
	W_N norm. [m]	-		-	1,54	1,2
	Wirkungsbereichsklasse [m]	-		W4	W5	W4
	THIV [km/h]	-		19	-	20,7
	ASI	0,74		0,65	-	0,92
	Anprallheftigkeitsstufe	A		A	-	A
	VI gemssen [m]	-		-	-	-
	VI norm. [m]	-		-	1,92	-
	Kontaktstrecke [m]	-		16,3	18,9	10,3
Bild						

Anlage - Anprallparameter-Leitungsdaten Anprallversuch - Simulation

Spalte1	E2	F	G	G2	G3	
Anprallparameter/ Leistungsdaten	1994 7D 11 TB 11 EDSP 2.0 (B-Profil)	Simulationsmodell: Lieferwagen EDSP 2.0 verkürzt		Simulationsmodell: TB 42 EDSP 2.0 verkürzt	2011 7D 02 TB 42 kurzEDSP 2.0 (B-Profil)	1994 7D 10 ("Normal") TB 42 EDSP 2.0 (B-Profil)
	Geschw. [km/h]	103,4	110,02	72,09	72,9	73,6
Anprallwinkel [°]	20,00	20,00	20,00	15,00	15	15
Fahrzeugmasse [kg]	899	2198,18	2198,18	10173,70	10040	9800
Anprallpunkt	1,10 m nach 5/6	2,6 m nach 3/4	2,6 m nach 3/4	1,9 m nach 4/5	2,41 m vor Stoß 3/4	1,70 m hinter Pfosten 9
Gesamtaufbaulänge [m]	60	56,7	56,7	56,7	32	60
D_m gemessen [m]	0,88	0,97	0,97	1,69	1,50	1,34
D_N norm. [m]	-	-	-	1,57	1,50	1,24
W_m gemessen [m]	1,20	1,26	1,26	1,92	1,60	1,70
W_N norm. [m]	-	-	-	-	1,6	-
Wirkungsbereichsklasse [m]	entfällt	W4	W4	W6	W5	W5
THIV [km/h]	19,2	28,64	28,64	-	-	-
ASI	0,97	0,94	0,94	-	-	-
Anprallheftigkeitsstufe	A	A	A	-	-	-
VI gemessen [m]	-	-	-	-	2,1	-
VI norm. [m]	-	-	-	2,5	2	-
Kontaktstrecke [m]	8,9	16,6	16,6	20,25	20,27	26,5

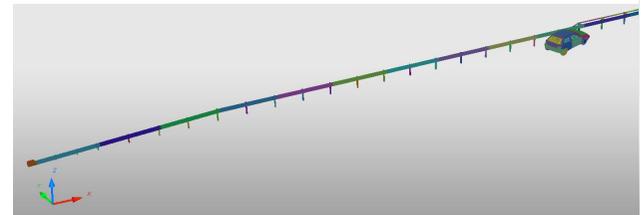
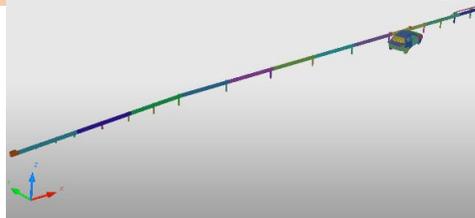
Bild



Anlage - Anprallparameter-Leitungsdaten Anprallversuch - Simulation

Spalte1	H	H2	I	
Anprallparameter/ Leistungsdaten	Simulationsmodell: TB 11 ESP 4.0 - EDSP 2.0			
	2009 7G 11 TB 11 ESP 4,0 - EDSP 2,0 (beide im B-Profil)			
	Simulationsmodell: TB 11 ESP 2.0 - EDSP 2.0			
	Geschw. [km/h]	100,01	102,0	100,01
	Anprallwinkel [°]	20,00	19,6	20,00
	Fahrzeugmasse [kg]	899,90	889	899,90
	Anprallpunkt	2,2 m nach 8/9	22,24 m nach Beginn ESP 4.0	3,3 m nach 9/10
	Gesamtaufbaulänge [m]	84,7	60	84,7
	D_m gemessen [m]	0,76	0,60	-
	D_N norm. [m]	0,76	0,61	0,86
	W_m gemessen [m]	0,96	0,80	-
	W_N norm. [m]	-	-	1,16
	Wirkungsbereichsklasse [m]	W3	W2	W3
	THIV [km/h]	21,49	21,1	18,3
	ASI	0,96	0,8	0,91
	Anprallheftigkeitsstufe	A	A	A
	VI gemessen [m]	-	-	-
	VI norm. [m]	-	-	-
	Kontaktstrecke [m]	9,27	9,65	10,65

