

# Konzepte und Umsetzungsstrategien für die Gestaltung von Fahrzeugrückhaltesystem- Übergangskonstruktionen **PREVENT**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2020  
**VIF 2020**

Februar 2024



## Impressum:

**Herausgeber und Programmverantwortung:**  
Bundesministerium für Klimaschutz  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
1030 Wien

 **Bundesministerium**  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-  
Aktiengesellschaft  
Austro Tower  
Schnirchgasse 17  
1030 Wien



**Für den Inhalt verantwortlich:**  
Institut für Fahrzeugsicherheit, TU Graz  
Inffeldgasse 13  
8010 Graz



**Programmmanagement:**  
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Thematische Programme  
Sensengasse 1  
1090 Wien

 **FFG**  
Forschung wirkt.

# Konzepte und Umsetzungsstrategien für die Gestaltung von Fahrzeughaltesystem- Übergangskonstruktionen **PREVENT**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung

VIF 2020

**Autorinnen und Autoren:**

**Desiree KOFLER**

**Ernst TOMASCH**

**Christian MADER**

**Marco JIRAUT**

**Alexander BARNAS**

**Olivier JANTSCHER**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

Institut für Fahrzeugsicherheit, TU Graz

voestalpine KREMS Finaltechnik GmbH

MABA Fertigteileindustrie GmbH

## KURZFASSUNG

Aufgrund der Vielfalt an unterschiedlichsten Fahrzeugrückhaltesystemen (FRS) im höherrangigen Straßennetz in Österreich ist eine konstruktive Verbindung von zwei unterschiedlichen FRS nicht vermeidbar. Um die Sicherheit für Verkehrsteilnehmer bei Anprall an eine Übergangskonstruktion von einem FRS mit Stahlleitschienen auf ein FRS mit Betonfertigteilen zu gewährleisten, wurden Sanierungsmaßnahmen für im Bestand befindliche Übergänge erarbeitet.

Auf Basis einer Bestandsanalyse von aufgestellten FRS am höherrangigen Straßennetz in Österreich, durchgeführt von der ASFINAG, wurden aktuelle Rückhaltesysteme katalogisiert und kategorisiert. Vom häufigsten Stahl FRS und Beton FRS wurde jeweils ein Finite-Elemente (FE) Modell aufgebaut und validiert. Anhand dieser beiden FRS wurde eine Übergangskonstruktion konzeptioniert und nach einem simulationsbasierten Optimierungsprozess getestet. Dabei wurden konstruktive Verbesserungsmaßnahmen erarbeitet und angewandt. Das finale, anhand der Testdaten validierte, Modell der Übergangskonstruktion wurde für eine Parameterstudie herangezogen, um die Einflüsse der einzelnen Verbesserungsmaßnahmen zu identifizieren. Weiters wurde die Anwendbarkeit der formulierten Handlungsempfehlungen überprüft, indem diese auf Übergänge weiterer FRS Kombinationen von anderen Hersteller angewandt und analysiert wurden.

Die formulierten Handlungsempfehlungen sollen in weiterer Folge bei der Überarbeitung der RVS 05.02.31 (Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen) in Betracht gezogen werden.

## ABSTRACT

Due to the variety of different vehicle restraint systems (VRS) in the higher-ranking road system in Austria, a structural connection of two different VRS is unavoidable. In order to ensure the safety of road users in the event of an impact with a transition construction from a VRS with steel guard rails to a VRS with precast concrete elements, renovation measures were developed for existing transition constructions.

Current VRS were catalogued and categorised on the basis of an inventory analysis of installed VRS on the higher-ranking road system in Austria, carried out by ASFINAG. A finite element (FE) model of the most common steel VRS and concrete VRS was constructed and validated. Using these two VRS, a transition construction was conceptualised and tested following a simulation-based optimisation process. Thereby, design improvement measures were developed and applied. The final model of the transition construction, which was validated using test data, was used for a parameter study in order to identify the influences of the individual improvement measures. Furthermore, the applicability of the formulated renovation recommendations was checked by applying and analysing them on transitions of other VRS combinations from other manufacturers.

The formulated recommendations for action will subsequently be taken into account in the revision of RVS 05.02.31 (guidelines and regulations for the road industry).

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>11</b>
<hr/>		
1.1	Problemstellung	11
1.2	Lösungsansatz	12
1.3	Projektziele	12
<b>2</b>	<b>METHODE</b>	<b>14</b>
<hr/>		
2.1	<b>Analyse der Bestandssituation von Fahrzeugrückhaltesystemen</b>	<b>15</b>
2.1.1	Bestandsaufnahme und Klassifizierung der im höherrangigen Straßennetz verbauten Fahrzeugrückhaltesysteme	15
2.1.2	Klassifizieren von realen Einbaubedingungen und baulichen Einschränkungen vor Ort	17
2.1.3	Erarbeitung von Funktionsweisen und Wirkprinzipien von Übergangskonstruktionen	18
2.2	<b>Bewertungsmethoden für den Fahrzeuganprall</b>	<b>18</b>
2.2.1	Definition der Aufhaltestufen und Anprallprüfungen	18
2.2.2	Bewertungskriterien für einen Fahrzeuganprall	20
2.2.3	Bewertungskriterien für die Validierung von Simulationsmodellen	21
2.3	<b>Modellierungsmethoden in der FE-Simulation</b>	<b>22</b>
2.3.1	Modellierung der Bauteile	23
2.3.2	Verbindungstechniken	23
2.3.3	Modellierung des Untergrundes	24
2.3.4	Modellierung der Messstellen	25
2.4	<b>Konstruktive Gestaltung und simulationsbasierte Optimierung der Übergangskonstruktion</b>	<b>25</b>
2.4.1	Validierung der Fahrzeugmodelle	26
2.4.2	Aufbau und Validierung von FE-Modellen der häufigsten FRS	29
2.4.3	Begriffsdefinition	31
2.4.4	Konstruktive Gestaltung der Basis-Übergangskonstruktion	32
2.4.5	Simulationsbasierte Optimierung der Basis-ÜK	34
2.4.6	Bestimmung des kritischen Anprallpunktes	35
2.5	<b>Versuchstechnische Bewertung der Basis-Übergangskonstruktion</b>	<b>35</b>
2.5.1	Anprallkonfigurationen	35
2.5.2	Testfahrzeuge	36

	Einleitung
2.5.3 Messdatenerfassung	36
2.5.4 Videodatenaufzeichnung	36
2.5.5 Bewertung	37
<b>2.6 Einflussuntersuchung einzelner Verbesserungsmaßnahmen</b>	<b>37</b>
2.6.1 V1: Keine Stehverdichtung im Stahl FRS	38
2.6.2 V2: Größerer Abstand des letzten Stehers zum Anschlusselement	38
2.6.3 V3: Keine Abschrägung des Anschlusselementes	39
2.6.4 V4: Keine Dämpfungselemente zwischen Leitschienenband und Fertigteil	39
2.6.5 V5: Kein Versatz der Fertigteile	40
2.6.6 V6: Weniger Aufsatzsteher auf Anschlusselement	40
2.6.7 V7: Kein Gleitprofil im Stahl FRS	41
<b>2.7 Simulationsbasierter Nachweis der Anwendbarkeit der Verbesserungsmaßnahmen auf weitere FRS</b>	<b>42</b>
2.7.1 Modellierung der weiteren Übergangskonstruktionen	42
2.7.2 Methode zur Bewertung der Übergangskonstruktionen	46
<b>2.8 Berücksichtigung von Realsituationen</b>	<b>48</b>
<b>3 ERGEBNISSE</b>	<b>50</b>
<hr/>	
<b>3.1 Verhalten der Basis-Übergangskonstruktion bei Fahrzeuganprall</b>	<b>50</b>
3.1.1 Simulationstechnische Bewertung der Basis-Übergangskonstruktion	50
3.1.2 Überarbeitung des Modells der Basis-Übergangskonstruktion anhand der Testergebnisse	51
3.1.3 Zusammenfassung der versuchstechnischen Bewertung der Basis-ÜK	59
<b>3.2 Einflussuntersuchung der einzelnen Verbesserungsmaßnahmen</b>	<b>60</b>
3.2.1 V1: Keine Stehverdichtung im Stahlsystem	60
3.2.2 V2: Größerer Abstand des letzten Stehers zum Anschlusselement	62
3.2.3 V3: Keine Abschrägung des Anschlusselementes	63
3.2.4 V4: Keine Dämpfungselemente zwischen Leitschienenband und Fertigteile	65
3.2.5 V5: Kein Versatz der Fertigteile	67
3.2.6 V6: Weniger Aufsatzsteher auf dem Anschlusselement	68
3.2.7 V7: Kein Gleitprofil im FRS Stahl	70
3.2.8 Zusammenfassung der Einflussuntersuchung	71
<b>3.3 Simulationsbasierter Nachweis der Anwendbarkeit der Maßnahmen auf weitere FRS</b>	<b>73</b>
3.3.1 Übergangskonstruktion IMEVA BL300 – DB100 6m	73
3.3.2 Übergangskonstruktion KB1 RH3 – DB100 2m	75

---

Einleitung

3.3.3	Übergangskonstruktion KB1 RH3 – RB100L_8	76
3.3.4	Übergangskonstruktion KB1 RH2 – DB100 6m	78
3.3.5	Übergangskonstruktion Fracasso 3n24872 – DB100 6m	80
3.3.6	Zusammenfassung zur Anwendbarkeit der Maßnahmen auf weitere FRS	82
<b>3.4</b>	<b>Berücksichtigung von Realsituationen</b>	<b>83</b>
<b>3.5</b>	<b>Maßnahmen und Handlungsempfehlungen</b>	<b>86</b>
3.5.1	Anwendungsbereich	86
3.5.2	Konstruktive Maßnahmen im Stahl FRS	90
3.5.3	Konstruktive Maßnahmen im Beton FRS	90
3.5.4	Verbindung von Stahl FRS und Beton FRS	91
3.5.5	Zu übertragende Zugkräfte	92
<b>4</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>94</b>
<b>4.1</b>	<b>Abschätzung der Rückhaltewirkung eines FRS mittels FE-Simulation</b>	<b>94</b>
4.1.1	Generelle Einschränkungen von FE-Simulationen	94
4.1.2	Prognosegüte der Anprallsimulationen	94
4.1.3	Wahl der Anprallpunkte	95
<b>4.2</b>	<b>Einflüsse unterschiedlicher Verbesserungsmaßnahmen</b>	<b>96</b>
<b>4.3</b>	<b>Anwendbarkeit der Verbesserungsmaßnahmen im Bestand</b>	<b>96</b>
4.3.1	Anwendungsbereich	96
4.3.2	Verwendete Bauteile	96
4.3.3	Notwendigkeit eines Gleitprofils	97
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>98</b>
<b>6</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>99</b>
<b>7</b>	<b>ACKNOWLEDGEMENT</b>	<b>100</b>
<b>8</b>	<b>REFERENZEN</b>	<b>101</b>

---

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Geprüfte ÜK von einem Stahl FRS auf ein Beton Stahl FRS	11
Abbildung 2: Sackbildung bei Fahrzeuganprall im Übergangsbereich	12
Abbildung 3: Methode zur Erarbeitung der Handlungsempfehlungen zur Sanierung von Übergangskonstruktionen im Bestand	14
Abbildung 4: Situationen realer Einbaubedingungen (Quelle: ASFINAG, VAKF)	17
Abbildung 5: Lage der Sensoren im Testfahrzeug [4]	20
Abbildung 6: Definitionen der Kriterien Dm, Wm und VIm laut EN1317 [4]	21
Abbildung 7: Modellierung der Schraubenverbindung zwischen Stahlleitschiene und Betonelement	24
Abbildung 8: Modellierung des im Untergrund verankerten Stehers	24
Abbildung 9: Querschnitte für die Auswertung von Zugkräften in Leitschiene (links) und Kupplung (rechts)	25
Abbildung 10: Vorgehen zur Erarbeitung von Verbesserungsmaßnahmen	26
Abbildung 11: Statische Testkonfiguration für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch	27
Abbildung 12: Testkonfiguration „Fahrwerk“ für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch	27
Abbildung 13: Testkonfiguration „Lenkung“ für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch	27
Abbildung 14: Testkonfiguration „Geradeausfahrt“ für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch	28
Abbildung 15: Testkonfiguration „Kurvenfahrt“ für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch	28
Abbildung 16: Testkonfiguration „Stufenfahrt“ für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch	28
Abbildung 17: Testkonfiguration „Anprall an eine starre Wand“ für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch	29
Abbildung 18: Schematischer Aufbau einer Übergangskonstruktion und Begriffsdefinition	32
Abbildung 19: Aufbau der Basis-Übergangskonstruktion	32
Abbildung 20: Anprallpunkte für die Simulation der Anprallkonfigurationen TB32 und TB61	34
Abbildung 21: Testgelände für EN1317 Anprallprüfungen	35
Abbildung 22: Verwendete Testfahrzeuge für Anprallkonfiguration TB32 (links) und TB61 (rechts)	36
Abbildung 23: Fahrzeugkoordinatensystem (links) und Position der Sensoren im Fahrzeugschwerpunkt (rechts)	36
Abbildung 24: Schematische Positionen der Videokameras	37
Abbildung 25: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung der Steherverdichtung	38
Abbildung 26: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung des letzten Stehers vor dem Anschlusselement	39
Abbildung 27: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung der Abschrägung des Anschlusselementes	39
Abbildung 28: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung der Dämpfungselemente	40
Abbildung 29: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung der Schrägstellung der Fertigteile	40
Abbildung 30: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung der Steher am Anschlusselement	41
Abbildung 31: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung des Gleitprofils	41
Abbildung 32: Systemkombinationen weiterer Übergangskonstruktionen	42
Abbildung 33: Vergleich der Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 6m mit der Variante 3n24872 – DB100 6m	43

Abbildung 34: Anbindung des Leitschienenbandes am Anschlusselement in der Variante 3n24872 – DB100 6m	43
Abbildung 35: Vergleich der Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 mit der Variante BL300 – DB100 6m	44
Abbildung 36: Anbindung des Leitschienenbandes am Anschlusselement in der Variante BL300 – DB100 6m	44
Abbildung 37: Vergleich der Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 mit der Variante KB1 RH2 – DB100 6m	45
Abbildung 38: Vergleich der Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 mit der Variante KB1 RH3 – DB100 2m	45
Abbildung 39: Vergleich der Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 mit der Variante KB1 RH3 – RB100L_8	46
Abbildung 40: Vergleichsbasis für Bewertung der Übergangskonstruktionen am Beispiel der Basis-ÜK	47
Abbildung 41: Übersicht über Validitätslevel der FE-Modelle der Basis-FRS und Übergangskombinationen	48
Abbildung 42: Modellierung der generischen Wirkungsbereichseinschränkung	48
Abbildung 43: Wirkungsbereiche der TB61 Simulationen an die Basis-ÜK für verschiedene Anprallpunkte	51
Abbildung 44: Vergleich der Kinematik zwischen Simulation und Test beim TB32 Anprall – frontale Ansicht	52
Abbildung 45: Vergleich der Kinematik zwischen Simulation und Test beim TB32 Anprall – Draufsicht	53
Abbildung 46: Vergleich der Systemdeformation beim TB32 Anprall an die Basis-ÜK	54
Abbildung 47: Radtrajektorien und Systemparameter beim TB32 Anprall an die Basis-ÜK	54
Abbildung 48: Vergleich der Kinematik zwischen Simulation und Test beim TB61 Anprall – frontale Ansicht	56
Abbildung 49: Vergleich der Kinematik zwischen Simulation und Test beim TB61 Anprall – Draufsicht	57
Abbildung 50: Vergleich der Systemdeformation beim TB61 Anprall – anprallzugewandte Seite	58
Abbildung 51: Vergleich der Systemdeformation beim TB61 Anprall – anprallabgewandte Seite	58
Abbildung 52: Radtrajektorien und Systemparameter beim TB61 Anprall an die Basis-ÜK	59
Abbildung 53: Relative Veränderung der Systemparameter bei Erhöhung des Steherabstandes im Stahlsystem	60
Abbildung 54: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Erhöhung des Steherabstandes – TB32	61
Abbildung 55: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Erhöhung des Steherabstandes – TB61	61
Abbildung 56: Relative Veränderung der Systemparameter bei Erhöhung des Abstand des Stehers zum AE	62
Abbildung 57: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Erhöhung des Abstand des letzten Stehers – TB32	63
Abbildung 58: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Erhöhung des Abstand des letzten Stehers – TB61	63
Abbildung 59: Relative Veränderung der Systemparameter bei Begradigung des Anschlusselementes	64
Abbildung 60: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Begradigung des Anschlusselementes – TB32	64
Abbildung 61: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Begradigung des Anschlusselementes – TB61	65
Abbildung 62: Relative Veränderung der Systemparameter bei Verzicht auf die Dämpfungselemente zwischen Leitschienenband und Fertigteile	65
Abbildung 63: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Verzicht auf die Dämpfungselemente – TB32	66
Abbildung 64: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Verzicht auf die Dämpfungselemente – TB61	66
Abbildung 65: Relative Veränderung der Systemparameter bei Begradigung der Schrägstellung der Fertigteile	67
Abbildung 66: Vergleich der Fahrzeugkinematik ohne Schrägstellung der Fertigteile – TB32	68
Abbildung 67: Vergleich der Fahrzeugkinematik ohne Schrägstellung der Fertigteile – TB61	68
Abbildung 68: Relative Veränderung der Systemparameter bei Verringerung der Anzahl der Aufsatzsteher	69

Abbildung 69: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Verringerung der Steher am Anschlusselement – TB61	69
Abbildung 70: Relative Veränderung der Systemparameter bei Entfernen des Gleitprofils im Stahlsystem	70
Abbildung 71: Vergleich der Fahrzeugkinematik mit und ohne Gleitprofil	71
Abbildung 72: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK IMEVA BL300 – DB100 6m – Draufsicht	73
Abbildung 73: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK IMEVA BL300 – DB100 6m – Frontansicht	74
Abbildung 74: TB32 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK IMEVA BL300 – DB100 6m	75
Abbildung 75: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK KB1 RH3 – DB100 2m – Draufsicht	75
Abbildung 76: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK KB1 RH3 – DB100 2m – Frontalansicht	76
Abbildung 77: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK KB1 RH3 – RB100L_8 – Draufsicht	77
Abbildung 78: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK KB1 RH3 – RB100L_8 – Frontalansicht	77
Abbildung 79: TB32 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK KB1 RH3 – RB100L_8	78
Abbildung 80: Kinematik bei TB51 Anprall an die ÜK KB1 RH2 – DB100 6m – Draufsicht	79
Abbildung 81: Kinematik bei TB51 Anprall an die ÜK KB1 RH2 – DB100 6m – Frontansicht	79
Abbildung 82: TB32 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK KB1 RH2 – DB100 6m	80
Abbildung 83: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK Fracasso 3n24872 – DB100 6m – Draufsicht	80
Abbildung 84: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK Fracasso 3n24872 – DB100 6m – Frontansicht	81
Abbildung 85: TB32 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK 3n24872 – DB100 6m	82
Abbildung 86: Systemauslenkungen bei verschiedenen Wirkungsbereichseinschränkungen (WBE)	83
Abbildung 87: Fahrzeugkinematik bei verschiedenen Wirkungsbereichseinschränkungen (WBE)	84
Abbildung 88: Relative Abweichung der Wirkungsbereiche, Element- und Fahrzeugneigung bezogen auf die Basis-ÜK	84
Abbildung 89: Relative Abweichung der Zugkräfte in Kupplungen und Leitschienenband bezogen auf Basis-ÜK	85
Abbildung 90: Schema der H2 Übergangskonstruktion unter Anwendung der Handlungsempfehlungen	88
Abbildung 91: Schema der H3 Übergangskonstruktion unter Anwendung der Handlungsempfehlungen	89

# TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Im Bestand am häufigsten vorhandene FRS für die Aufhaltestufen H2 bis H4b	15
Tabelle 2: Für die simulationsbasierende Konzeptionierung der ÜK-Sanierung gewählte FRS	16
Tabelle 3: Wirkprinzipien und dazugehörige konstruktive Maßnahmen	18
Tabelle 4: Anprallprüfungen nach EN 1317-2 [5]	19
Tabelle 5: Aufhaltestufen und Anprallprüfungen nach EN 1317-1 [5]	19
Tabelle 6: Einstufung der Anprallheftigkeit laut EN1317 [4]	21
Tabelle 7: Bewertungskriterien für Systemvalidierung auf Basis EN 16303 [6]	22
Tabelle 8: Auswahl der FRS für den Modellaufbau	29
Tabelle 9: Modelle der Stahl FRS und die jeweiligen Aufhaltestufen	30
Tabelle 10: Modelle der Beton FRS und die jeweiligen Aufhaltestufen	31
Tabelle 11: Anprallkonfigurationen und Bewertungskriterien der validierten FRS	31
Tabelle 12: Vergleich der Bewertungskriterien für die Anprallkonfiguration TB32 an die Basis-ÜK	55
Tabelle 13: Vergleich der Bewertungskriterien für die Anprallkonfiguration TB61 an die Basis-ÜK	59
Tabelle 14: Relative Veränderung der Systemparameter für die einzelnen Varianten	72
Tabelle 15: Relative Veränderung der Bewertungskriterien der ÜK IMEVA BL300 – DB100 6m gegenüber Basis-FRS	74
Tabelle 16: Relative Veränderung der Bewertungskriterien der ÜK KB1 RH3 – DB100 2m gegenüber Basis-FRS	76
Tabelle 17: Relative Veränderung der Bewertungskriterien der ÜK KB1 RH3 – RB100L_8 gegenüber Basis-FRS	77
Tabelle 18: Relative Veränderung der Bewertungskriterien der ÜK KB1 RH2 – DB100 6m gegenüber Basis-FRS	79
Tabelle 19: Relative Veränderung der Bewertungskriterien der ÜK 3n24872 – DB100 6m gegenüber Basis-FRS	81
Tabelle 20: Relative Abweichung der Zugkräfte gegenüber jeweiligem Basis-FRS	82
Tabelle 21: FRS-kombinationen mit Nachweis für die Anwendbarkeit der Handlungsempfehlungen	86
Tabelle 22: Zu übertragbare Zugkräfte in den Leitschienenbändern und in den Kupplungen für den H2 Übergang	93
Tabelle 23: Zu übertragbare Zugkräfte in den Leitschienenbändern und in den Kupplungen für den H3 Übergang	93

# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<b>APP</b>	Anprallpunkt
<b>ASI</b>	Acceleration Severity Index
<b>BLW</b>	Betonleitwand
<b>DAU</b>	Data Acquisition Unit
<b>Dm</b>	dynamische Durchbiegung
<b>FRS</b>	Fahrzeurückhaltesystem
<b>FT</b>	Fertigteil
<b>LSB</b>	Leitschienenband
<b>THIV</b>	Theoretical Head Impact Velocity
<b>ToF</b>	Time of Flight
<b>ÜK</b>	Übergangskonstruktion
<b>VIm</b>	Fahrzeugeindringung (Vehicle Intrusion)
<b>Wm</b>	Wirkungsbereich

# 1 EINLEITUNG

Abkommensunfälle mit Personenschaden sind im ASFINAG-Netz der am zweithäufigsten vorkommende Unfalltyp. Dabei sind rd. 44% aller im ASFINAG-Netz Getöteten zu beklagen [1]. Eine Maßnahme zur Reduktion der Unfallschwere bei Abkommensunfällen ist die Anordnung von Fahrzeugrückhaltesystemen (FRS). Das Risiko bei Abkommensunfällen an Straßenabschnitten ohne ein FRS schwer verletzt oder getötet zu werden ist um rd. 14% höher, als bei einem Anprall an ein FRS [2]. Der Zweck von FRS ist demnach, Fahrzeuge aufzuhalten oder umzulenken, die entweder die Straße verlassen oder voraussichtlich in den Gegenverkehr kommen und somit die Insassen vor den Folgen eines Anpralls zu schützen. FRS werden als passive Schutzeinrichtungen längsseitig einer Straße vor ortsfesten Objekten bzw. durchgängig am Mittelstreifen errichtet. Im Bestand des ASFINAG-Netzes befindet sich eine Vielzahl an unterschiedlichsten FRS aufgrund unterschiedlichster Anforderungen (Freiland/Brücke, Leistungsvermögen, Material, ...).

## 1.1 Problemstellung

Aufgrund dieser Vielfalt an FRS existiert somit eine entsprechend hohe Anzahl an erforderlichen Übergangskonstruktionen (ÜK). Als ÜK wird der Übergang zwischen zwei unterschiedlichen FRS bezeichnet [3], wie in Abbildung 1 dargestellt. Für ÜK besteht keine Verpflichtung zur CE-Kennzeichnung. Aus diesem Grund ist die Mehrheit der im Bestand befindlichen Übergänge nicht geprüft.



Abbildung 1: Geprüfte ÜK von einem Stahl FRS auf ein Beton Stahl FRS

Um generell ein FRS in Österreich verwenden zu dürfen, bedarf es einer CE-Kennzeichnung womit eine prinzipielle Eignung für die Verwendung im Straßenverkehr bestätigt wird. Dabei wird die Aufhaltestufe, die Anprallheftigkeitsstufe, sowie der Wirkungsbereich des FRS ermittelt. Für die Ausführung und Aufstellung von dauerhaft eingesetzten FRS auf öffentlichen Straßen ist die RVS 05.02.31 anzuwenden. Grundsätzlich sind nur FRS einzusetzen, die nach EN1317 erfolgreich geprüft und vom BMK freigegeben wurden. Für ÜK ist derzeit keine CE-Kennzeichnung vorgesehen.

In den einzelnen Mitgliedsstaaten der EU wird die Einsatzfreigabe von ÜK unterschiedlich geregelt. Es kommen hierbei geprüfte FRS auf Basis der Entwurfsnorm ENV1317-4 als auch rein konstruktive Lösungen zur Anwendung.

Im Sinne der Verkehrssicherheit und zur Vermeidung eines übergebührenden Prüfaufwandes aufgrund zahlreicher Kombinationsmöglichkeiten, wären daher grundsätzliche Systemlösungen zu bevorzugen, die einen ausreichenden Schutz der Fahrzeuginsassen beim Anprall bieten.

Bei Übergangskonstruktionen von einem nachgiebigeren Stahl FRS auf ein steiferes Beton FRS kann es bei einem Fahrzeuganprall im Übergangsbereich zur sogenannten Sackbildung kommen (Abbildung 2). Dabei verformt sich das weichere Stahl FRS stärker gegenüber dem Beton FRS, was in weiterer Folge zu einem Anprall an der Stirnseite des Fertigteils führen kann. Über die Konzipierung von Sanierungslösungen für ÜK im Bestand soll dieses Verhalten verhindert werden. Zudem sollen auch Systemlösungen erarbeitet werden, welche ein durchgängiges Leistungsvermögen gewährleisten und dadurch die Wahrscheinlichkeit von Durchbrüchen reduzieren.

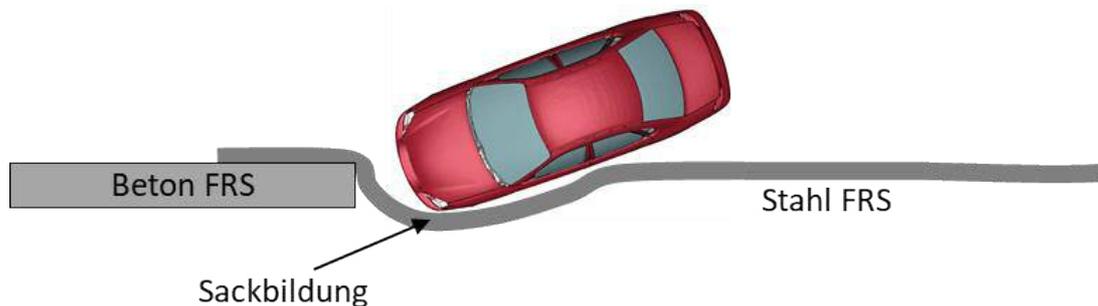


Abbildung 2: Sackbildung bei Fahrzeuganprall im Übergangsbereich

## 1.2 Lösungsansatz

Für die Zielerreichung wird ein kombinierter Ansatz aus Finite Element Simulation und Versuch gewählt. Dazu werden Übergangssituationen kategorisiert und reale Aufstellsituationen kategorisiert. Auf deren Basis werden Finite Elemente Modelle von FRS und auch von ÜK aufgebaut und simuliert. Die erarbeiteten Sanierungsmaßnahmen werden zum einen simulationsbasierend und zum anderen anhand von Ergebnissen aus realen Tests bewertet und optimiert und schlussendlich in Form von Handlungsempfehlungen zusammengefasst.

## 1.3 Projektziele

Ziel des Projekts ist die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Gestaltung von Übergangskonstruktionen im Bestand. Grundsätzlich sollte aus Sicht der Verkehrssicherheit ausschließlich der Anspruch auf den Einsatz geprüfter Übergangskonstruktionen gestellt werden. Da aber Budgetvorgaben einen limitierenden Faktor darstellen und ein flächendeckender Einsatz produktunabhängiger Systemlösungen ebenfalls einen wesentlichen Beitrag zur Anhebung der Verkehrssicherheit darstellen, sind Empfehlungen für den optimalen Einsatz von produktunabhängigen Sanierungslösungen für ÜK im Bestand das Hauptziel des Projekts. Es ist hierbei nicht das Ziel eine ÜK als zulassungsfähiges Produkt zu entwickeln.

Folgende Ziele werden angestrebt:

- Es sollen für die im ASFINAG-Netz häufig aufgestellten und entsprechend der Einsatzfreigabeliste CE gekennzeichneten FRS „produktunabhängige, standardisierte, konstruktive Ausführungsvarianten“ für den Übergang von einem Stahl FRS auf eine Betonfertigteilleitwand (BLW) entwickelt werden. Als Aufhaltestufen werden H2 (Regelfall für Randabsicherung) und H3 (Regelfall für Mittelabsicherung) zu Grunde gelegt.
  - Es werden dabei die Einflussfaktoren für die Funktionalität der Übergangskonstruktionen wie z. B. Steifigkeitsunterschiede, die Aufhaltestufe, der Wirkungsbereich, die Verformungen und die Anprallheftigkeit berücksichtigt.
  - Es werden konkrete Lösungsvorschläge für ÜK unter Berücksichtigung von Einflussfaktoren/Randbedingungen anhand von numerischen Simulationen konzipiert und anschließend getestet. Die numerischen Simulationen erfolgen sowohl an H3 als auch H2 FRS. Die Simulationsmodelle werden auf Grund der Versuchsergebnisse gegebenenfalls optimiert.
  - Eine ÜK wird durch Anfahrversuche gemäß EN 1317-4 in der Ausführung von einem Stahl FRS auf ein Beton FRS geprüft. Die Versuche erfolgen an eine H3 Übergangskonstruktion mit einem Fahrzeug der Klasse TB61 und TB32.
- Erarbeiten eines Kriterienkatalogs zu Randbedingungen, allfällige Aufstelllängen von Zwischenelementen und die Ausführungserfordernisse/Ausführungsvarianten (z. B. Verdichtung von Steherabständen) als Grundlage für Leitlinien zur Erhöhung der Verkehrssicherheit von ÜK im Bestand.

## 2 METHODE

Die Fragestellungen werden über die Kombination aus simulationsbasierenden Untersuchungen und Ergebnissen aus realen Tests bearbeitet. Abbildung 3 zeigt den methodischen Ablauf des Projektes.

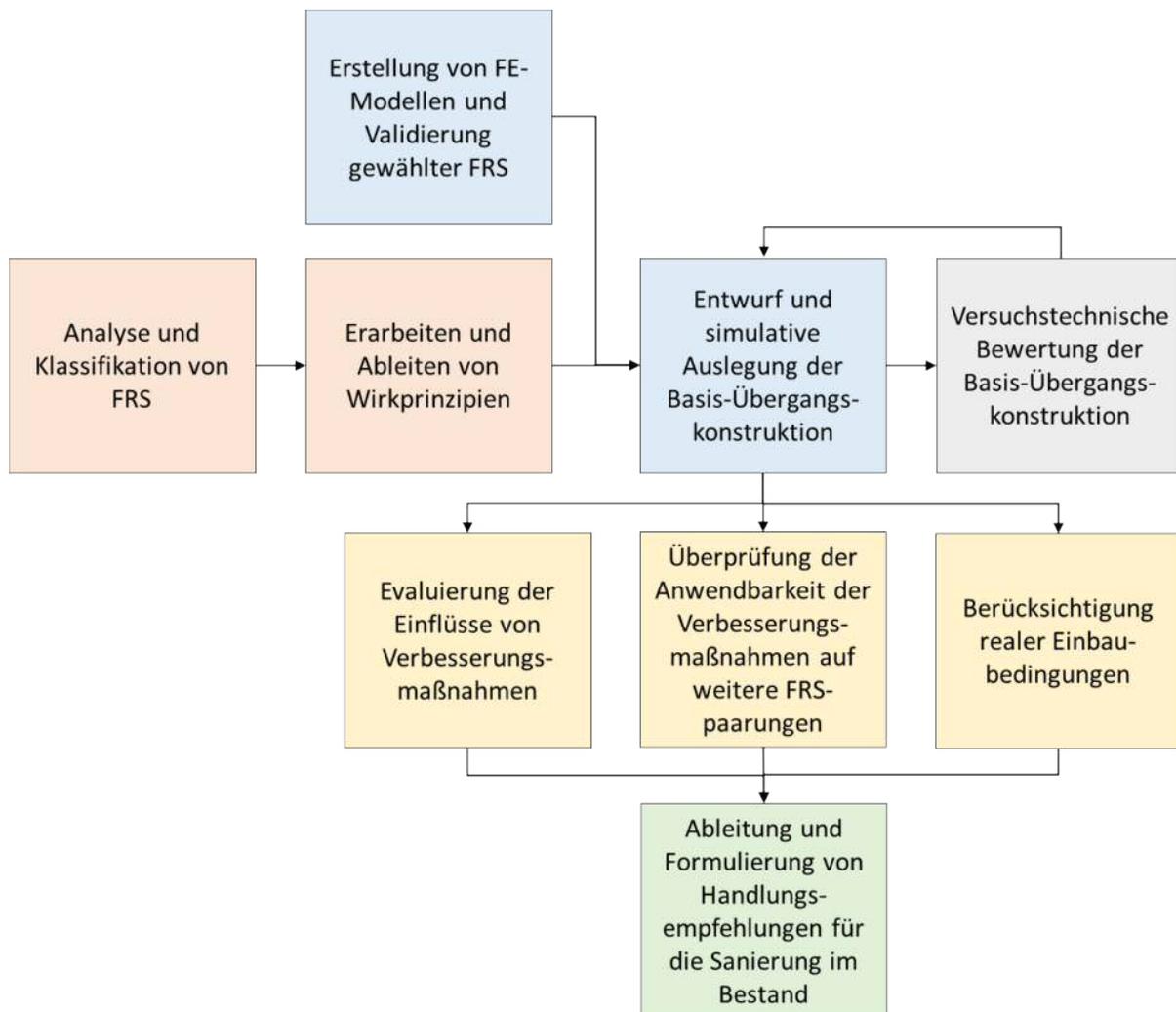


Abbildung 3: Methode zur Erarbeitung der Handlungsempfehlungen zur Sanierung von Übergangskonstruktionen im Bestand

Den Ausgangspunkt stellen dabei theoretische Überlegungen (in Rot gehaltene Blöcke) dar. Eine Bestandsanalyse der aktuell aufgestellten FRS ermöglicht die Einordnung und Klassifikation der Systeme. Es werden auf Basis von bestehenden ÜK Wirkprinzipien erarbeitet und daraus konstruktive Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet. Diese Ergebnisse liefern den Input für die simulationsbasierenden Arbeiten in den blauen Blöcken. Dabei werden konkrete FE-Modelle aufgebaut und validiert. Über die Kombination dieser FRS mit den erarbeiteten konstruktiven Maßnahmen wird ein Konzept einer ÜK entwickelt und optimiert. Die realen Tests (grauer Block) der ÜK dienen einerseits der versuchstechnischen Bewertung der ÜK, andererseits auch, über Rückführung

der Ergebnisse in die Simulation, als Validationsgrundlage für das FE-Modell. Auf Basis des validierten FE-Modells erfolgen Parameterstudien (in den gelben Blöcken vermerkt). Die Einflüsse der einzeln angewandten konstruktiven Verbesserungsmaßnahmen werden identifiziert. Da diese Verbesserungsmaßnahmen auch auf diverse andere FRS-kombinationen anwendbar sein müssen, werden weitere ÜK mit unterschiedlichen FRS-paarungen auf Basis der validierten ÜK erstellt und analysiert. Zudem wird das Verhalten der ÜK bei speziellen realen Einbaubedingungen untersucht. Ausgehend von diesen Ergebnissen werden im letzten Schritt Handlungsempfehlungen für die Sanierung von ÜK im Bestand für die Aufhaltestufen H2 und H3 formuliert.

## 2.1 Analyse der Bestandssituation von Fahrzeugrückhaltesystemen

Die aktuelle Situation im Bestand wurde erhoben und analysiert, um die meist eingesetzten FRS zu identifizieren. Zudem wurden reale Einbaubedingungen bzw. Aufstellsituationen gesammelt. Für die spätere Adaptierung von ÜK im Bestand wurden bereits getestete ÜK analysiert und die jeweiligen Wirkprinzipien abgeleitet.

### 2.1.1 Bestandsaufnahme und Klassifizierung der im höherrangigen Straßennetz verbauten Fahrzeugrückhaltesysteme

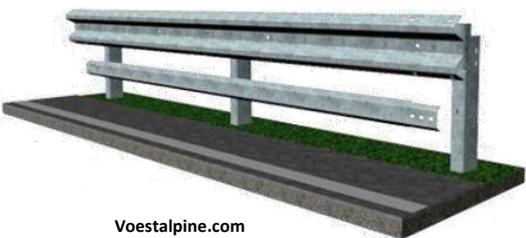
Vom Infrastrukturbetreiber ASFINAG wurde eine Bestandserhebung von FRS im höher rangigen Straßennetz durchgeführt. Dabei wurden FRS für die Mittel- als auch Randabsicherung in Betracht gezogen. Auf Basis dieser Daten wurden die FRS bezüglich Stahl FRS oder Beton FRS, Aufhaltestufe und Wirkungsbereich klassifiziert. In Tabelle 1 sind die häufigsten Stahl FRS und Beton FRS zusammengefasst.

Tabelle 1: Im Bestand am häufigsten vorhandene FRS für die Aufhaltestufen H2 bis H4b

FRS	Hersteller	Typ	Aufstellung	Aufhaltestufe	Wirkungsbereich
Stahl	VAKF	KB1 RH3	Brücke	H3	W5
	VAKF	KB3 RH3 V	Brücke	H3	W5
	IMEVA	BL300 H3	Freiland	H3	W5
	VAKF	KB1 RH2	Brücke	H2	W5
	VAKF	KB3 RH2	Brücke	H2	W5
	Fracasso	3n24872	Freiland	H2	W5
Beton	DELTABLOC	DB100 K280 6m	Frei aufgestellt	H4b	W6
	DELTABLOC	DB100S 3m/6m	Frei aufgestellt	H2	W5
	DELTABLOC	DB80 6m	Frei aufgestellt	H2	W5

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten können ÜK nicht direkt an FRS auf der Brücke angeschlossen werden. Aus diesem Grund werden die FRS auf der Brücke mit einem möglichst baugleichem FRS für den Freilandbereich über die Brücke hinaus verlängert. Diese FRS ermöglichen auch den Anschluss einer ÜK. Aus diesem Grund wurden für dieses Forschungsprojekt nicht die in Tabelle 1 aufgelisteten FRS für Brücke gewählt sondern die dazu passenden FRS für Freiland gewählt (Tabelle 2). Die Kombination des Stahl FRS KB1 RH3 von der Firma voestalpine Krems Finaltechnik GmbH (VAKF) mit dem Beton FRS DB100 K280 6m von der Firma DELTABLOC wurde eine standardisierte ÜK konzeptioniert. Mit den weiteren Stahl FRS KB1 RH2 von der Firma VAKF, dem Stahl FRS 3n24872 von der Firma Fracasso und dem Beton FRS BL300 von der Firma IMEVA sowie dem Beton FRS RB100L\_8 von der Firma REBLOC erfolgte ein Funktionsnachweis der konzipierten ÜK.

Tabelle 2: Für die simulationsbasierende Konzeptionierung der ÜK-Sanierung gewählte FRS

Stahl FRS	
<p>Aufhaltestufe H2</p> <p>VAKF KB1 RH2</p>  <p>Voestalpine.com</p>	<p>Aufhaltestufe H3</p> <p>VAKF KB1 RH3</p>  <p>Voestalpine.com</p>
<p>Fracasso 3n24872</p>  <p>fracasso-vi.at</p>	<p>IMEVA BL300</p>  <p>imeva.it</p>
Beton FRS	
<p>Aufhaltestufe H3</p> <p>REBLOC RB100L_8</p>  <p>rebloc.com</p>	<p>Aufhaltestufe H4b</p> <p>DELTABLOC DB100 K280 6m</p>  <p>concrete-solutions.eu</p>

### 2.1.2 Klassifizieren von realen Einbaubedingungen und baulichen Einschränkungen vor Ort

Im Zuge der Bestandsanalyse wurden auch reale Einbaubedingungen der Übergangskonstruktionen gesammelt. Diese können in zwei Hauptgruppen eingeordnet werden:

- Ein ortsfestes Objekt, wie z.B. ein Überkopfwegweiser oder Brückenpfeiler, ist an der Hinterseite der ÜK verbaut.
- Die ÜK liegt am FRS der Gegenfahrbahn an.

In Abbildung 4 sind Beispiele für diese zwei Gruppen dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass in beiden Fällen der verfügbare Verschiebungsweg des FRS deutlich eingeschränkt ist. Teilweise befinden sich die Hindernisse im Wirkungsbereich des FRS bzw. lassen überhaupt keine Verschiebung beim Anprall zu, sind somit auf Block zum FRS.

#### Ortsfeste Objekte hinter dem FRS



#### Angrenzendes FRS der Gegenfahrbahn



Abbildung 4: Situationen realer Einbaubedingungen (Quelle: ASFINAG, VAKF)

Die Vielfalt der unterschiedlichsten Aufstellsituationen konnten nicht im gesamten Umfang durch Simulationen nachgestellt und analysiert werden. Daher wurde ein generischer Ansatz gewählt und eine vereinfachte Begrenzung des zur Verfügung stehenden Wirkungsbereiches simuliert.

### 2.1.3 Erarbeitung von Funktionsweisen und Wirkprinzipien von Übergangskonstruktionen

Im Projekt ENGAGEMENT (2021) wurden durch Analyse von bereits getesteten ÜK von Stahl FRS auf Beton FRS Wirkprinzipien abgeleitet. Im gegenständlichen Projekt wurden diese erweitert und sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Für jedes Wirkprinzip wurden konstruktive Maßnahmen erarbeitet, welche direkt in einem FRS angewendet werden können. So kann beispielsweise die Verankerung über die Umsetzung einer Stehverdichtung verstärkt oder das „Einfädeln“ des Fahrzeuges über das Anbringen eines Gleitprofils verhindert werden.