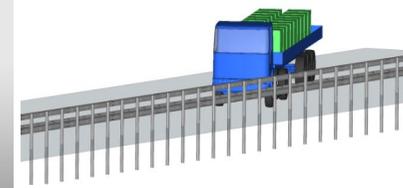
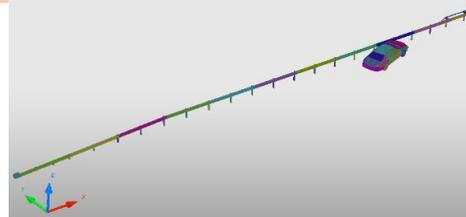
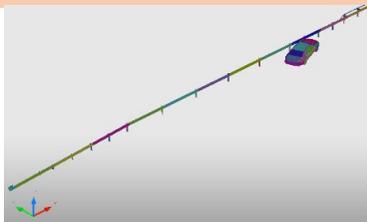
Bild



Anlage - Anprallparameter-Leitungsdaten Anprallversuch - Simulation

Spalte1	J	J2	K	M	
Anprallparameter/ Leistungsdaten	Simulationsmodell: TB 32 ESP 4,0 - EDSP 2,0		2009 7G 12 TB 32 ESP 4,0 - EDSP 2,0 (beide im B-Profil)	Simulationsmodell: TB 32 ESP 2,0 - EDSP 2,0	
	Simulationsmodell: TB 81 H4B Stahl				
Geschw. [km/h]	110,00	110,8	110,00	65,00	
Anprallwinkel [°]	20,00	19,7	20,00	20,00	
Fahrzeugmasse [kg]	1634,56	1432	1634,56	38000,00	
Anprallpunkt	2,2 m nach 8/9	1,74 m vor 6/7	2,2 m nach 8/9	0,95 m nach 6/7	
Gesamtaufbaulänge [m]	84,7	60	84,7	79,76	
D_m gemessen [m]	1,15	1,30	-	-	
D_N norm. [m]	1,06	1,38	1,15	2,33	
W_m gemessen [m]	1,40	1,50	-	-	
W_N norm. [m]	-	-	1,52	2,21	
Wirkungsbereichsklasse [m]	W5	W5	W5	-	
THIV [km/h]	15,9	18,3	16,4	-	
ASI	0,64	0,9	0,64	-	
Anprallheftigkeitsstufe	A	A	A	-	
VI gemessen [m]	-	-	-	-	
VI norm. [m]	-	-	-	2,83	
Kontaktstrecke [m]	15	12,3	15,34	15	

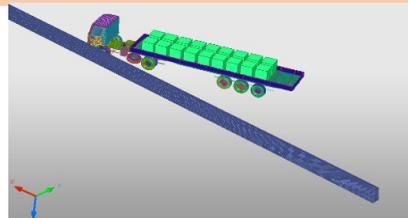
Bild



Anlage - Anprallparameter-Leitungsdaten Anprallversuch - Simulation

Spalte1	Spalte7	N	Spalte5
Anprallparameter/ Leistungsdaten	2004 7D 15 Super-Rail zweifach H4b		Simulationsmodell: TB 81 H4B Beton Safetybaer TB 81 BAST 2002 7B 15/JF
Geschw. [km/h]	67,1		65,00 66,1
Anprallwinkel [°]	20,5		20,00 20
Fahrzeugmasse [kg]	37460		38000,00 37940
Anprallpunkt	1,05 m nach Stoß 6/7		27 m 3,05 m vor Stoß 7
Gesamtaufbaulänge [m]	76		80 80
D_m gemessen [m]	2,1		0,65 0,99
D_N norm. [m]	1,91		- -
W_m gemessen [m]	3,0		1,24 1,60
W_N norm. [m]	-		- -
Wirkungsbereichsklasse [m]	W8		W5 W5
THIV [km/h]	-		- -
ASI	-		- -
Anprallheftigkeitsstufe	-		- -
VI gemessen [m]	2,4		- -
VI norm. [m]	-		3,14 2,4
Kontaktstrecke [m]	50,95		- 18,95

Bild



Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2021

V 338: Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs

Schwietering, Schwietering, Maier, Hakenberg, Pyta, Abel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 339: Aktualisierung der Datenbank MARLIS

Schneider, Turhan, Pelzer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 340: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2017 € 31,00

Fitschen, Nordmann

V 341: Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen

Eckert, Hendrich, Horlacher, Kathmann, Scotti, von Heel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 342: Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz

Peter, Janko, Schick, Waßmuth, Friedrich, Bawidamann € 21,00

V 343: Kreisverkehre an Landstraßen Auswirkungen der Erkennbarkeit und der Zufahrtsgestaltung auf die Verkehrssicherheit

Schmotz, Schröter, Schemmel, Lippold, Schulze € 21,50

V 344: Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen

Popp, Eggers, Heidebrunn, Cortes € 21,00

V 345: Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen mit Geräuschemissionsdaten der Straße und meteorologischen Daten

Liepert, Skowronek, Eberlei, Crljenkovic, Müller, Schady, Elsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 346: Zusammenhang reduzierter Geräuschgrenzwerte mit den in-use Geräuschemissionen bei unterschiedlichen Verkehrssituationen