Tabelle 3: Wirkprinzipien und dazugehörige konstruktive Maßnahmen

Wirkprinzip	Beispiele von konstruktiven Maßnahmen
Erweiterung bzw. Verstärkung der Abstützung/Verankerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stehverdichtung</li> </ul>
Verstärkung des Zugbandes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Versteifung am bestehenden Zugband</li> <li>• Zusätzlichen Holm hinter den Leitschienenbändern</li> <li>• Zweites Leitschienenband</li> </ul>
Verhindern des „Einfädelns“ am Anschlusselement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gleitprofil</li> <li>• Zweites Leitschienenband</li> </ul>
Ansteigender Steifigkeitsverlauf	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stehverdichtung</li> <li>• zusätzlichen Holm hinter den Leitschienenbändern</li> <li>• Versatz der ersten Betonelemente</li> </ul>

## 2.2 Bewertungsmethoden für den Fahrzeuganprall

Die Bewertung der ÜK sowohl in den Simulationen als auch im Test erfolgt nach den in der EN 1317-2 definierten Bewertungskriterien [5]. Die Validität der Simulationsmodelle wird durch den Vergleich dieser Kriterien mit den in der EN 16303 [6] definierten Toleranzen bestimmt.

### 2.2.1 Definition der Aufhaltestufen und Anprallprüfungen

Die Aufhaltestufe definiert gemeinsam mit der Anprallheftigkeit und dem Wirkungsbereich das Leistungsvermögen eines FRS. Die jeweilige Aufhaltestufe setzt sich aus verschiedenen Anprallprüfungen zusammen. Die Anprallprüfungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst [4]. Für jede Anprallprüfung wird ein Fahrzeugtyp (z.B. Personenkraftwagen) mit einer bestimmten Gesamtmasse, der Anprallwinkel und die Anprallgeschwindigkeit des Fahrzeuges vorgegeben.

Tabelle 4: Anprallprüfungen nach EN 1317-2 [5]

Prüfung	Anprallgeschwindigkeit km/h	Anprallwinkel Grad	Gesamtprüfmasse kg	Fahrzeugart
TB 11	100	20	900	Personenkraftwagen
TB 21	80	8	1 300	Personenkraftwagen
TB 22	80	15	1 300	Personenkraftwagen
TB 31	80	20	1 500	Personenkraftwagen
TB 32	110	20	1 500	Personenkraftwagen
TB 41	70	8	10 000	Lastkraftwagen
TB 42	70	15	10 000	Lastkraftwagen
TB 51	70	20	13 000	Bus
TB 61	80	20	16 000	Lastkraftwagen
TB 71	65	20	30 000	Lastkraftwagen
TB 81	65	20	38 000	Sattelzug

Die Aufhaltestufen werden durch Kombination der Anprallprüfungen definiert (Tabelle 5). Für ein FRS der Aufhaltstufe H3 sind die Anprallprüfungen TB11 und TB61 erfolgreich durchzuführen.

Tabelle 5: Aufhaltestufen und Anprallprüfungen nach EN 1317-1 [5]

Aufhaltestufen	Abnahmeprüfung			
Rückhaltevermögen bei geringem Anprallwinkel	T1		TB 21	
	T2		TB 22	
	T3		TB 41 und TB 21	
Normales Rückhaltevermögen	N1		TB 31	
	N2		TB 32 und TB 11	
Höheres Rückhaltevermögen	H1		TB 42 und TB 11	
	L1			TB 42 und TB32 und TB 11
	H2		TB 51 und TB 11	
	L2			TB 51 und TB32 und TB 11
	H3		TB 61 und TB 11	
	L3			TB 61 und TB32 und TB 11
Sehr hohes Rückhaltevermögen	H4a H4b		TB 71 und TB 11 TB 81 und TB 11	
	L4a L4b		TB 71 und TB32 und TB 11 TB 81 und TB32 und TB 11	
ANMERKUNG 1 Aufhaltestufen mit geringem Anprallwinkel sind nur für vorübergehende Schutzeinrichtungen vorgesehen. Vorübergehende Schutzeinrichtungen können auch für höheres Rückhaltevermögen geprüft werden.				
ANMERKUNG 2 Eine bei einer gegebenen Aufhaltstufe erfolgreich geprüfte Schutzeinrichtung ist als Einrichtung anzusehen, die auch die Prüfbedingung der niedrigeren Gruppe erfüllt hat, wobei N1 und N2 jedoch nicht T3 umfassen, die H-Stufen nicht die L-Stufen und H1, ..., H4b nicht N2 umfassen.				
ANMERKUNG 3 Da die Prüfung und Entwicklung von Schutzeinrichtungen mit sehr hohem Rückhaltevermögen in verschiedenen Ländern unter Verwendung sehr unterschiedlicher Typen von schweren Fahrzeugen stattgefunden hat, sind in dieser Norm gegenwärtig die beiden Prüfungen TB 71 und TB 81 angegeben. Die beiden Stufen des Rückhaltevermögens H4a und H4b sollten nicht als äquivalent angesehen werden, und zwischen ihnen besteht keine hierarchische Ordnung. Das gleiche gilt für die beiden Aufhaltstufen L4a und L4b.				
ANMERKUNG 4 Die Leistung der Aufhaltelassen L wird im Vergleich zu den entsprechenden Klassen H durch die Ergänzung von Prüfung TB 32 erhöht.				

### 2.2.2 Bewertungskriterien für einen Fahrzeuganprall

Bei der Durchführung der Anprallprüfungen wird das FRS anhand der Kriterien gemäß EN 1317-1 [4] bewertet. Dabei wird zwischen Fahrzeug- und FRS-bezogenen Kriterien unterschieden. Eine detaillierte Berechnung der Kriterien ist in der EN 1317-1 [4] zu finden.

#### Fahrzeugbezogene Kriterien

Für die Beurteilung der Anprallheftigkeit für Pkw Insassen werden die Kriterien ASI (Acceleration Severity Index), THIV (Theoretical Head Impact Velocity) und die theoretische Flugzeit des Kopfes (ToF – Time of Flight) berechnet. Dazu werden die Beschleunigungen und Drehraten im Fahrzeugschwerpunkt bei einem Test bei der entsprechenden Anprallprüfung aufgezeichnet (Abbildung 5).

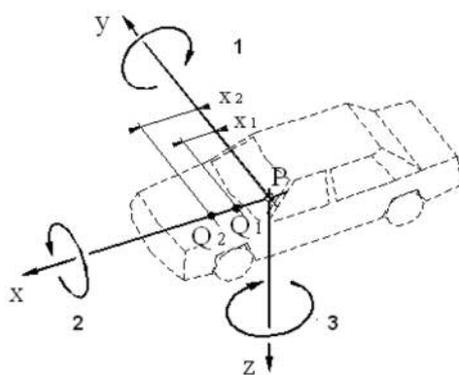


Abbildung 5: Lage der Sensoren im Testfahrzeug [4]

Über den ASI wird die, auf den Insassen des Fahrzeuges wirkende, Beschleunigung bewertet. Dabei fließen die Beschleunigungen in den drei Achsen mit unterschiedlicher Gewichtung ein. Der ASI berechnet sich nach Gleichung (1). Der Maximalwert wird auf eine Dezimalstelle mathematisch gerundet und ergibt den ASI Wert.

$$\sqrt{\frac{a_x^2}{k_x} + \frac{a_y^2}{k_y} + \frac{a_z^2}{k_z}} \tag{1}$$

Mit  $a_x, a_y, a_z$  als gefilterten Komponenten der Beschleunigung.

Das Kriterium THIV spiegelt die theoretische Anprallgeschwindigkeit des Insassenkopfes am Interieur wieder, welches über eine generische Geometrie abgebildet ist. Für die Berechnung des THIV in Gleichung (2) wird die Kopfgeschwindigkeit in x mit jener in y verrechnet, wobei die Gier-Geschwindigkeit des Fahrzeuges anteilmäßig in den beiden Komponenten berücksichtigt wird.

$$\tag{2}$$

Die theoretische Flugzeit des Kopfes (ToF – Time of Flight) wird ermittelt, indem die abgeleitete Kopfbewegung in x und y Richtung mit den Geometriemaßen des generischen Interieurs abgeglichen wird. Erreicht der Kopf die Grenze des generischen Interieurs in x- oder y-Richtung, findet der theoretische Kopfanprall statt. Die Geschwindigkeit des Kopfes zu diesem Zeitpunkt bestimmt den THIV.

In Tabelle 6 sind die Grenzwerte des ASI und THIV nach den drei unterschiedlichen Anprallheftigkeitsstufen zusammengefasst.

Tabelle 6: Einstufung der Anprallheftigkeit laut EN1317 [4]

Anprallheftigkeit	Indexwerte		
A	$ASI \leq 1,0$	und	$THIV \leq 33\text{km/h}$
B	$ASI \leq 1,4$		
C	$ASI \leq 1,9$		

### FRS-bezogene Kriterien

Als FRS-bezogene Kriterien werden die dynamische Durchbiegung ( $D_m$ ), der Wirkungsbereich des FRS ( $W_m$ ) und die Fahrzeugeindringung ( $V_{Im}$  – vehicle intrusion) berechnet (Abbildung 6).  $D_m$  bezeichnet die maximale Deformation des FRS an der anprallzugewandten Systemseite.  $W_m$  wird von der unverformten Systemvorderkante bis zur maximalen Verschiebung an der anprallabgewandten Systemseite gemessen.  $V_{Im}$  bestimmt den maximalen Überhang eines 4 m über der Fahrbahn am Auflieger montierten Targets über die unverformte Systemvorderkante.

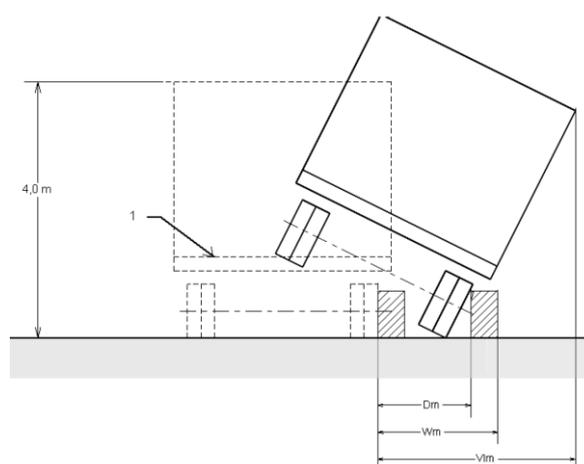


Abbildung 6: Definitionen der Kriterien  $D_m$ ,  $W_m$  und  $V_{Im}$  laut EN1317 [4]

### 2.2.3 Bewertungskriterien für die Validierung von Simulationsmodellen

Die Norm EN 16303 [6] gibt Kriterien und Toleranzen für die Bewertung der Validität der Modelle vor, wie sie in Tabelle 7 zusammengefasst sind. Für alle Fahrzeuge werden die FRS-bezogenen Kriterien dynamische Durchbiegung ( $D_m$ ) und Wirkungsbereich ( $W_m$ ) evaluiert. Für die Personenkraftwagen

werden zudem die fahrzeugbezogenen Kriterien ASI, THIV und Time of Flight (ToF), untersucht. Bei allen Fahrzeugen außer den Pkw wird zusätzlich die Fahrzeugeindringung (VIm) bewertet. Die Berechnungen der Kriterien ASI und THIV erfolgt anhand der Gleichungen in Kapitel 2.2.2. Als weiteres Kriterium wurde die Kinematik der Fahrzeuge in den Validierungssimulationen bewertet.

Tabelle 7: Bewertungskriterien für Systemvalidierung auf Basis EN 16303 [6]

Kriterium	Anprallkonfiguration TB11	Andere Anprallkonfigurationen
Dm		
Wm		
VIm	-	
ASI	$\pm 0,1$	-
THIV	$\pm 0,3 \text{ km/h}$	-
ToF	$\pm 0,05 \text{ s}$	-

dynamische Durchbiegung in m aus dem Referenztest

dynamische Durchbiegung in m aus der Simulation

Wirkungsbereich in m aus dem Referenztest

Wirkungsbereich in m aus der Simulation

Fahrzeugeindringung in m aus dem Referenztest

Fahrzeugeindringung in m aus der Simulation

### 2.3 Modellierungsmethoden in der FE-Simulation

Die Untersuchungen von Verbesserungsmaßnahmen wird anhand von Finite Elemente (FE) Simulationen durchgeführt. Für die FE-Simulation wird ein Model des realen FRS mit diskreten Elementen, wie Würfel oder Schalen, abgebildet. Durch die Zuweisung von bestimmten Material- und Querschnittseigenschaften sowie durch die Implementation von Kontakt- und Randbedingungen wird ein realistisches Deformationsverhalten der Bauteile erarbeitet.

Mit einem FE-Modell kann eine Vielzahl an Simulationen unter immer gleichbleibenden Randbedingungen und damit auch Parametervariationen durchgeführt werden. Verglichen mit realen Tests ist diese Methode zeit-, ressourcen- und kostensparend, insbesondere, wenn die Auswirkungen von konstruktiven Änderungen dargestellt und bewertet werden sollen.

Folgend sind die in der FE-Simulation angewandten Modellierungsmethoden für Bauteile, Randbedingungen und Verbindungstechniken detailliert beschrieben.

### 2.3.1 Modellierung der Bauteile

Die in technischen Zeichnungen vorgegebenen Geometrien werden vereinfacht und mit diskreten Elementen abgebildet. Der Detailierungsgrad richtet sich dabei nach der Mindestelementkantenlänge. Die Mindestelementkantenlänge ergibt sich, je nach Anwendungsfall, als Kompromiss zwischen Auflösungsgrad der Geometrien und Simulationszeit, da ein kleinerer Auflösungsgrad eine größere Zahl an Elemente und somit mehr Rechenaufwand bedeutet. Dickwandige Bauteile, wie hier beispielsweise Betonfertigteile, werden mittels solid Elementen, dünnwandige Bauteile wie beispielsweise Stahlbleche mittels shell Elementen und stabförmige Geometrien wie beispielsweise Bewehrungsstäbe mittels 1D Beams modelliert.

Die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften werden den Bauteilen über Materialkarten zugewiesen. Dabei wird zwischen deformierbaren und starren Materialien unterschieden. Starre Materialien kommen dann zum Einsatz, wenn die Deformation des Bauteils vernachlässigt werden kann und lediglich kinematische Aspekte von Interesse sind. So werden zum Beispiel die Fertigteile der FRS starr modelliert, sofern in den zugehörigen Testberichten keine nennenswerten Deformationen dieser dokumentiert sind. Im Gegensatz dazu, wird Fertigteilen ein deformierbares Material zugewiesen, wenn die Wirkung von Bewehrungen und Verbindungen zu anderen Bauteilen von wesentlichem Interesse sind. Materialdaten werden aus der Literatur für die Befüllung der Materialkarten herangezogen.

### 2.3.2 Verbindungstechniken

Aufgrund der begrenzten Mindestelementgröße durch die Diskretisierung bei der FE-Modellierung, muss für die Repräsentation von kleinen Bauteilen, wie zum Beispiel Schrauben, eine Ersatzmodellierung angewendet werden. Die Schraubenverbindung, wie sie zwischen Stahlleitschiene und Stahlleitschiene sowie zwischen Stahlleitschiene und Betonelement auftreten, werden mittels Beams in der jeweiligen Schraubenlänge vereinfacht. In Abbildung 7 ist exemplarisch die Schraubenverbindung zwischen den zwei Bauteilen A und B dargestellt. Je ein Ende bzw. Knoten des Beams, welcher die Schraube in Querschnitt und Material repräsentiert, ist mit einem der zu verschraubenden Bauteile starr verbunden. Den Beams ist ein Stahlmaterial \*MAT\_SPOTWELD mit Materialparameter der jeweiligen Schraube zugewiesen. Das Material der Beams ist ohne Versagen implementiert. Da durch die notwendigerweise stark vereinfachte Abbildung der Schraubenverbindung der Belastungszustand, wie er in der Realität auftreten kann, nicht abgebildet werden kann, ist keine exakte Vorhersage des Bruchverhalten möglich. Demnach wurde auf die Abbildung vom Versagen der Schraubenverbindungen verzichtet und die Bewertung, ob der Zugverbund der ÜK standhält, über die auftretenden Zugkräfte in den einzelnen Komponenten

durchgeführt. Zu diesen Zugkräften liegen Vergleichswerte von den Herstellern vor, anhand derer ein mögliches Versagen abgeschätzt werden kann.

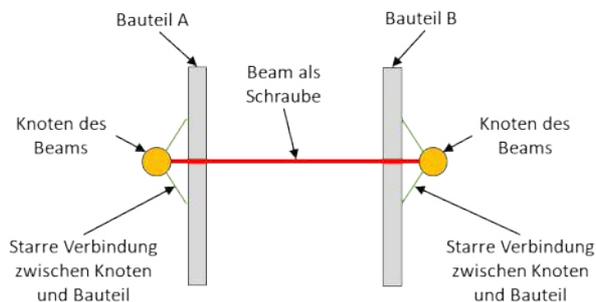


Abbildung 7: Modellierung der Schraubenverbindung zwischen Stahlleitschiene und Betonelement

Ist ein Fertigteil als deformierbares Material ausgeführt, werden die im realen Objekt eingegossenen Stahlbewehrungen mittel Beams abgebildet. Die Verbindung dieser Beams zu den Solid-Elementen des Betons werden über `*CONSTRAINT_BEAM_IN_SOLID` realisiert. Diese Verbindungsmethode wurde speziell für diesen Anwendungsfall entwickelt [7] und in Studien angewendet [8].

### 2.3.3 Modellierung des Untergrundes

Der Untergrund, in den die Steher der Stahl FRS gerammt sind, ist für jeden Steher separat über den Steher umschließende solid Elemente abgebildet (Abbildung 8). Die Modellierungsmethodik als auch die Materialparameter wurden auf Basis der von Klasztorny et al. [9] beschriebenen Modelle angewendet. Klasztorny et al. beschäftigten sich genau mit der Modellierung von gerammten Stehern von FRS. Die Nachgiebigkeit des Untergrundes kann über drei vordefinierte Materialmodelle eingestellt oder über Modifikation der Materialparameter angepasst werden. Welches Material für den Untergrund in den jeweiligen Modellen schlussendlich zum Einsatz kommt, wird im Zuge der Validierung des jeweiligen Systems bestimmt. Das Material wird derart gewählt, damit die Systemauslenkung und das Systemverhalten dem realen Test angeglichen werden kann.

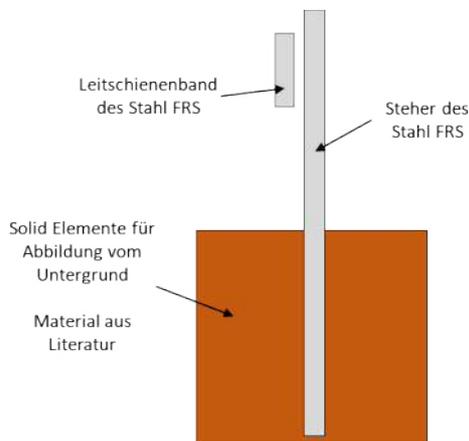


Abbildung 8: Modellierung des im Untergrund verankerten Stehers

### 2.3.4 Modellierung der Messstellen

Für die Auswertung der auftretenden Zugkräfte wurden Messstellen implementiert. In Abbildung 9 links ist eine Leitschiene mit Verstärkungsprofil dargestellt. In dem definierten Querschnitt werden die auftretenden Zugkräfte in Leitschiene und Verstärkungsprofil zusammen ausgewertet. Pro Leitschiene ist jeweils eine Messstelle 400 mm von der Stirnseite entfernt und eine Messstelle in der Mitte der Leitschiene implementiert. Die Zugkräfte in der Kupplung werden im Kupplungssteg gemessen (siehe Abbildung 9 rechts).

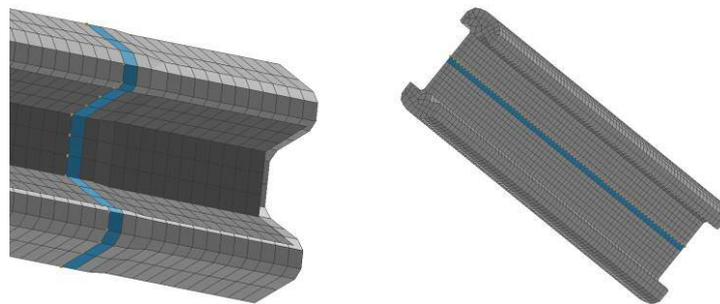


Abbildung 9: Querschnitte für die Auswertung von Zugkräften in Leitschiene (links) und Kupplung (rechts)

## 2.4 Konstruktive Gestaltung und simulationsbasierte Optimierung der Übergangskonstruktion

Die schematische Vorgehensweise zur Erarbeitung der Verbesserungsmaßnahmen ist in Abbildung 10 dargestellt. Es werden FE-Modelle von den zu untersuchenden FRS aufgebaut. Unter Anwendung von frei verfügbaren FE-Fahrzeugmodellen werden die Anprallkonfigurationen, laut den Berichten der realen Anprallversuche, nachsimuliert und somit das Modell validiert. Es wird von den Fachleuten der Hersteller ein Entwurf einer ÜK angefertigt, welche zwei unterschiedliche FRS verbindet. Diese ÜK wird ebenso als FE Modell abgebildet und mit den validierten FRS verbunden. Durch die Simulation wird die Rückhaltefunktion der entwickelten ÜK bewertet und optimiert, und die endgültige Version der Basis-ÜK im realen Test geprüft.

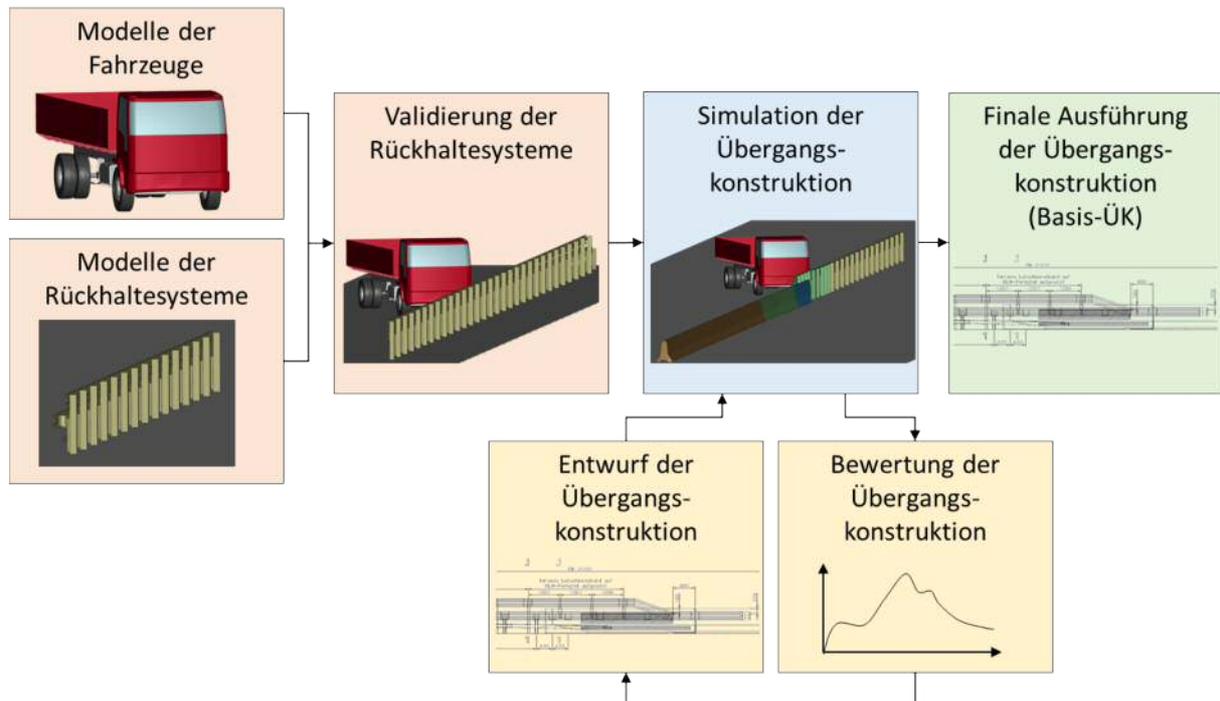


Abbildung 10: Vorgehen zur Erarbeitung von Verbesserungsmaßnahmen

### 2.4.1 Validierung der Fahrzeugmodelle

Bei den hier verwendeten Fahrzeugmodellen handelt es sich um öffentlich verfügbare FE-Modelle der NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration [10]). Die Modelle wurden am Institut für Fahrzeugsicherheit der TU Graz in anderen Projekten weiterentwickelt, um die Anpralleigenschaften der Fahrzeuge aus den Tests genauer in der Simulation abbilden zu können.

Folgende Simulations-Setups sind für die Validierung der Fahrzeugmodelle gemäß der in EN 16303 [6] festgelegt und für den 16 t Lkw (TB61) beschrieben:

- Statischer Test
- Fahrwerk: Einfederung und Ausfederung
- Lenkung
- Geradeausfahrt
- Kurvenfahrt
- Stufenfahrt
- Anprall an eine starre Wand

#### Statischer Test

Durch das reine gravitationsbedingte Aufsetzen des Fahrzeuges auf einem starren Untergrund wird die Stabilität des Modells und das Verhalten der Radaufhängungen überprüft (Abbildung 11). Dabei darf eine maximale Beschleunigung und ein maximaler Federweg nicht überschritten werden.

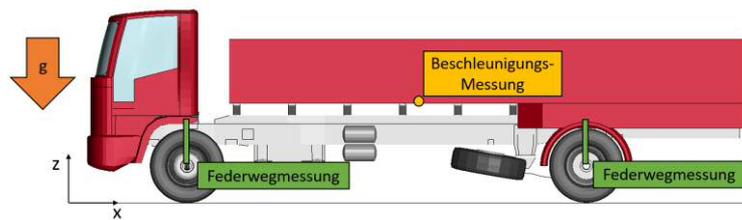


Abbildung 11: Statische Testkonfiguration für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch

### Fahrwerk: Einfederung und Ausfederung

In den zwei Setups wird getestet ob das Ein- sowie Ausfederverhalten des Fahrwerks mit der vorgegebenen Federkennlinie im Modell übereinstimmt und es wird der maximal mögliche Ein- bzw. Ausfederweg bestimmt. Dazu werden bei fixiertem Domlager der Radaufhängung alle Räder jeweils bis auf Anschlag ein- und ausgefedert (Abbildung 12).

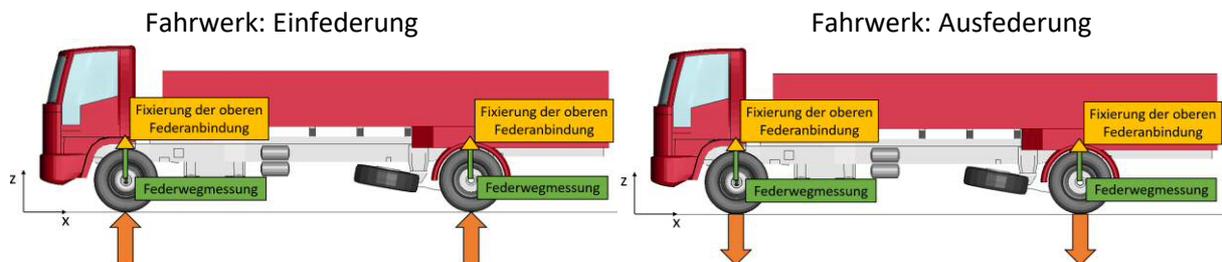


Abbildung 12: Testkonfiguration „Fahrwerk“ für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch

### Lenkung

Die Funktionsweise der Lenkung wird über den Nachweis des Ackermann Prinzips dargestellt. Durch die Rotation eines Rades werden die Lenkwinkel beider Räder aufgezeichnet, die maximalen Lenkwinkel bestimmt und die Lenkgeometrie des Modells plausibilisiert (Abbildung 13).

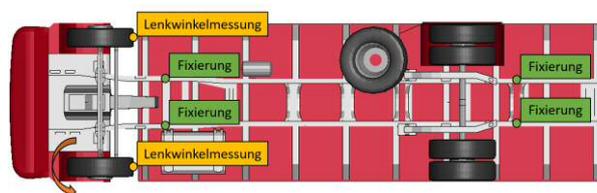


Abbildung 13: Testkonfiguration „Lenkung“ für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch

### Geradeausfahrt

Das dynamische Fahrverhalten des Modells wird über eine simple Geradeausfahrt verifiziert. Über die Vorgabe einer initialen Geschwindigkeit des Fahrzeuges soll dieses einem geraden Kurs folgen (Abbildung 14). Die aufgezeichnete Trajektorie wird mit dem vorgegebenen Korridor verglichen.

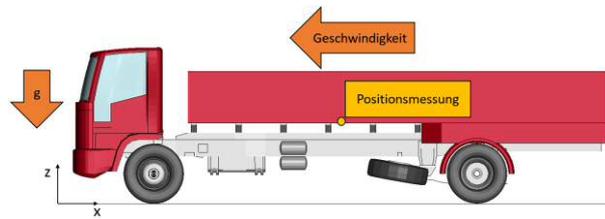


Abbildung 14: Testkonfiguration „Geradeausfahrt“ für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch

### Kurvenfahrt

Für die Kurvenfahrt wird bei initialer Geschwindigkeit des Fahrzeuges ein Rad wie im Setup „Lenkung“ gelenkt und für eine Sekunde konstant gehalten (Abbildung 15). Durch die darauffolgende Wegnahme der Lenkkraft wird das Rückstellmoment, welches zu einer Geradeausfahrt führen soll, überprüft. Zusätzlich wird die numerische Stabilität des Modells durch die Veranschaulichung des Energiegleichgewichtes bestätigt.

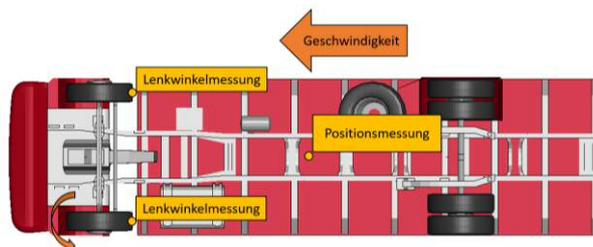


Abbildung 15: Testkonfiguration „Kurvenfahrt“ für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch

### Stufenfahrt

Das dynamische Dämpfungsverhalten der Radaufhängung wird durch das Überfahren einer Stufe verifiziert. Das Fahrzeug überfährt mit gegebener Initialgeschwindigkeit mit den Vorder- und Hinterrädern eine definierte Stufengeometrie (Abbildung 16). Dabei wird das Dämpfungsvermögen der Radaufhängung mit vorgegebenen Korridoren verglichen.

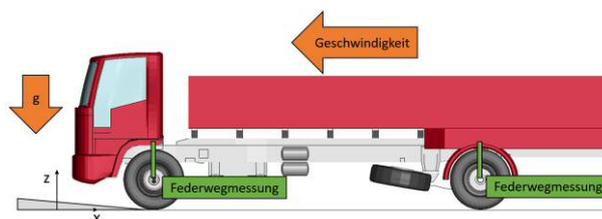


Abbildung 16: Testkonfiguration „Stufenfahrt“ für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch

### Anprall an eine starre Wand

Die Simulation eines Anpralles an eine starre Wand zeigt die numerische Stabilität des Modells auf (Abbildung 17). Werden bei der Validierung von Pkw Modellen zusätzlich die Kriterien ASI und THIV mit jenen aus realen Tests verglichen, ist das bei einem Lkw nicht anwendbar.

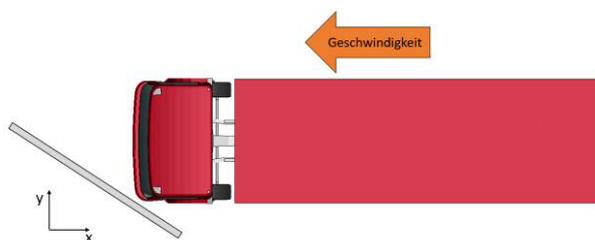


Abbildung 17: Testkonfiguration „Anprall an eine starre Wand“ für die Validierung des Fahrzeugs im TB61 Versuch

Die genaue Beschreibung der Simulationssetups sowie die aufgezeichneten Werte und die jeweiligen Korridore für die Erfüllung der Kriterien sind im Validierungsbericht (siehe Anhang) beschrieben.

#### 2.4.2 Aufbau und Validierung von FE-Modellen der häufigsten FRS

In Kapitel 2.1.1 wurden die im Bestand häufigsten FRS identifiziert. Für die Untersuchungen wurden FE-Modelle von den in Tabelle 8 angegebenen FRS aufgebaut.

Tabelle 8: Auswahl der FRS für den Modellaufbau

Typ	Hersteller	Produkt	Aufhaltestufe	Wirkungsbereich
Stahl	VAKF	KB1 RH2	H2	W5
	VAKF	KB1 RH3	H3	W5
	Fracasso	3n24872	H2	W5
	IMEVA	BL300	H3	W5
Beton	DELTABLOC	DB100	H4b	W6
	REBLOC	RB100L_8	H3	W5

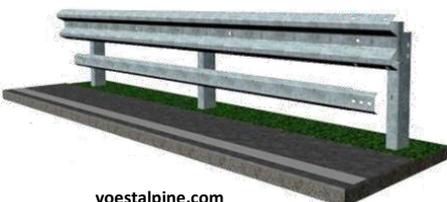
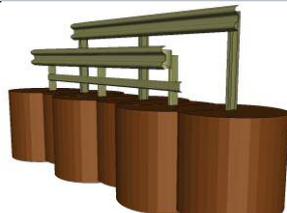
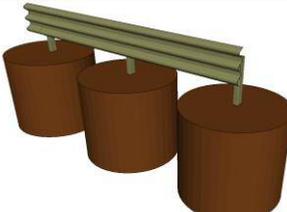
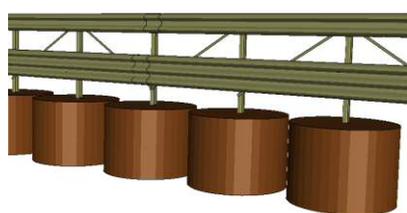
Da ein FE-Modell immer Vereinfachungen unterliegt, wie zum Beispiel der Simplifizierung von Verbindungen oder Geometrien, muss das Verhalten des Modells über den Vergleich mit realen Tests validiert werden. Da es nicht möglich ist, jedes Bauteil auf Komponentenbasis bzw. im Verbund mit anderen Bauteilen zu validieren, müssen die Ergebnisse ganzheitlich betrachtet werden. Es werden im Validierungsprozess die in Kapitel 2.2 beschriebenen Bewertungskriterien herangezogen.

Die für die einzelnen FRS benötigten Konstruktionszeichnungen wurden von den Herstellern zur Verfügung gestellt. Anhand dieser wurden FE-Modelle für jedes FRS aufgebaut. Die FRS wurden anhand von ebenso bereitgestellter Testberichte für die jeweilige Aufhaltestufe validiert (Tabelle 8). Der Validierungsprozess erfolgte auf Basis der EN 16303 [6] und die Modelle wurden anhand der in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Kriterien bewertet.

### Stahl FRS

Für alle untersuchten Stahl FRS wurden dieselben Modellierungsmethoden angewandt. Demnach unterscheiden sich die Modelle lediglich in ihrer Geometrie. Steher- und Leitschienen Querschnitte, Materialdaten sowie Schraubendurchmesser wurden aus den jeweiligen verfügbaren Fertigungszeichnungen übernommen. Schraubenverbindungen wurden, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, modelliert. Die Verankerung der Steher wurde, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, realisiert. In Tabelle 9 sind die Stahl FRS und die jeweilige Aufhaltestufe, für welche die Modelle validiert wurden, zusammengefasst.

Tabelle 9: Modelle der Stahl FRS und die jeweiligen Aufhaltestufen

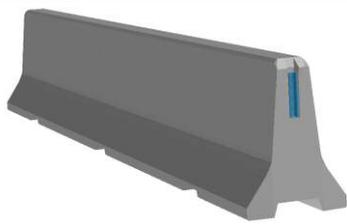
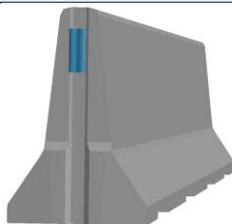
Stahl FRS	Simulationsmodell	Aufhaltestufe
VAKF KB1 RH2		
 <p>voestalpine.com</p>		<p>H2 TB11 und TB51</p>
VAKF KB1 RH3		
 <p>voestalpine.com</p>		<p>H3 TB11 und TB61</p>
Fracasso 3n24872		
 <p>Fracasso-deutschland.de</p>		<p>H2 TB11 und TB51</p>
IMEVA BL300		
 <p>Sitec.co.at</p>		<p>H3 TB11 und TB61</p>

### Beton FRS

Ebenso wie bei den Stahl FRS wurden die Beton FRS alle mit denselben Modellierungstechniken aufgebaut. Die Fertigteile stimmen in Geometrie und Gewicht mit jenen Elementen aus den zu Verfügung gestellten technischen Zeichnungen überein. Die Betonbauteile wurden als starres Material ausgeführt, deswegen wurde die innenliegende Bewehrungen nicht modelliert. Die Kupplungen

verfügen über ein elastisch-plastisches Stahlmaterial und können sich somit bei Belastung verformen. Der Bereich der Kupplung, welcher im realen Bauteil im Beton eingegossen ist, ist im Modell starr mit dem Betonelement verbunden. In Tabelle 10 sind die Beton FRS und die jeweilige Aufhaltestufe, für welche die Modelle validiert wurden, zusammengefasst.

Tabelle 10: Modelle der Beton FRS und die jeweiligen Aufhaltestufen

Beton FRS	Simulationsmodell	Aufhaltestufe
<b>DELTABLOC DB100 6m</b>		
		H4b TB11 und TB81
<b>REBLOC RB100L_8</b>		
		H3 TB11 und TB61

### Zusammenfassung

In Tabelle 11 sind die Anprallkonfigurationen, auf welche die einzelnen FRS validiert wurden, zusammengefasst. Dazu sind jeweils die Bewertungskriterien eingetragen.

Tabelle 11: Anprallkonfigurationen und Bewertungskriterien der validierten FRS

FRS	TB11	TB51	TB61	TB81
<b>VAKF KB1 RH2</b>	Dm / Wm / ASI	Dm / Wm	-	-
<b>VAKF KB1 RH3</b>	-	-	Dm / Wm / VIm	-
<b>Fracasso 3n24872</b>	Dm / Wm / ASI	Dm / Wm	-	-
<b>IMEVA BL300</b>	Dm / Wm / ASI / THIV / Tof	-	Dm / Wm / VIm	-
<b>DELTABLOC DB100</b>	Dm / Wm / ASI / THIV / Tof	-	-	Dm / Wm / VIm
<b>REBLOC RB100L_8</b>	Dm / Wm / ASI / THIV / Tof	-	Dm / Wm / VIm	-

### 2.4.3 Begriffsdefinition

In Abbildung 18 ist eine ÜK schematisch dargestellt. An die ÜK schließt ein Stahl FRS und ein Beton FRS (Basis-FRS) an. Diese FRS werden unverändert, also in der Ausführung wie sie zertifiziert wurden, aufgestellt. Der Bereich der ÜK wird durch Adaptierung der Basis-FRS, hier modifizierte FRS genannt, zusammengesetzt. Adaptierungen können konstruktive Maßnahmen im Stahl FRS, wie eine

Steherverdichtung, oder auch der Einsatz von Sonderelementen im Fertigteilensystem sein. Das vom Stahl FRS kommende erste Fertigteil wird als Anschlusselement bezeichnet.

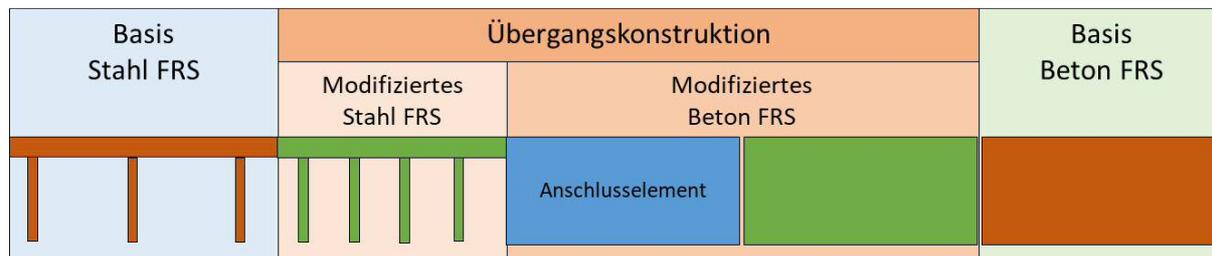


Abbildung 18: Schematischer Aufbau einer Übergangskonstruktion und Begriffsdefinition

### 2.4.4 Konstruktive Gestaltung der Basis-Übergangskonstruktion

Es wurde eine ÜK unter Einbeziehung der Wirkprinzipien erarbeitet, welche als Basis für die folgenden Untersuchungen gilt, genannt Basis-ÜK. Die Basis-ÜK wurde durch den Verbund der FRS KB1 RH3 und DB100 6m entwickelt. Diese FRS entsprechen den am häufigsten aufgestellten FRS im Bestand und dienen als Basis für die Entwicklung der ÜK.

Ziel bei der Konzeptionierung war der Einsatz von Standardbauteilen auf der Stahl- als auch auf der Betonseite, um einen Mehraufwand bei der Herstellung von Sonderteilen zu vermeiden. Somit können auch bei der Kombination anderer Basis-FRS Standardbauteile der jeweiligen Hersteller eingesetzt werden. Die Konstruktion ist in Abbildung 19 dargestellt und die technischen Zeichnungen mit weiteren Detailansichten ist im Anhang angefügt.

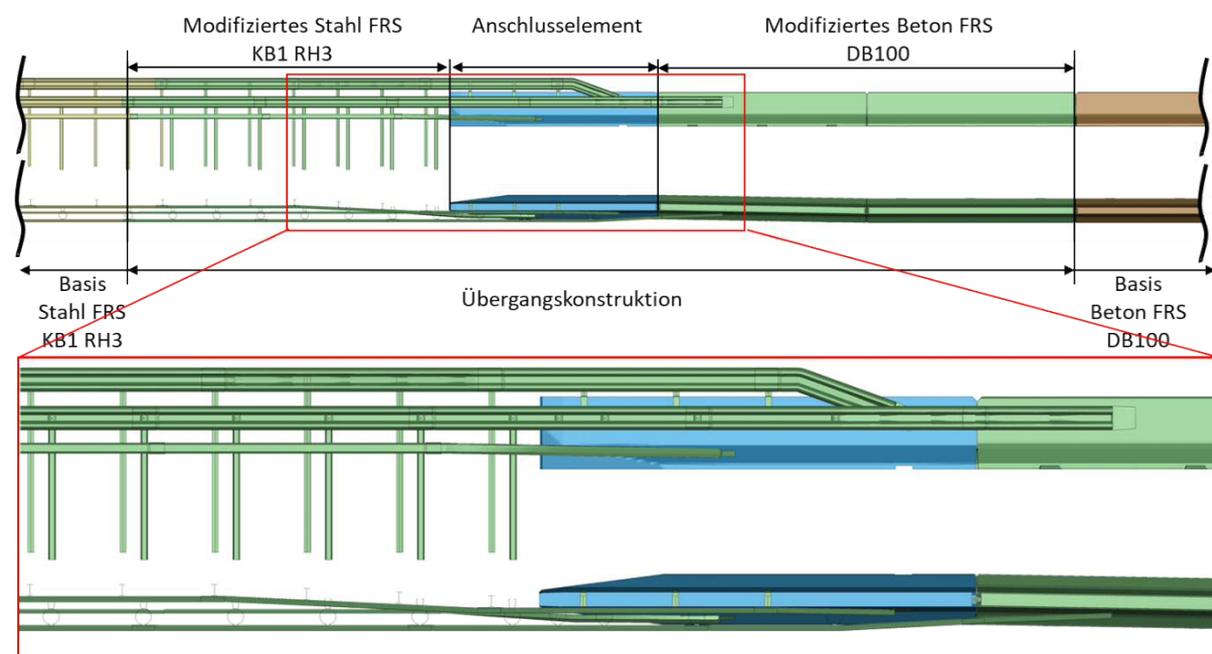


Abbildung 19: Aufbau der Basis-Übergangskonstruktion

Bei der Konzeptionierung der Basis-ÜK wurden folgende Wirkprinzipien adressiert:

### **Erweiterung bzw. Verstärkung der Abstützung/Verankerung**

In den letzten zwei Feldern vor dem Anschlusselement wurde das Stahl FRS mit einer Stehverdichtung auf Mindeststeherabstand des KB1 RH3 Systems aufgestellt (modifiziertes Stahl FRS).