Müller, Huth, Liepert € 15,00

V 347: Chancen in der Verkehrsbeeinflussung durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation

Schwietering, Löbbeling, Spangler, Gabloner, Busch, Roszak, Dobmeier, Neumann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 348: Einsatz und Verkehrssicherheit von Fußgängerüberwegen € 18,50

Bohle, Busek, Schröder

V 349: Straßenbepflanzung und Verkehrssicherheit – Ermittlung unfallbeeinflussender Merkmale auf Basis empirischer Modelle unter besonderer Berücksichtigung der Bepflanzung im Seitenraum an Landstraßen

Schreck-von Below € 22,00

V 350: Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen

Bartolomäus, Strigari, Sammet
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 351: Effektivität und Wirtschaftlichkeit der Streustofflagerung – TAUSALA II

Holldorb, Cypra, Pape
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

V 352: Abriebe von Fahrbahnoberflächen € 19,00

Düring, Schmidt, Johannsen

V 353: Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten

Gay, Grimm, Otto, Partzsch, Gersdorf, Gierisch, Löwe, Schütze € 16,00

V 354: Anwendung der Methode BIM in Konformität mit den Regelwerken der FGSV und des IT-Ko

Radenberg, Müller, König, Hagedorn, Geistefeldt, Hohmann, Heinrichs, Stiehler, Kortemeyer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 355: Pilotversuch des Rechtsabbiegens von Rad Fahrern bei Rot

Niestegge, Schüller, Hantschel, Schröter, Gerike
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 356: Entwicklung von Einsatzkriterien für Fußgänger-schutzanlagen mit unterschiedlichen Grundstellungen

Medicus, Schmotz, Gerike, Reinartz, Baier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 357: Qualifizierung der in Deutschland verwendeten Fahrzeug-Rückhaltesysteme mit verbessertem Schutz für Motorradfahrer nach den aktuellen europäischen Spezifikationen

Klößner, Gärtner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 358: Nutzenpotenziale von eCall im Verkehrsmanagement

Schaarschmidt, van Driel, Reinthaler, Nitsche, Aleksa
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 359: Management von Neophyten – Ein Überblick über die aktuelle Situation auf Straßenbegleitflächen

Bartels
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 360: Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen – Hauptstudie

Stephan, Ehm, Kamaruddin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 361: Nachhaltigkeitsbewertung von Streckenzügen der Straßeninfrastruktur

Hess, Lohmeier, Mielecke, Kunz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 362: Simulation des hochautomatisierten Fahrens auf Autobahnen mit kollektiver Streckenbeeinflussung

Hilgers, Krabbe, Haug, Grimm, Kutter, Tempelhahn, Schwietering, Füg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 363: PERTA – Passive Sicherheit in der Straßenausstattung

Tomasch, Radeschnig, Dünser, Sinz, Gstrein
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 364: Verkehrsträgerübergreifender Austausch von Erneuerbarer Energie

Chvanova, Haller, Leprich, U. Mayr, C. Mayr, Oßwald, Altrock, Gemmer, Michaels, Wagner € 23,50

V 365: Bundesweite Verkehrsdaten 2019

Schneider, Pelzer, Gallus, Dick, Lensing
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2023

V 366: Akzeptanz und Verkehrssicherheit des Radverkehrs im Mischverkehr auf Hauptverkehrsstraßen

Schüller, Niestegge, Hantschel, Kühn, Gerike, Huber
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 367: In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen

Schulze
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 368: Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen

Friedrich, Bawidamann, Peter, Waßmuth € 20,00

V 369: Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen

Fritz, Grigoropoulos, Kath, Baier, Reinartz, Schuckließ, Jung-hans, Lücken, Leonhardt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 370: Wissenschaftliche Begleitung des digitalen Testfelds auf der A9 zwischen München und Nürnberg

Vierkötter, Mischnick, Spangler, Gerstenberger, Windmann, Nedkov, Emmermann, Haspel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 371: Begleitende Systemevaluation der Maßnahme: Sicheres Ausleiten bei BAG-Standkontrollen

Fehn, Margreiter, Spangler, Bogenberger, Emmermann, Bengler, Vierkötter, Nedkov, Feldges, Holst
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 372: Autonome Systeme für Straßenbetriebsdienste (AETAS BAB)

Lüpges, Kleer, Holldorb, Zielke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 373: Modellanalyse Schadstoffimmissionen – Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftqualität in drei Ballungsräumen

Jakobs, Schneider, Toenges-Schuller, Düring, Hoffmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 374: Kriterien für die Beurteilung des Gefährdungspotenzials für Motorradfahrer durch scharfkantige Konstruktionsteile in Fahrzeug-Rückhaltesystemen

Kathmann, von Heel, Schimmelpfennig, Reglitz, Kammel, Goergen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 375: Virtuelle Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen mit der Finite-Elemente-Simulation

Fröhlich, Schwedhelm, Kübler, Balzer-Hebborn, Yu
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.