### **Verhindern des „Einfädels“ am Anschlusselement**

Das Anschlusselement wurde nahe an den letzten Steher des Stahl FRS positioniert. In der Kombination mit dem Gleitprofil, welches im vorderen Bereich des Anschlusselementes verankert wurde, wird die Stirnseite des Anschlusselementes abgedeckt und das Abgleiten eines Fahrzeuges erreicht.

### **Ansteigender Steifigkeitsverlauf vom weicheren FRS hin zum steiferen FRS**

Das Stahl FRS wurde durch die Stehverdichtung versteift und durch die gewählten Anbindungspunkte des Leitschienenbandes am Beton FRS wird der ansteigende Steifigkeitsverlauf in der ÜK weiter fortgesetzt. Das obere Leitschienenband ist an drei Positionen mit dem Anschlusselement verbunden. Dazu werden verkürzte Steher so ausgeführt, dass sie auf dem Beton FRS aufgesetzt und verankert werden können. Das Ende des oberen Leitschienenbandes wurde nach unten auf das Anschlusselement verzogen und über eine Anschlussplatte an der dem Verkehr zugewandten Seite des Beton FRS verankert.

Das untere Leitschienenband wurde über vier Dämpfungselemente, wie sie im Stahl FRS verbaut sind, am Anschlusselement befestigt. Dabei wurden drei der Dämpfungselemente im selben Abstand wie im Basis- Stahl FRS angebracht. Ein zusätzliches Dämpfungselement an der „Nase“ des Anschlusselementes soll die frühestmögliche Aktivierung des Anschlusselementes gewährleisten. Nach dem letzten Dämpfungselement wurde das Leitschienenband zum zweiten Fertigteil hin verzogen und dort mit einer Standard Betonanschlussplatte verankert.

Das Anschlusselement wurde nach hinten versetzt und das darauffolgende Fertigteil verdreht aufgestellt um die Flucht des dritten Fertigteiltes mit der Systemvorderkante des Stahl FRS gewährleisten zu können (modifiziertes Beton FRS). Der dadurch gewonnene Abstand zwischen Leitschienenband und Anschlusselement wurde genutzt, um den Übergang vom Stahl FRS auf das Beton FRS mit einem möglichst kontinuierlich ansteigenden Steifigkeitsverlauf zu gestalten. Dazu wurde das Leitschienenband über vier Dämpfungselemente am Anschlusselement verankert. Die somit gestaltete Kraftübertragung zwischen Stahl- und Betonbauteilen ermöglicht bei Fahrzeuganprall die frühestmögliche Aktivierung des Anschlusselementes.

### 2.4.5 Simulationsbasierte Optimierung der Basis-ÜK

Die Optimierung der Basis-ÜK wurde simulationsbasierend über einen iterativen Prozess durchgeführt. Dazu wurde ein FE-Modell der Basis-ÜK aufgebaut und drei potentiell kritische Anprallpunkte für die TB61 Konfiguration definiert und simuliert (Abbildung 20). Der erste Anprallpunkt (APP) liegt beim letzten hinteren Steher des Basis- Stahl FRS und somit 8.260 mm vor dem Anschlusselement. Nach diesem Steher ist das Stahl FRS mit Stehverdichtung aufgestellt. Der zweite APP liegt beim viertletzten hinteren Steher vor dem Anschlusselement, 4.460 mm vor dem Anschlusselement. Der dritte APP wurde beim vorletzten vorderen Steher, 1.640 mm vor dem Anschlusselement, festgelegt.

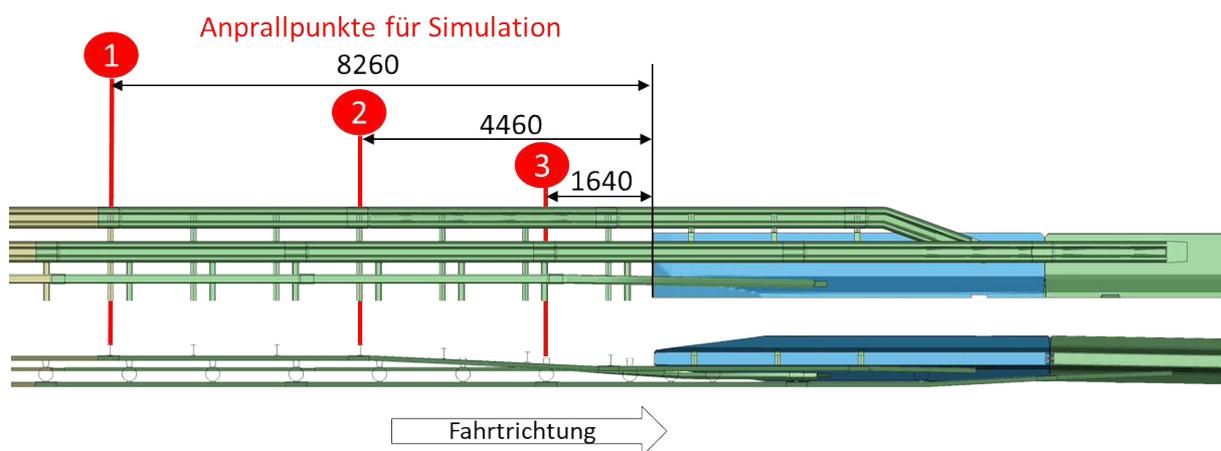


Abbildung 20: Anprallpunkte für die Simulation der Anprallkonfigurationen TB32 und TB61

Es wurde die TB61 Anprallkonfiguration an allen drei Anprallpunkten simuliert und über die Auswertung der auftretenden Zugkräfte, wie in Kapitel 2.3.4 beschrieben, und der Fahrzeugkinematik die Funktionsweise der ÜK bewertet.

Über den Abgleich der auftretenden Zugkräfte in Leitschienenband und Kupplungen mit Vergleichswerten konnte die Durchbruchssicherheit der simulierten ÜK beurteilt werden. Die zugrundeliegenden Vergleichswerte basieren auf Ergebnissen aus Komponententests und wurden von den Herstellern bereitgestellt.

Als ein weiteres Bewertungskriterium wurde die Sackbildung herangezogen. Dabei wurde analysiert, ob es zu einem stirnseitigen Kontakt der Fahrzeuge an der Stirnseite des Anschlusselementes kommt. In diesem Fall kann ein Fahrzeuganprall an die Stirnseite des Anschlusselementes nicht ausgeschlossen werden, was zu einer kritischen Kinematik führt.

Weiters wurde die Kinematik der Fahrzeuge auch subjektiv auf dessen Plausibilität durch die Einschätzung der Fachexperten seitens der Projektpartner von der Firma MABA Fertigteilindustrie GmbH und von der Firma voestalpine KREMS Finaltechnik GmbH bewertet.

Nach Bewertung eines Simulationsdurchganges wurden an der Konstruktion so lange Anpassungen durchgeführt, im FE-Modell nachgezogen und wieder an den drei Anprallpunkten simuliert, bis die auftretenden Zugkräfte unter den Vergleichswerten lagen und die finale Ausführung der Basis-ÜK erarbeitet war.

#### 2.4.6 Bestimmung des kritischen Anprallpunktes

Für den realen Test der Basis-ÜK als auch für die weiteren simulationstechnischen Untersuchungen wurde der kritischste der drei ausgewählten Anprallpunkte identifiziert. Dazu wurden die Simulationen der drei Anprallpunkte an die finale Basis-ÜK anhand der Sackbildung bewertet. Bei einer ausgeprägten Sackbildung ist die Gefahr des Einhakens des Fahrzeuges, als auch die Abscherung des Leitschienenbandes am Anschlusselement erhöht. Jener Anprallpunkt mit der stärksten Sackbildung für den TB61 Anprall wurde als der kritischste erachtet und im realen Versuch als auch in allen weiteren Simulationen als Anprallpunkt festgelegt.

### 2.5 Versuchstechnische Bewertung der Basis-Übergangskonstruktion

Abbildung 21 zeigt die Draufsicht auf das Areal mit der Anlaufspur in orange und die Position der zu testenden Übergangskonstruktion in grün.



Abbildung 21: Testgelände für EN1317 Anprallprüfungen

#### 2.5.1 Anprallkonfigurationen

Um das Leistungsvermögen der im Zuge dieses Projektes entwickelten ÜK für Pkw und Lkw aufzuzeigen, wurde ein TB32 und ein TB61 Anprallversuch durchgeführt. Dabei sollte ein angestrebter Kompromiss zwischen möglichst weichem Verhalten zur Umlenkung eines Pkw (Insassenbelastung) und dennoch steifer Struktur zum Aufhalten von schweren Fahrzeugen (Durchbruchssicherheit) erreicht werden. Als Anprallpunkt für beide Fahrzeuge wurde der aus der Simulation identifizierte kritische Anprallpunkt gewählt.

### 2.5.2 Testfahrzeuge

Die Testfahrzeuge entsprachen den Anforderungen der EN 1317-2 [5]. Für die Prüfung TB32 (1.500 kg) wurde ein Pkw der Marke BMW E39 Baujahr 1997 und für die Prüfung TB61 (16.000 kg) ein Lkw der Marke MAN Baujahr 1999 verwendet (Abbildung 22).



Abbildung 22: Verwendete Testfahrzeuge für Anprallkonfiguration TB32 (links) und TB61 (rechts)

### 2.5.3 Messdatenerfassung

Beim TB32 Anpralltest wurden die Fahrzeugbeschleunigungen und Drehraten zur Berechnung des ASI und THIV aufgezeichnet. Im Schwerpunkt des Fahrzeuges wurden zwei Beschleunigungssensoren des Typs 1203 vom Hersteller Meas-Spec mit einem Messbereich von 100 g und ein Drehratensensor des Typs 2103-2400 vom Herstellers IES mit einem Messbereich von 2.400 °/s montiert. Die Sensoren wurden kalibriert und auf einer im Fahrzeug befestigten Metallplatte montiert (Abbildung 23). Abbildung 23 links zeigt das Koordinatensystem des Fahrzeugs, wie es gemäß EN 1317-1 [4] festgelegt wird. Zur Messdatenerfassung wurde eine Mini Data Acquisition Unit (DAU) von Kayser Threde (K3700 MiniDAU®) mit einer Aufzeichnungsrate von 10 kHz verwendet. Die Synchronisierung der Messdaten erfolgte über einen Kontaktschalter.

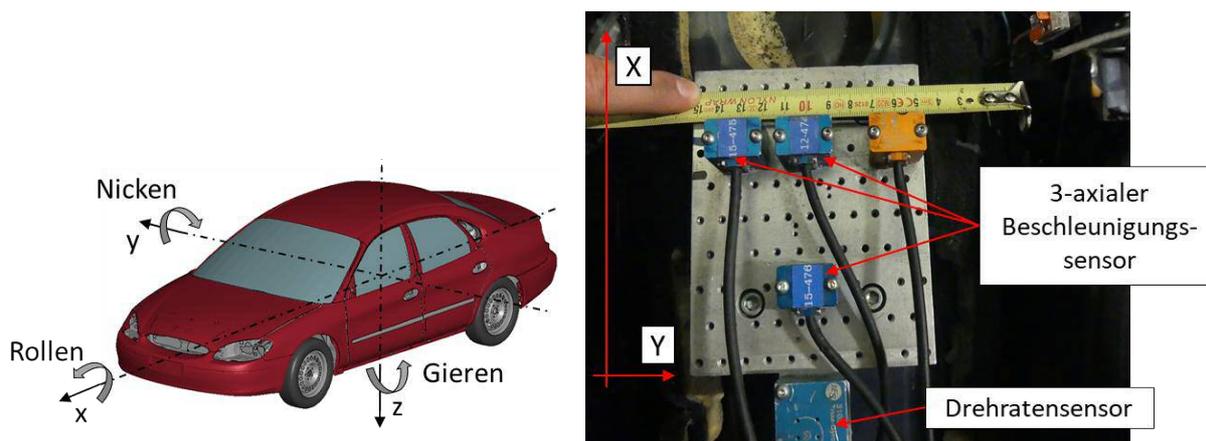


Abbildung 23: Fahrzeugkoordinatensystem (links) und Position der Sensoren im Fahrzeugschwerpunkt (rechts)

### 2.5.4 Videodatenaufzeichnung

Drei Hochgeschwindigkeitskameras mit 500 Bildern pro Sekunde (A, B und C) zeichnen die Versuche auf. In Abbildung 24 sind zwei in Flucht mit dem FRS positionierte Kameras skizziert, wobei Kamera A

die Frontansicht und Kamera B die Rückansicht aufnahm. Mit Kamera C wurde eine Überkopfaufnahme angefertigt. Kamera D mit einer Aufzeichnungsrate von 24 Bilder pro Sekunde war schwenkbar und verfolgte das Fahrzeug von der Anlaufspur über den Kontakt zum FRS bis hin zur Auslaufphase.

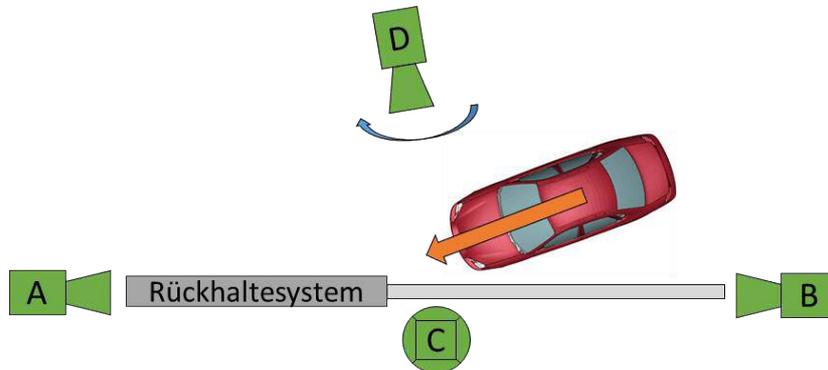


Abbildung 24: Schematische Positionen der Videokameras

### 2.5.5 Bewertung

Die Bewertung für den TB32 Anpralltest erfolgte durch die Kriterien ASI und THIV sowie die dynamische Durchbiegung ( $D_m$ ) und der Wirkungsbereich ( $W_m$ ). Bei dem TB61 Anpralltest wurden zuzüglich zur dynamischen Durchbiegung und zum Wirkungsbereich noch die Fahrzeugeindringung ( $V_{Im}$ ) ausgewertet.

## 2.6 Einflussuntersuchung einzelner Verbesserungsmaßnahmen

Bei der Konzeptionierung der Basis-ÜK wurden die erarbeiteten Wirkprinzipien in Form von konstruktiven Maßnahmen umgesetzt. Somit konnte nur eine Aussage über die Gesamtwirksamkeit der Maßnahmenkombination, nicht aber über jene der einzelnen Maßnahmen getroffen werden. Durch die Möglichkeiten in der Simulation konnten die Einflüsse der einzelnen Maßnahmen jedoch separat bewertet werden. Dazu wurden durch Modifikation des Modells der Basis-ÜK verschiedene Varianten erstellt, in welchen jeweils eine der in Kapitel 2.4.4 definierten Maßnahmen nicht berücksichtigt wurde. Durch die Simulation der TB32 als auch der TB61 Anprallkonfiguration konnte somit gezielt der Einfluss einer Maßnahme isoliert betrachtet werden. Zum Beispiel wurde in einer Variante der Steherabstand in den ersten zwei Leitschienenfeldern wieder auf einen Halbsteherabstand erweitert. Der Vergleich der Ergebnisse mit denen aus der Basis-ÜK ließen Rückschlüsse auf den Einfluss der Steherverdichtung zu. Die einzelnen Varianten sind wie folgt benannt:

- V1: Keine Steherverdichtung im Stahl FRS
- V2: Höherer Abstandes des letzten Stehers zum Anschlusselement
- V3: Keine Abschrägung des ersten Fertigteiles

- V4: Keine Dämpfungselemente zwischen Leitschienenband und Fertigteil
- V5: Kein Versatz der Fertigteile
- V6: Weniger Aufsatzsteher auf Anschlusselement
- V7: Kein Gleitprofil im Stahl FRS

In den folgenden Kapiteln sind die angestellten Modellanpassungen detaillierter beschrieben und in den Darstellungen rot markiert.

### 2.6.1 V1: Keine Stehververdichtung im Stahl FRS

In der Basis-ÜK wurde als Maßnahme eines kontinuierlichen Anstiegs der Steifigkeit vom „weichen“ Stahl FRS hin zum „steifen“ Beton FRS eine Stehververdichtung in den letzten zwei Leitschienenfeldern vor dem Anschlusselement vorgenommen. Um den Einfluss der Stehververdichtung aufzuzeigen, wurde nun im Modell der Basis-ÜK diese Stehververdichtung entfernt. Abbildung 25 zeigt das Modell der Basis-ÜK und darunter die Modifikation ohne Stehververdichtung im vorderen als auch hinterem Leitschienenband.

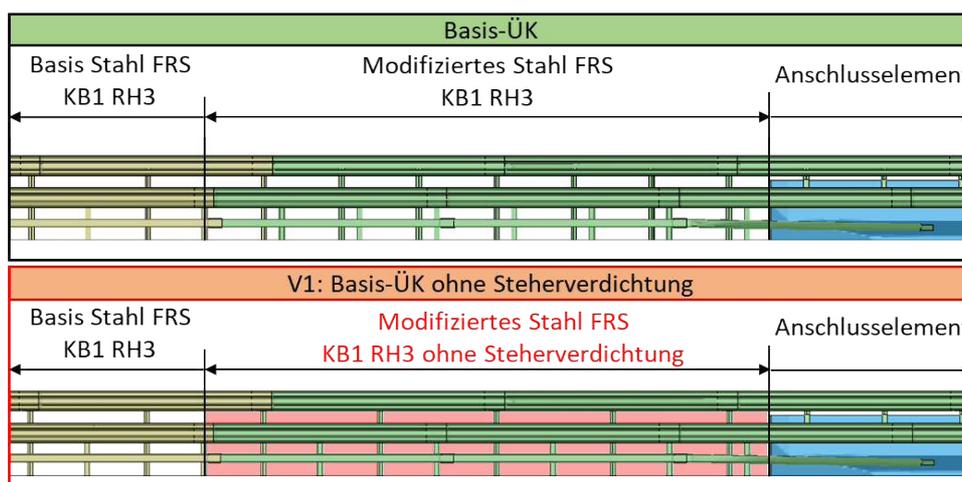


Abbildung 25: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung der Stehververdichtung

### 2.6.2 V2: Größerer Abstand des letzten Stehers zum Anschlusselement

Die Positionierung des letzten Stehers vor dem Anschlusselement unterstützt ebenfalls die kontinuierliche Steigerung des Steifigkeitsverlaufes über die ÜK und soll zudem die Gefahr des Einhakens des Fahrzeuges an der Nase des Anschlusselementes verhindern. Durch Wegnahme dieses Stehers konnte diese Maßnahme auf ihre Wirksamkeiten beurteilt werden. In Abbildung 26 ist das Modell der Basis-ÜK und darunter die Modifikation ohne dem letzten Steher vor dem Anschlusselement dargestellt.

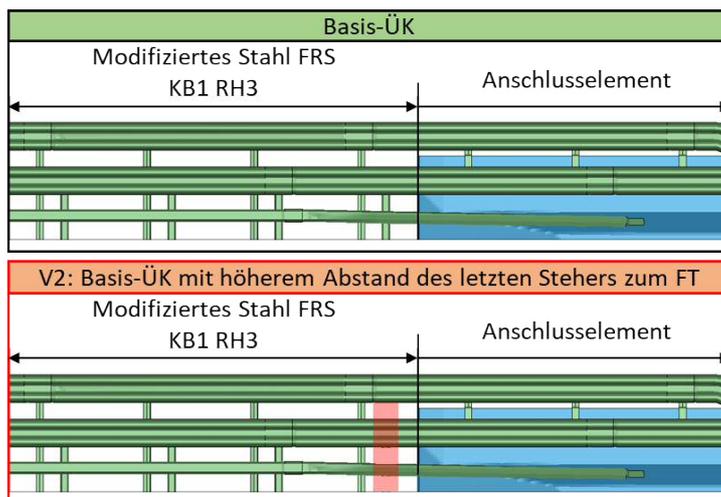


Abbildung 26: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung des letzten Stehers vor dem Anschlusselement

### 2.6.3 V3: Keine Abschrägung des Anschlusselementes

Die spezielle Form des Anschlusselementes soll die Fahrzeuge umlenken und ein Einhängen der Fahrzeugfront an der Stirnseite des Anschlusselementes verhindern. Der Einsatz eines Standard-Fertigteiles ohne Abschrägung ist in Abbildung 27 dargestellt.

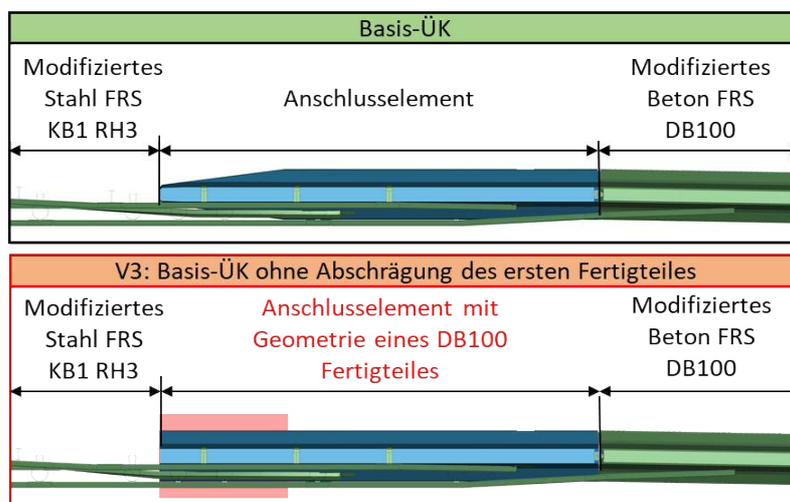


Abbildung 27: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung der Abschrägung des Anschlusselementes

### 2.6.4 V4: Keine Dämpfungselemente zwischen Leitschienenband und Fertigteil

Die frühestmögliche Ankopplung des Leitschienenbandes an das Anschlusselement wird über die Verbindung mittel Dämpfungselementen geschaffen. In Abbildung 28 ist die Basis-ÜK mit jener Variante ohne Dämpfungselemente gegenübergestellt.

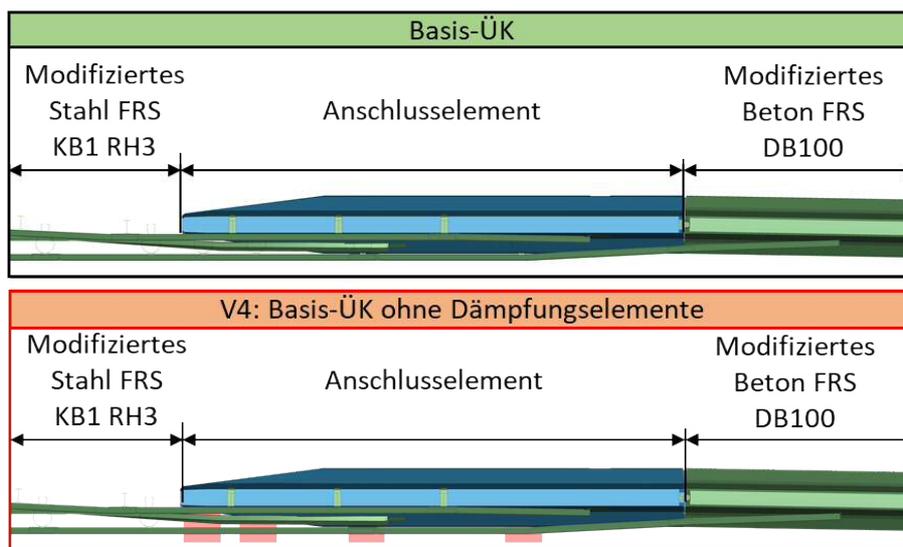


Abbildung 28: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung der Dämpfungselemente

### 2.6.5 V5: Kein Versatz der Fertigteile

Da nur über den Versatz der Fertigteile genügend Raum für die Installation der in Variante 4 beschriebenen Dämpfungselemente geschaffen werden konnte, liegt es nahe auch eine Variante mit fluchtenden Fertigteilen zu untersuchen. Abbildung 29 zeigt die Basis-ÜK und darunter die ÜK ohne Versatz der Fertigteile. Anstelle der Dämpfungselemente wurden einfache Stahlbügel verbaut um die Anbindung des Leitschienenbandes an das Anschlusselement realisieren zu können.

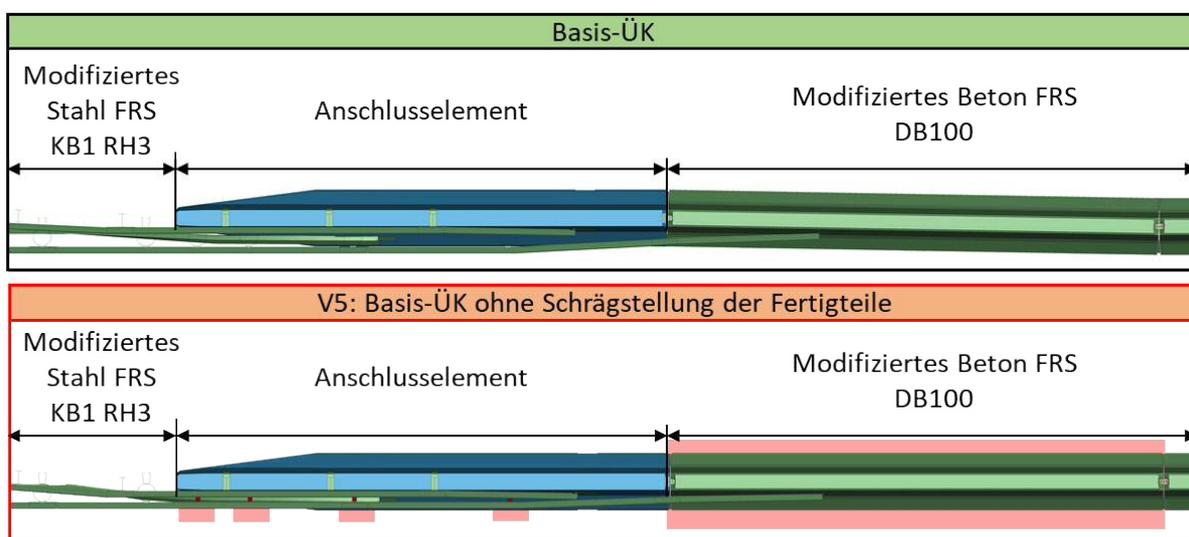


Abbildung 29: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung der Schrägstellung der Fertigteile

### 2.6.6 V6: Weniger Aufsatzsteher auf Anschlusselement

Für die Ankopplung des hinteren Leitschienenbandes an das Beton FRS sorgen drei Steher auf der Krone des Anschlusselementes. In einer Modifikation wurde die Steheranzahl auf zwei reduziert (Abbildung 30) und der daraus resultierend Effekt auf die Fahrzeugkinematik und Systemverhalten analysiert.

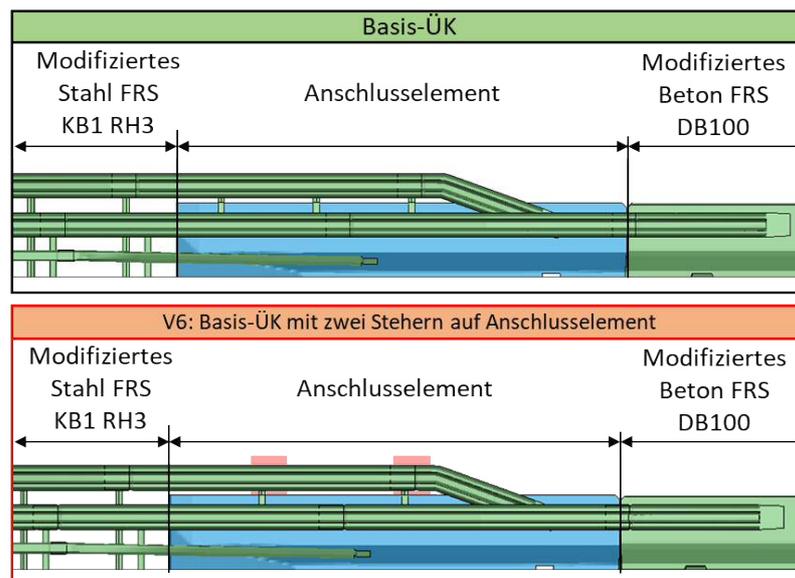


Abbildung 30: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung der Steher am Anschlusselement

### 2.6.7 V7: Kein Gleitprofil im Stahl FRS

Im Stahl FRS KB1 RH3 ist ein Gleitprofil an den Stehern des vorderen Leitschienenbandes angebracht, welches bei Verbindung mit dem Beton FRS im Anschlusselement verankert wird. Im Stahl FRS soll das Gleitprofil das Einhängen des Vorderrades bei den Stehern verhindern und wurde in der ÜK ebenfalls als Abgleithilfe vor dem Anschlusselement positioniert. Die Variante der ÜK ohne Gleitprofil ist in Abbildung 31 dargestellt.

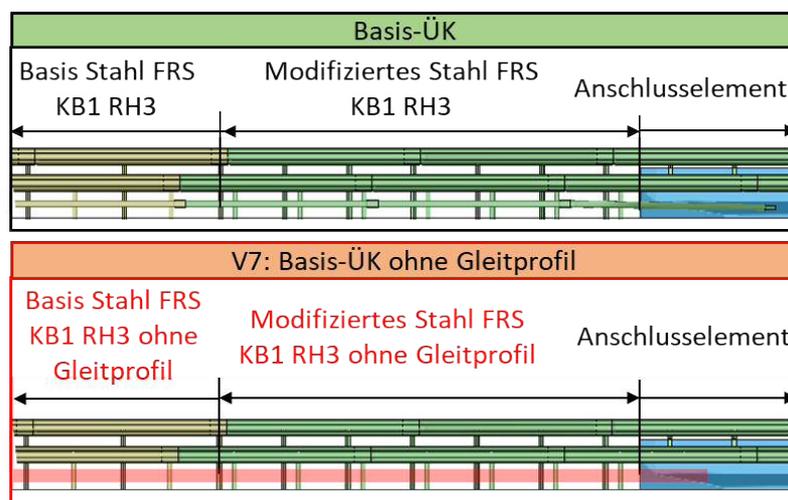


Abbildung 31: Modellanpassung für die Einflussuntersuchung des Gleitprofils

## 2.7 Simulationsbasierter Nachweis der Anwendbarkeit der Verbesserungsmaßnahmen auf weitere FRS

Durch die Vielzahl an FRS-Kombinationen im Bestand ist es nötig, am Ende des Projektes Handlungsempfehlungen bereit stellen zu können, welche bei allen im Bestand ausgeführten ÜK anwendbar sind. Da diese Handlungsempfehlungen jedoch anhand einer spezifischen FRS-paarung entwickelt und untersucht wurden, war es nötig die einzelnen Maßnahmen auf ihre produktunabhängige Einsetzbarkeit hin zu evaluieren. Dazu wurden die in der ÜK des Stahl FRS KB1 RH3 auf das Beton FRS DB100 6m angewendeten konstruktiven Maßnahmen auf unterschiedliche FRS-Kombinationen übertragen und die Rückhaltefunktion bewertet. Es wurde dabei entweder das Stahl FRS oder das Beton FRS durch ein anderes FRS, entsprechend Tabelle 2, ersetzt. Die sich daraus ergebenden FRS-Kombinationen sind in Abbildung 32 dargestellt. Die Basis-ÜK ist rot markiert.

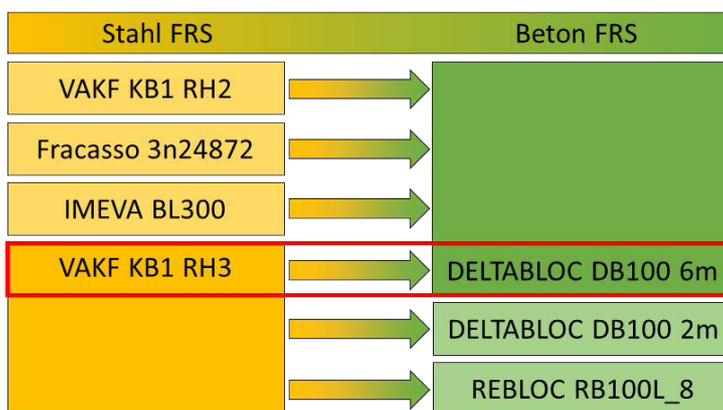


Abbildung 32: Systemkombinationen weiterer Übergangskonstruktionen

### 2.7.1 Modellierung der weiteren Übergangskonstruktionen

Die Modelle der ÜK wurden durch Anpassung des Modells der bestehenden Basis-ÜK erstellt. Dazu wurde das Modell des validierten Basis-FRS eingesetzt und mit denselben Verbindungen wie in der Basis-ÜK an die ÜK angeschlossen. Die Unterschiede der einzelnen FRS-Kombinationen gegenüber der Basis-ÜK werden jeweils in den nächsten Absätzen aufgezeigt.

#### H2 Übergang: Fracasso 3n24872 – DB100 6m

Das Stahl FRS KB1 RH3 von der Firma VAKF in der entwickelten Basis-ÜK wurde durch das Stahl FRS 3n24872 von der Firma Fracasso ersetzt. In Abbildung 33 ist die Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 6m und darunter die ÜK mit dem Stahl FRS von der Firma Fracasso 3n24872 dargestellt. Das FRS von der Firma Fracasso verfügt nur über ein Leitschienenband, weswegen die Aufsatzsteher des zweiten Leitschienenbandes auf dem Anschlusselement entfielen. In den ersten zwei Leitschienenfeldern (modifiziertes Stahl FRS) wurden die Steher, wie auch im FRS KB1 RH3, auf Drittelabstand verdichtet. Das Leitschienenband wurde, wie in der Basis-ÜK, über Bügel am Anschlusselement fixiert (Abbildung

34). Die Lage der Anschlüsse unterscheidet sich zu jenen aus der Basis-ÜK, da diese an das vorhandene Lochbild der Leitschienen des FRS von der Firma Fracasso angepasst wurden. Die Anschlussplatte des Leitschienenbandes befindet sich in selber Lage im zweiten Fertigteile, wie in der Basis-ÜK. Da es sich bei dem FRS von der Firma Fracasso um ein FRS für die Aufhaltstufe H2 handelt, wurde die ÜK für die Anprallkonfigurationen TB32 und TB51 simuliert und bewertet.

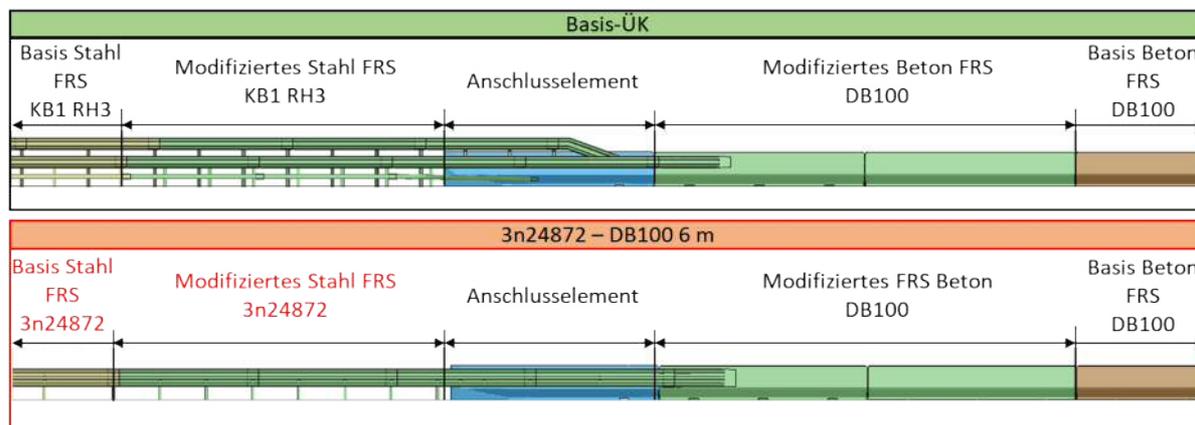


Abbildung 33: Vergleich der Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 6m mit der Variante 3n24872 – DB100 6m

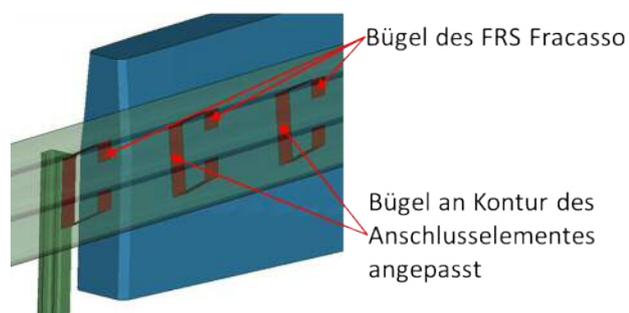


Abbildung 34: Anbindung des Leitschienenbandes am Anschlusselement in der Variante 3n24872 – DB100 6m

### H3 Übergang: IMEVA BL300 – DB100 6m

In dieser ÜK wurde das Stahl FRS KB1 RH3 von der Firma VAKF der entwickelten Basis-ÜK durch das FRS BL300 von der Firma IMEVA ersetzt. In Abbildung 35 ist die Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 6m und darunter die ÜK mit dem Stahl FRS BL300 von der Firma IMEVA dargestellt. In den ersten zwei Leitschienenfeldern (modifiziertes Stahl FRS) wurden die Steher des vorderen als auch des hinteren Leitschienenbandes, wie auch im FRS KB1 RH3, auf Drittelabstand verdichtet. Das hintere Leitschienenband wurde über drei Aufsatzsteher aus dem Basis-FRS von der Firma IMEVA mit dem Anschlusselement verbunden. Die Lage der Steher sowie der Winkel der Absenkung (vertikaler Verzug des hinteren Leitschienenbandes zum Anschlusselement) ist derselbe wie in der Basis-ÜK. Das vordere Leitschienenband wurde über Abstandshalter, wie sie auch im IMEVA Basis-FRS verbaut sind, am Anschlusselement fixiert (Abbildung 36). Die Lage der Anschlüsse unterscheidet sich zu jenen aus der

Basis-ÜK, da diese an das vorhandene Lochbild der Leitschienen des FRS von der Firma IMEVA angepasst wurden. Die Anschlussplatte des vorderen Leitschienenbandes befindet sich in selber Lage im zweiten Fertigteile, wie in der Basis-ÜK. Da es sich bei dem FRS BL300 um ein FRS für die Aufhaltstufe H3 handelt, wurde die ÜK für die Anprallkonfigurationen TB32 und TB61 simuliert und bewertet.

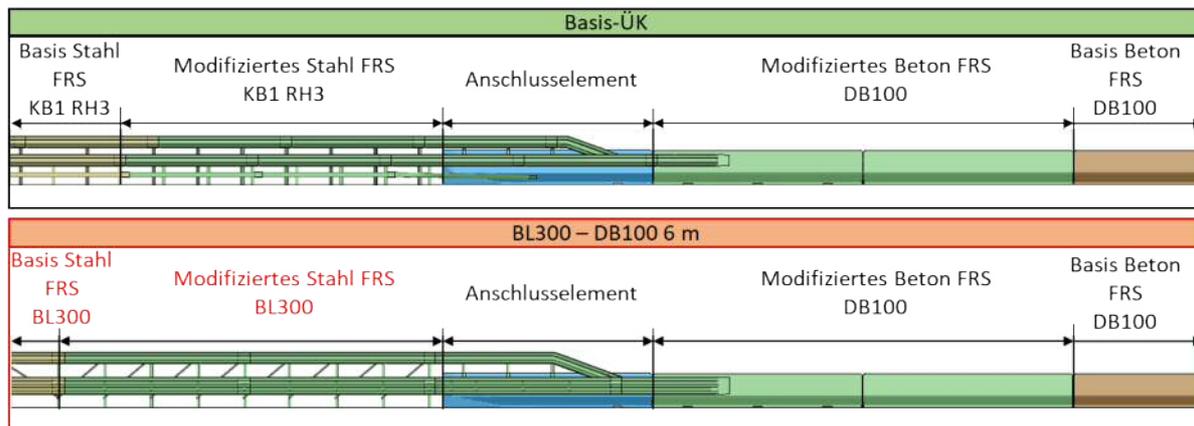


Abbildung 35: Vergleich der Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 mit der Variante BL300 – DB100 6 m

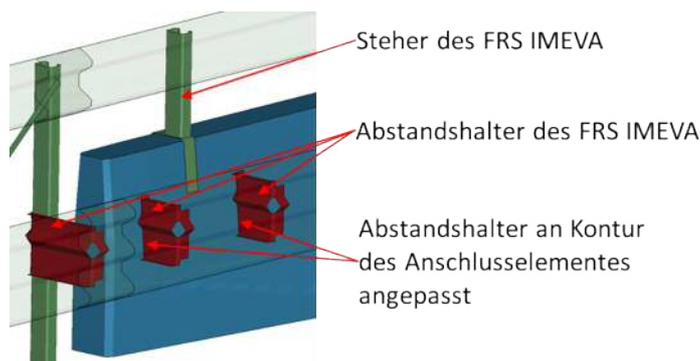


Abbildung 36: Anbindung des Leitschienenbandes am Anschlusselement in der Variante BL300 – DB100 6 m

## H2 Übergang: KB1 RH2 – DB100 6m

Für die Erstellung eines weiteren H2-Überganges wurde das Stahl FRS KB1 RH3 von der Firma VAKF durch das FRS KB1 RH2 ersetzt. In Abbildung 37 ist die Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 6m und darunter die ÜK mit dem FRS KB1 RH2 von der Firma VAKF dargestellt. Das Modell unterscheidet sich zu dem Modell der ÜK KB1 RH3 – DB100 6m lediglich darin, dass im Stahl FRS nur ein Leitschienenband verbaut ist. Da es sich bei dem FRS KB1 RH2 um ein FRS für die Aufhaltstufe H2 handelt, wurde die ÜK für die Anprallkonfigurationen TB32 und TB51 simuliert und bewertet.

## Methode

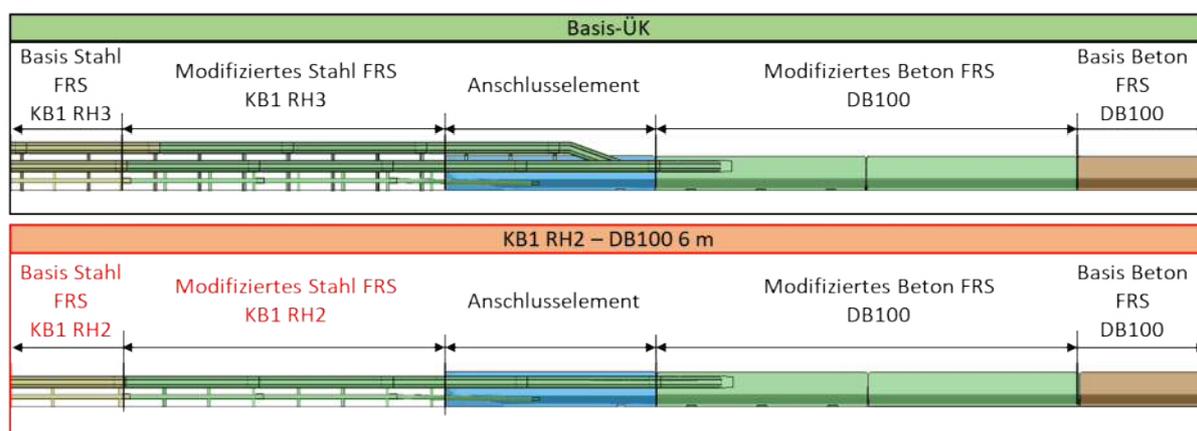


Abbildung 37: Vergleich der Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 mit der Variante KB1 RH2 – DB100 6 m

**H3 Übergang: KB1 RH3 – DB100 2m**

In dieser ÜK wurde das Beton FRS DB100 6m von der Firma DELTABLOC durch das FRS DB100 2m von der Firma DELTABLOC ersetzt. In Abbildung 38 ist die Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 6m und darunter die ÜK mit dem FRS DB100 2m dargestellt. Im modifizierten Bereich des Beton FRS wurde das dritte Fertigteile mit einem 2 m langen Fertigteile ausgetauscht. Die Schrägstellung der Fertigteile blieb wie in der Basis-ÜK bestehen, d.h. das zweite Fertigteile ist ebenso wie in der Basis-ÜK verdreht aufgestellt, um eine Flucht des dritten Fertigteiles mit der Systemvorderkante zu erreichen. Das Basis-FRS wurde durch das FRS DB100 2m ersetzt. Es gibt keine Veränderungen an der Konstruktion der Anbindungen zwischen Stahl FRS und Beton FRS in dieser Variante.

Da es sich bei dem FRS KB1 RH3 um ein FRS für die Aufhaltestufe H3 und beim FRS DB100 2m ebenfalls um eine Aufhaltestufe H3 handelt, wurde die ÜK für die Anprallkonfigurationen TB32 und TB61 simuliert und bewertet.

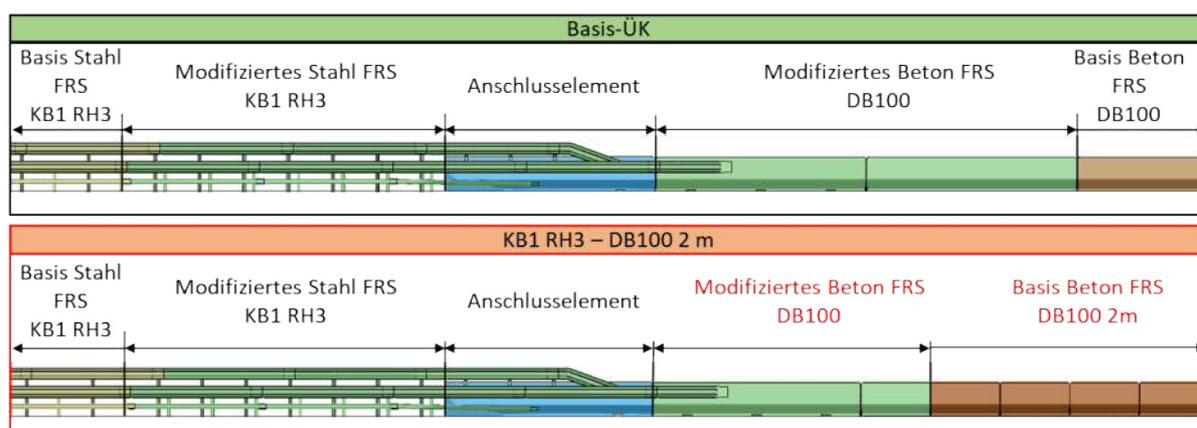


Abbildung 38: Vergleich der Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 mit der Variante KB1 RH3 – DB100 2 m

### H3: Übergang: KB1 RH3 – RB100L\_8

Um die Anwendbarkeit der Maßnahmen auch auf ein Beton FRS eines anderen Herstellers untersuchen zu können, wurde das FRS DB100 6m von der Firma DELTABLOC durch das FRS RB100L\_8 von der Firma REBLOC ersetzt. In Abbildung 39 ist die Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 6m und darunter die ÜK mit FRS RB100L\_8 dargestellt. Das Anschlusselement wurde durch ein Anschlusselement der Firma REBLOC ersetzt. Die Anbindung des Leitschienenbandes ist dieselbe wie in der Basis-ÜK, wobei lediglich kleine geometrische Anpassungen nötig waren, um das Leitschienenband an dem etwas schmaleren Fertigteilprofil anschließen zu können. Die Fertigteile im modifizierten Beton FRS sind ebenso wie im FRS von der Firma DELTABLOC 6 m lang und in derselben Aufstellung positioniert. Das weiterführende Basis-FRS von der Firma REBLOC besteht jedoch aus 8 m langen Fertigteilen.

Das Stahl FRS der ÜK hat die Aufhaltstufe H3 und beim Beton FRS RB100L\_8 handelt es sich ebenfalls um die Aufhaltstufe H3. Daher wurde die ÜK für die Anprallkonfigurationen TB32 und TB61 simuliert und bewertet.

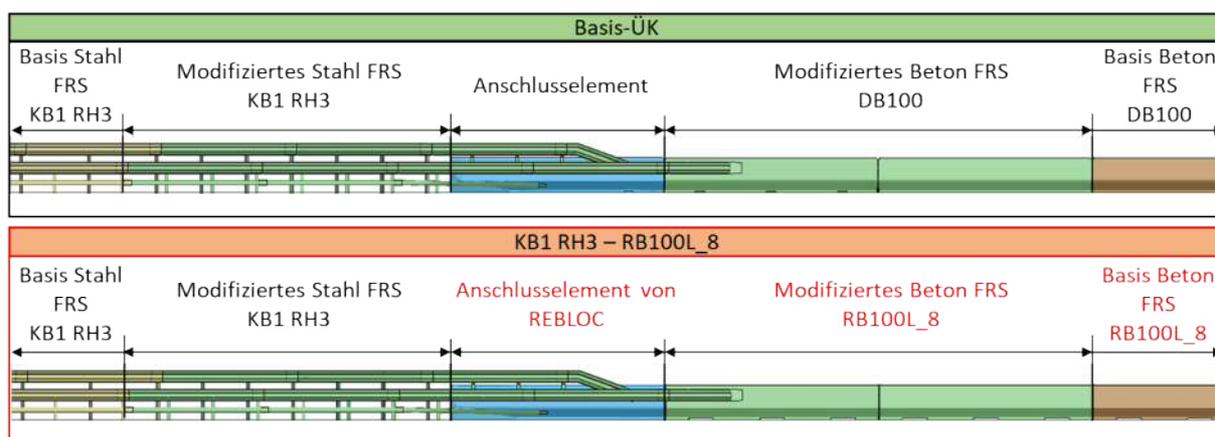


Abbildung 39: Vergleich der Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 mit der Variante KB1 RH3 – RB100L\_8

#### 2.7.2 Methode zur Bewertung der Übergangskonstruktionen

Die Bewertung der Übergangskonstruktionen erfolgte anhand eines relativen Vergleichs mit den jeweiligen Basis-FRS. Die Methode ist in Abbildung 40 am Beispiel der Basis-ÜK KB1 RH3 – DB100 6m grafisch dargestellt. Die Basis für den Vergleich bildeten die jeweiligen Validierungssimulationen jener Basis-FRS, welche im Gesamtmodell über die ÜK verbunden wurden (blauer Block). Aus den Simulationen der Stahl FRS wurden die auftretenden Zugkräfte in den Leitschienenbändern und in den Beton FRS die auftretenden Zugkräfte in den Kupplungen ausgewertet. Dieselben Werte wurden in der Simulation der ÜK ausgewertet (gelber Block). Nun wurden die Maximalwerte der auftretenden Zugkräfte in Leitschienenband und Kupplungen aus den jeweiligen Validierungssimulationen mit den Maximalwerten aus der ÜK-Simulation verglichen. Der relative Vergleich der Maximalwerte gibt Aufschluss, um wieviel mehr Zugkräfte das Leitschienenband und die Kupplungen in der ÜK übertragen können müssen. Über diese Methode konnte schlussendlich für jede FRS-kombination berechnet

werden, um wieviel höhere Zugkräfte, gegenüber dem Basis-FRS aufgenommen werden können müssen.

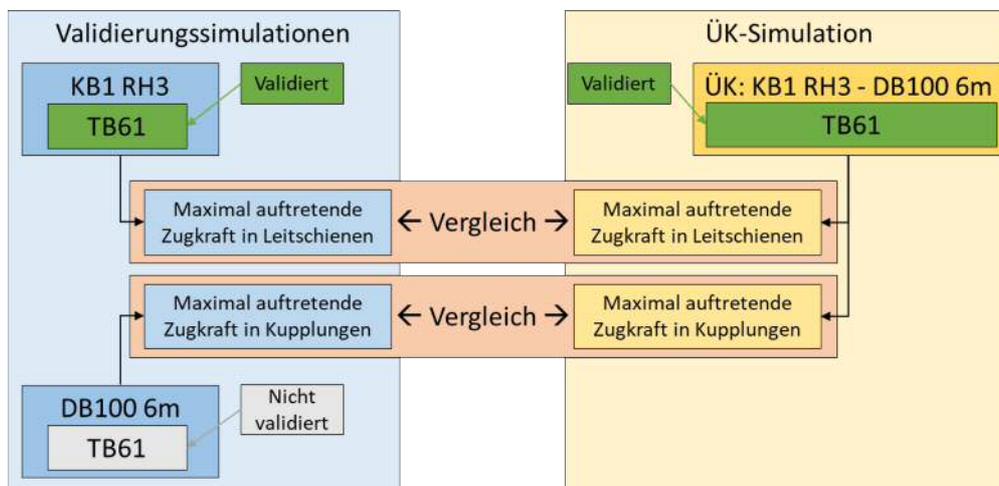


Abbildung 40: Vergleichsbasis für Bewertung der Übergangskonstruktionen am Beispiel der Basis-ÜK

Für die Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass nicht alle Modelle der Basis-FRS bzw. der ÜK validiert sind. In Abbildung 40 sind die validierten FRS mit grün eingefärbt und mit „validiert“ markiert. In diesem Beispiel ist das Basis-FRS KB1 RH3 als auch die ÜK auf die TB61 Konfiguration validiert. Beim FRS DB100 6m handelt es sich um ein H4b System, weswegen es auf die Anprallkonfiguration TB81 validiert wurde. Da die auftretenden Zugkräfte nur innerhalb derselben Anprallkonfiguration verglichen werden können, wurde die TB61 Simulation für das FRS DB100 6m ergänzt. Dabei wurde dasselbe Modell des FRS wie in der validierten TB81 Simulation verwendet, jedoch mit dem TB61 Lkw (anderes Fahrzeugmodell) angefahren. Das bedeutet, dass das Modell aus dem die auftretenden Zugkräfte in den Kupplungen für den Vergleich herangezogen werden, nicht validiert ist. Da aber das FRS an sich (über die TB81 Simulation) validiert wurde und die Kinematik anderer Fahrzeuge laut Expertenmeinung mit jenen aus Realtests vergleichbar sind, werden die Ergebnisse als plausibel angesehen.

In Abbildung 41 ist das eben beschriebene Validitätslevel für alle Basis-FRS und alle ÜK aufgezeichnet. Alle Stahl FRS als auch das Beton FRS von der Firma REBLOC wurde auf die jeweilige Anprallkonfiguration, wie sie auch für die ÜK simuliert wurde, validiert (grün hinterlegt). Das FRS DB100 6m wurde für die TB51 und TB61 Konfiguration ergänzt und ist daher nicht validiert (grau hinterlegt). Das Modell der ÜK KB1 RH3 – DB100 6m ist das einzige ÜK-Modell, welches im gegenständlichen Projekt auch getestet wurde und damit auch validiert werden konnte (Pfeil grün hinterlegt). Die weiteren ÜK-Modelle sind nicht validiert (Pfeil grau hinterlegt), wurden jedoch auf Basis der validierten ÜK hinsichtlich Modellierungsmethoden und Fahrzeugmodellen aufgesetzt und somit bestmöglich abgebildet.

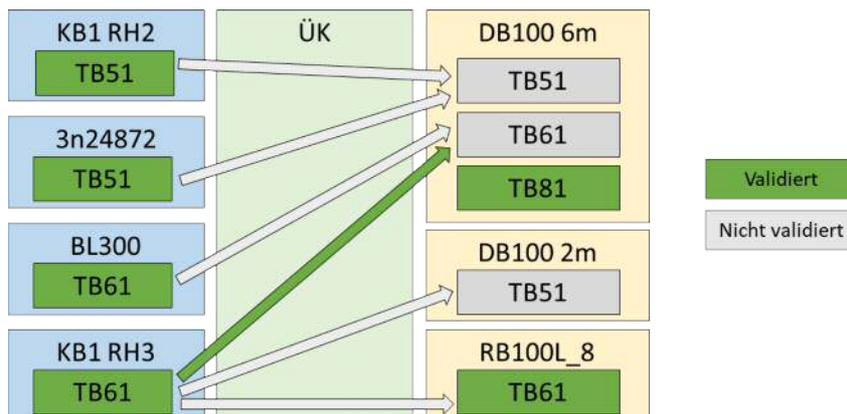


Abbildung 41: Übersicht über Validitätslevel der FE-Modelle der Basis-FRS und Übergangskombinationen

## 2.8 Berücksichtigung von Realsituationen

Die Einflüsse der in Kapitel 0 erarbeiteten realen Bedingungen vor Ort, wurden in der Simulation in vereinfachter Weise analysiert. Da die meisten baulichen Einschränkungen eine Begrenzung des zur Verfügung stehenden Wirkungsbereiches bewirken, wurde das Systemverhalten der ÜK bei Begrenzung des Wirkungsbereiches untersucht. Dazu wurde eine generische Wirkungsbereichseinschränkung (WBE) durch Modellierung eines Blockes mit Querschnitt 100 mm x 100 mm auf der anprall-abgewandten Seite des FRS implementiert. Der Block wurde mit einem starren Material versehen und im Raum fixiert. Es konnte daher keine Bewegung des Blockes stattfinden. Abbildung 42 zeigt die Lage der drei Blöcke für die Wirkungsbereichseinschränkungen WBE2, WBE3 und WBE4. Der Block WBE2 wurde im Abstand der maximal möglichen Systemverschiebung für den Wirkungsbereich W2 (=0,8 m) aufgestellt. Das selbe Schema gilt für die Blöcke WBE3 (→ W3 = 1,0 m) und WBE4 (→ W4 = 1,3 m). Die Abbildung des Wirkungsbereiches W5 mit 1,7 m entfiel, da beim Wirkungsbereich des Basis-FRS von 1,67 m kein Fertigteil den Block bei WBE5 berühren würde. Ebenso ist aufgrund der Systemabmessungen die Implementierung einer WBE1 nicht sinnvoll, da der eingeschränkte Wirkungsbereich innerhalb der Systembreite liegen würde.

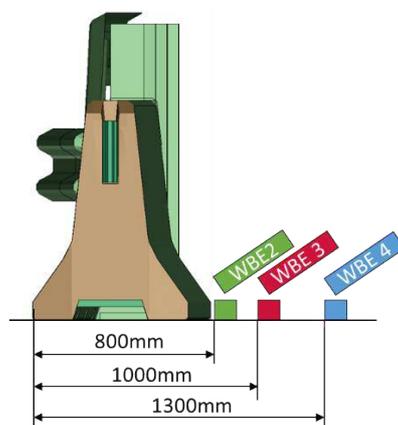


Abbildung 42: Modellierung der generischen Wirkungsbereichseinschränkung

---

## Methode

Die Einflussuntersuchung wurde für jede Wirkungsbereichseinschränkung (WBE2, WBE3 und WBE4) anhand der Anprallkonfiguration TB61 untersucht. Bewertet wurden die Einflüsse der Bewegungseinschränkung des FRS über die Fahrzeugkinematik und das Verhalten des FRS bei Kontakt zu den Blöcken, z.B. Kippen eines Fertigteil.

## 3 ERGEBNISSE

In einem iterativen Prozess wurde die finale Ausführung der Basis-ÜK erarbeitet und getestet. Die Ergebnisse der Modellüberarbeitung und Validierung sind im folgenden Kapitel beschrieben. Weiters werden auch die Ergebnisse aus der Einflussuntersuchung und die Anwendbarkeit der ÜK-Lösung auf weitere FRS behandelt. Am Schluss steht die Formulierung der Handlungsempfehlungen, welche auf Basis der Ergebnisse erarbeitet wurden.

### 3.1 Verhalten der Basis-Übergangskonstruktion bei Fahrzeuganprall

Mit dem Modell der Basis-ÜK wurden die drei definierten Anprallpunkte simuliert und der kritische identifiziert. Es wurden anschließend reale Versuche für die Anprallkonfigurationen TB32 und TB61 mit dem kritischen Anprallpunkt durchgeführt und in einem iterativen Prozess das Modell der Basis-ÜK auf die Testergebnisse validiert.

#### 3.1.1 Simulationstechnische Bewertung der Basis-Übergangskonstruktion

Das Modell der Basis-ÜK wurde an den drei definierten Anprallpunkten für die TB61 Anprallkonfiguration simuliert. Anhand der Ergebnisse wurde der kritische Anprallpunkt für den realen Test als auch für die weiteren Untersuchungen identifiziert. Die Definition des kritischsten Anprallpunktes wurde anhand der Ausprägung der Sackbildung (Abbildung 2) herangezogen. Diese kann bei einer Übergangskonstruktion vom verhältnismäßig weichen Stahl FRS auf das steifere Beton FRS zu unerwünschten Fahrzeugverhalten, wie Einhaken oder stirnseitiger Anprall des Fahrzeugs am Anschlusselement, oder auch zu ungünstigen Belastungen des Leitschienenbandes, wie Abscheren an der Stirnseite des Anschlusselementes, führen. Im Anprallpunkt 1 wurde hauptsächlich das Stahl FRS deformiert und der Lkw wurde vor dem Anschlusselement umgelenkt. Anprallpunkt 2 zeigte eine klare Sackbildung des Stahl FRS unmittelbar vor dem Anschlusselement. Beim Anprallpunkt 3 wurde der Lkw bereits vom Anschlusselement umgelenkt und es führt somit zu keiner Sackbildung.

Beim Vergleich der Wirkungsbereiche zeigte die ÜK bei dem Fahrzeuganprall an die Anprallpunkte 2 und 3 die größten Systemauslenkungen (Abbildung 43). Da die Fahrzeugkinematik und die Sachbildung ausschlaggebend für die Wahl des kritischen Anprallpunktes sind, wurde der Anprallpunkt 2 als der kritischste identifiziert und für die weiteren Untersuchungen herangezogen.

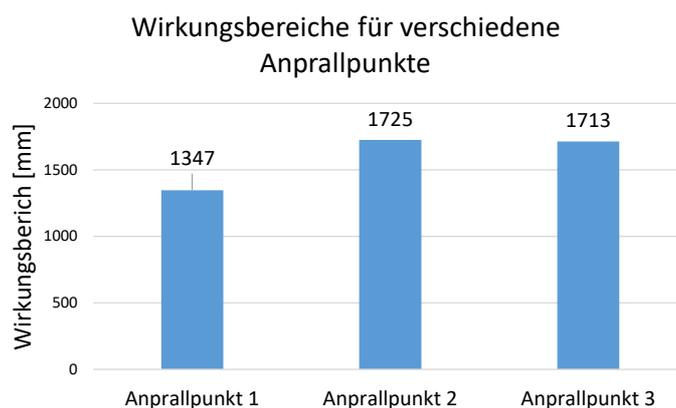


Abbildung 43: Wirkungsbereiche der TB61 Simulationen an die Basis-ÜK für verschiedene Anprallpunkte

### 3.1.2 Überarbeitung des Modells der Basis-Übergangskonstruktion anhand der Testergebnisse

Nach der simulationsbasierten Evaluierung der Basis-ÜK und der Identifikation des kritischen Anprallpunktes wurden reale Tests für die Anprallkonfigurationen TB32 und TB61 an die Basis-ÜK durchgeführt. Anhand der Tests sollte zum einen die Funktionalität der ÜK überprüft und zum anderen Daten für die Validierung des Modells der Basis-ÜK generiert werden.

Die Tests für die Anprallkonfigurationen TB32 und TB61 zeigten, wie aus der Simulation zu erwarten, eine kontinuierliche Umlenkung der Fahrzeuge. Abweichungen der Ergebnisse zwischen Test und Simulation wurden bei der Fahrzeugkinematik oder auch der Systemauslenkung beobachtet. Diese konnten in einem iterativen Validierungsprozess mit Modellanpassungen ausgeglichen werden. Das adaptierte Modell wurde anhand der Bewertungskriterien, wie sie auch für die Validierung der Basis-Systeme angewendet wurden, ausgewertet und validiert.

Folgend sind die Ergebnisse aus den Tests, als auch der Vergleich zu den Simulationsergebnissen mit dem validierten Modell für beide Anprallkonfigurationen angeführt.

#### Anprallkonfiguration TB32

Die Fahrzeugkinematik aus dem Test ist jener aus der Simulation in Schritten von 100 ms gegenübergestellt. In Abbildung 44 ist die Frontalansicht und in Abbildung 45 ist die Draufsicht dargestellt. Es waren einige Anpassungen am Simulationsmodell des Fahrzeuges notwendig, um das Fahrzeugverhalten aus dem Test abbilden zu können. Da das Modell Unterschiede in der Geometrie und den Abmessungen der Motorhaube gegenüber dem Testfahrzeug hat, musste das Modell im Bereich der Stoßstange angepasst werden. Ebenso wurde die Auslenkung des FRS über die Anpassung des Bodenmaterials, in welchem die Steher gerammt sind, an jene aus dem Test angeglichen.

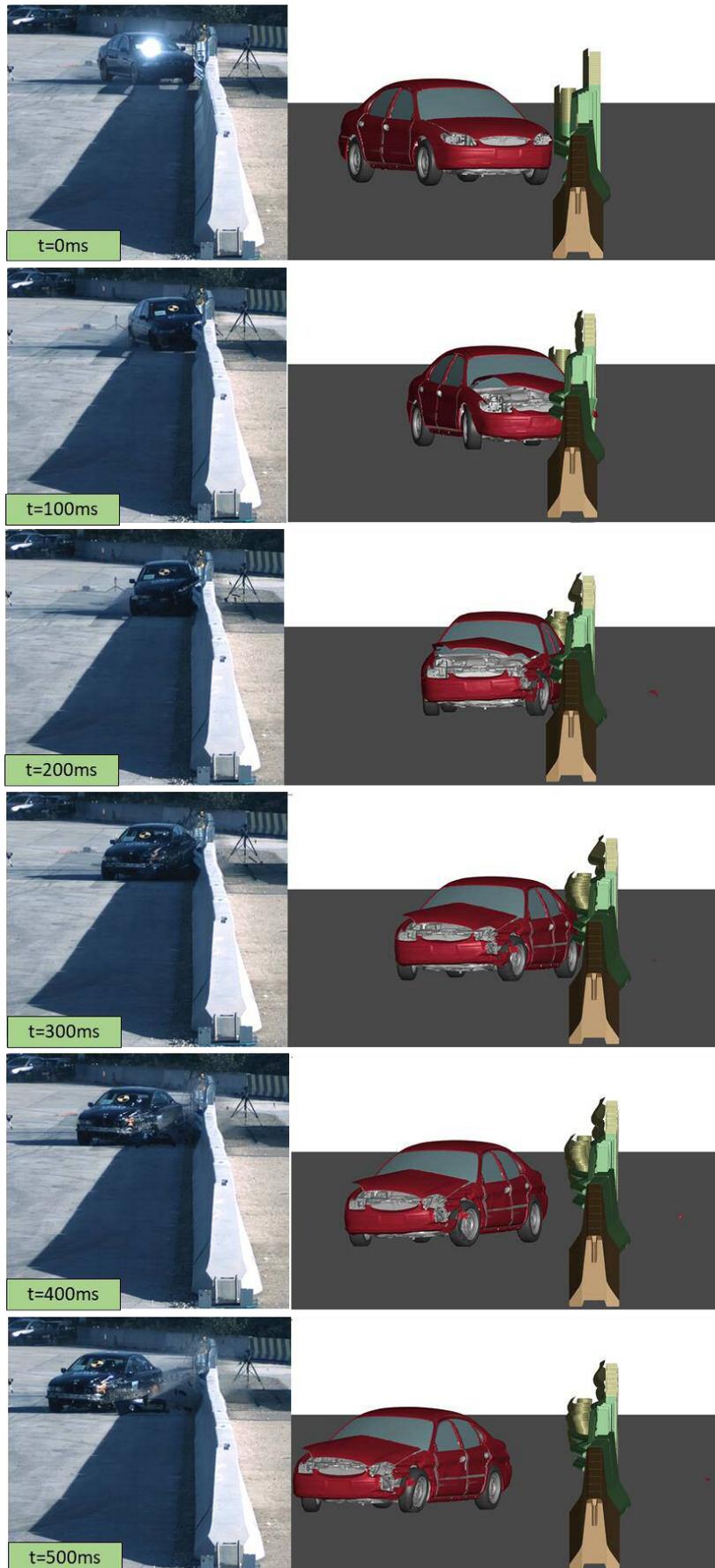


Abbildung 44: Vergleich der Kinematik zwischen Simulation und Test beim TB32 Anprall – frontale Ansicht

## Ergebnisse

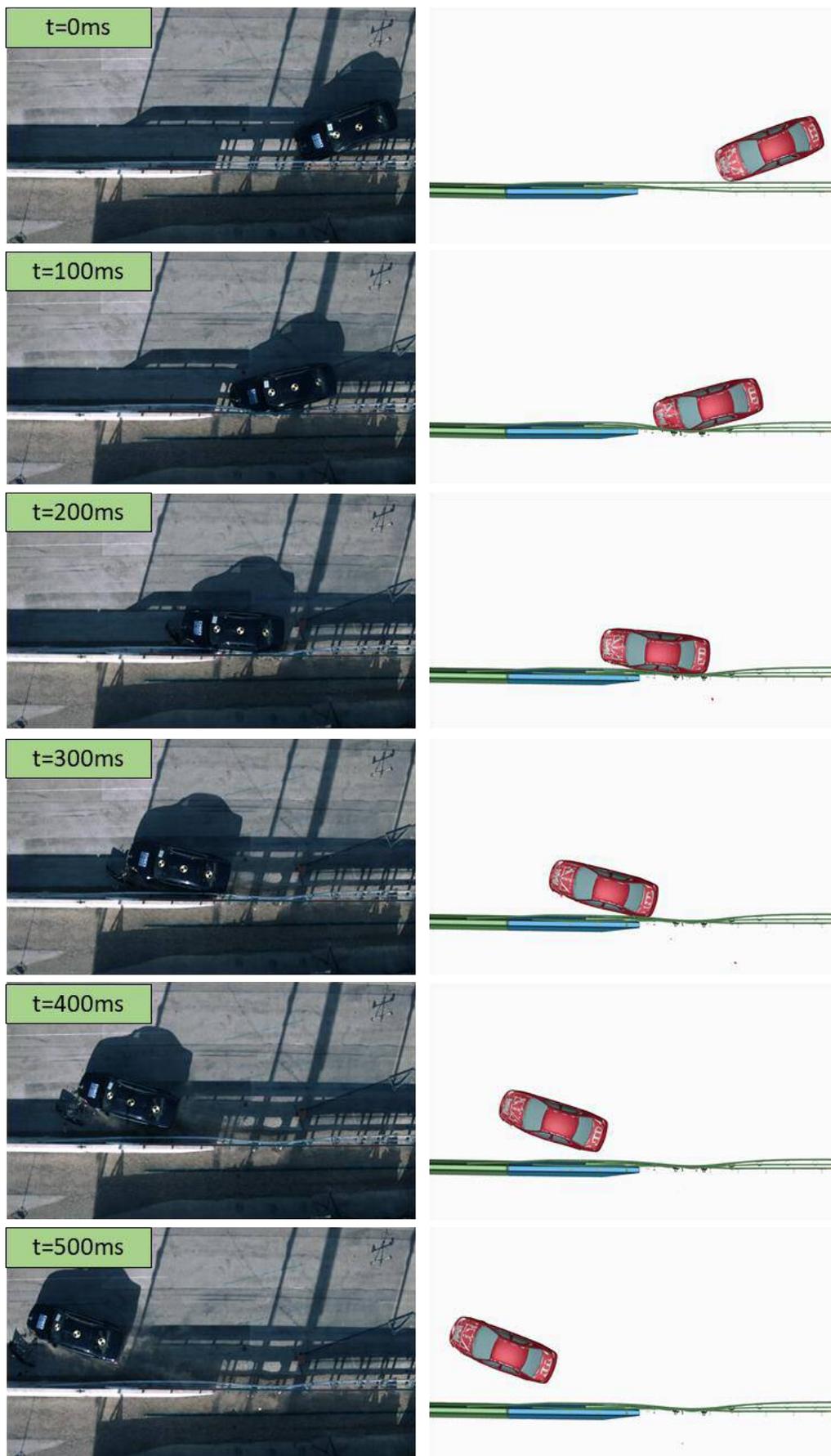


Abbildung 45: Vergleich der Kinematik zwischen Simulation und Test beim TB32 Anprall – Draufsicht

Die Deformation des FRS im Test (links) und in der Simulation (rechts) ist in Abbildung 46 dargestellt. Das vordere Leitschienenband, die Steher und das Gleitprofil zeigen die selbe Deformationen sowohl in Simulation als auch im Test. Das hintere Leitschienenband wurde weder im Test noch in der Simulation deformiert.



Abbildung 46: Vergleich der Systemdeformation beim TB32 Anprall an die Basis-ÜK

Die Trajektorien der Räder aus der Simulation sind in Abbildung 47 in der Draufsicht dargestellt. Zusätzlich ist die Systemvorderkante und der Wirkungsbereich eingezeichnet. Die Trajektorien zeigen eine kontinuierliche Umlenkung des Fahrzeuges. Lediglich eine geringe Unstetigkeit ist im Verlauf des linken Vorderrades zu erkennen. Diese ist auf den Kontakt des Vorderrades zum Steher des Stahl FRS zurückzuführen.

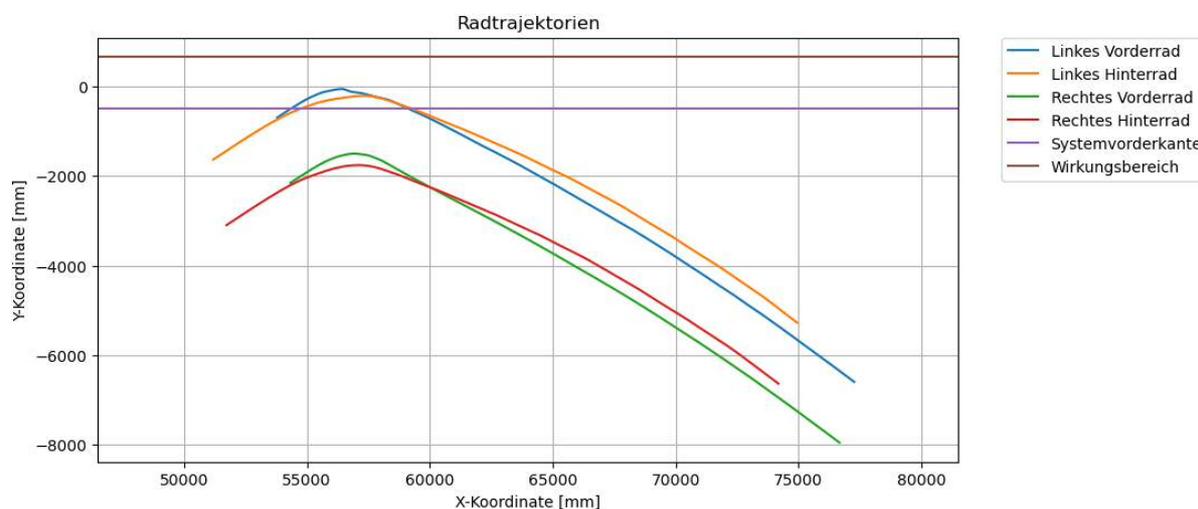


Abbildung 47: Radtrajektorien und Systemparameter beim TB32 Anprall an die Basis-ÜK

In Tabelle 12 sind die Werte für die Auslenkungen des FRS ( $D_m$  und  $W_m$ ) und für die Insassenbelastung (ASI, THIV und  $T_{of}$ ) aus dem Test mit jenen aus der Simulation verglichen. Zudem wurde überprüft, ob die Werte aus der Simulation innerhalb der Toleranzen laut EN 16303 [6] liegen. Alle Werte liegen innerhalb der jeweiligen Grenzen und somit kann die Simulation als valide angesehen werden.

Tabelle 12: Vergleich der Bewertungskriterien für die Anprallkonfiguration TB32 an die Basis-ÜK

Kriterium	Test	Simulation	Toleranzen laut EN 16303	Toleranzbereich	Status
Dm [m]	0,37	0,379		$0,233 < x < 0,507$	erfüllt
Wm [m]	0,83	0,87		$0,693 < x < 0,967$	erfüllt
ASI	1,3	1,4	$\pm 0,1$	$1,2 < x < 1,4$	erfüllt
THIV [km/h]	30,9	30,8	$\pm 0,3$	$30,6 < x < 31,2$	erfüllt
ToF [s]	0,112	0,143	$\pm 0,05$	$0,062 < x < 0,162$	erfüllt

### Anprallkonfiguration TB61

Die Fahrzeugkinematik aus dem Test ist jener aus der Simulation in Schritten von 100 ms gegenübergestellt. In Abbildung 48 ist die Frontalansicht und in Abbildung 49 ist die Draufsicht dargestellt. Wie auch bei der TB32 Simulation waren Anpassungen am Fahrzeugmodell notwendig. Die Steifigkeit der Front wurde angepasst, um die Fahrzeug- FRS Interaktion aus dem Test genau abbilden zu können. Zudem wurde, gleich wie in der TB32 Simulation, die Auslenkung des FRS über die Anpassung des Bodenmaterials, in welchem die Steher gerammt sind, an jene aus dem Test angeglichen.

Durch die vorgenommenen Anpassungen im Fahrzeugmodell blieben die Ergebnisse aus der Fahrzeugvalidierung (Kapitel 2.4.1) unverändert. Da in diesen Simulationssetups das Verhalten der Radaufhängung, wie Ein- und Ausfedervorgänge oder das Lenkverhalten plausibilisiert werden, sind diese Ergebnisse von Steifigkeits- oder Geometrieänderungen an der äußeren Karosserie, wie z.B. an der Stoßstange, unbeeinflusst.

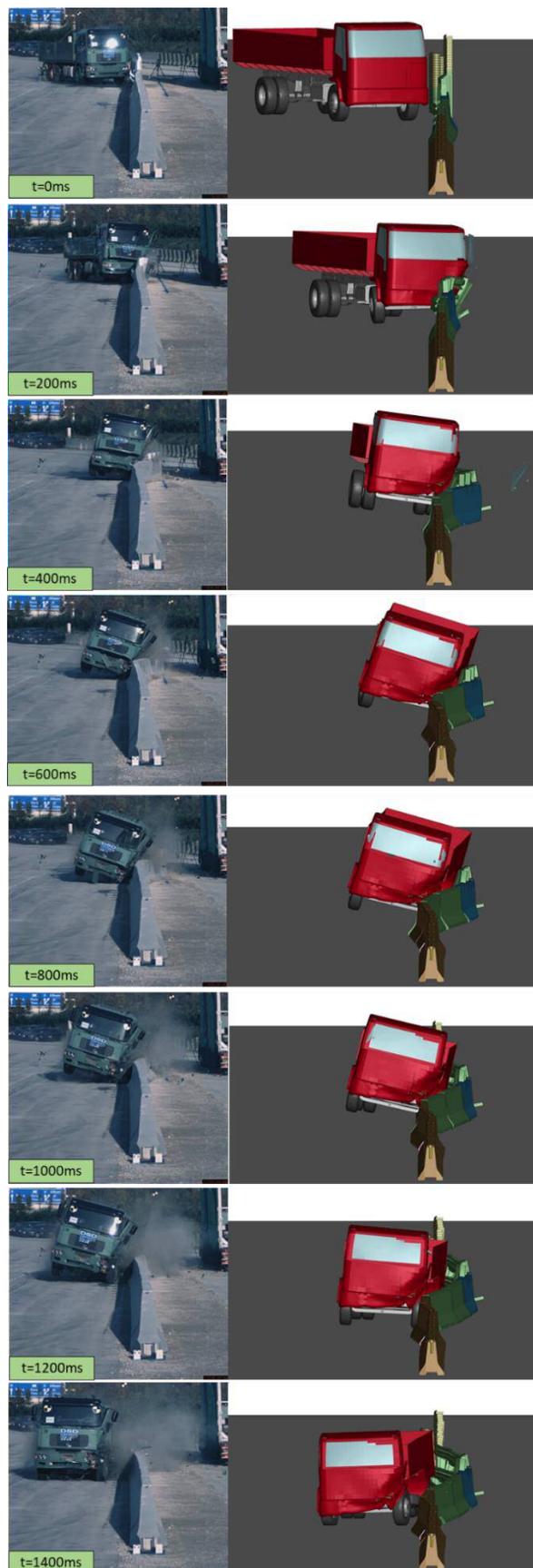


Abbildung 48: Vergleich der Kinematik zwischen Simulation und Test beim TB61 Anprall – frontale Ansicht

## Ergebnisse

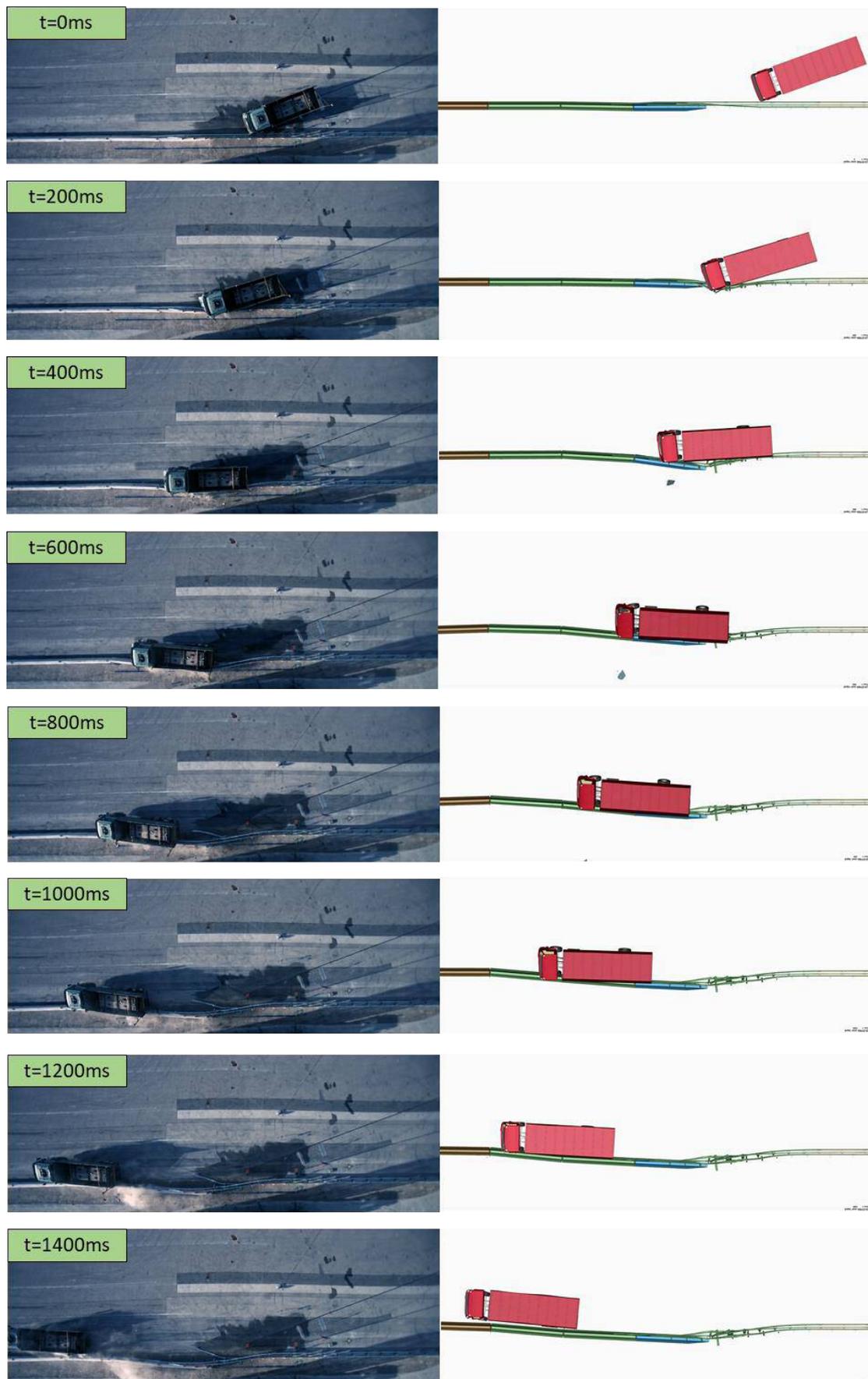


Abbildung 49: Vergleich der Kinematik zwischen Simulation und Test beim TB61 Anprall – Draufsicht

Die Deformation des FRS im Test (links) und in der Simulation (rechts) ist in Abbildung 50 von der anprallzugewandten Seite und in Abbildung 51 von der anprallabgewandten Seite dargestellt. Das Leitschienenband und die Steher zeigen dieselbe Deformation in Simulation und Test. Die Verankerung des Gleitprofils im Anschlusselement wurde im Test ausgerissen. Dieses Verhalten konnte in der Simulation nicht reproduziert werden, da die Schraubenverbindungen im Modell durch die gewählte Modellierungsmethode nicht versagen können. Da das Gleitprofil nur ein sehr geringes Energieaufnahmepotential hat und zudem die Fahrzeugkinematik mit dem aus dem Test gut übereinstimmte, wurde diese Abweichung als vernachlässigbar eingestuft.



Abbildung 50: Vergleich der Systemdeformation beim TB61 Anprall – anprallzugewandte Seite



Abbildung 51: Vergleich der Systemdeformation beim TB61 Anprall – anprallabgewandte Seite

Im Diagramm der Radtrajektorien (Abbildung 52) ist die harmonische Umlenkung des Lkw zu erkennen. Zusätzlich ist die Systemvorderkante und der Wirkungsbereich eingezeichnet.

## Ergebnisse

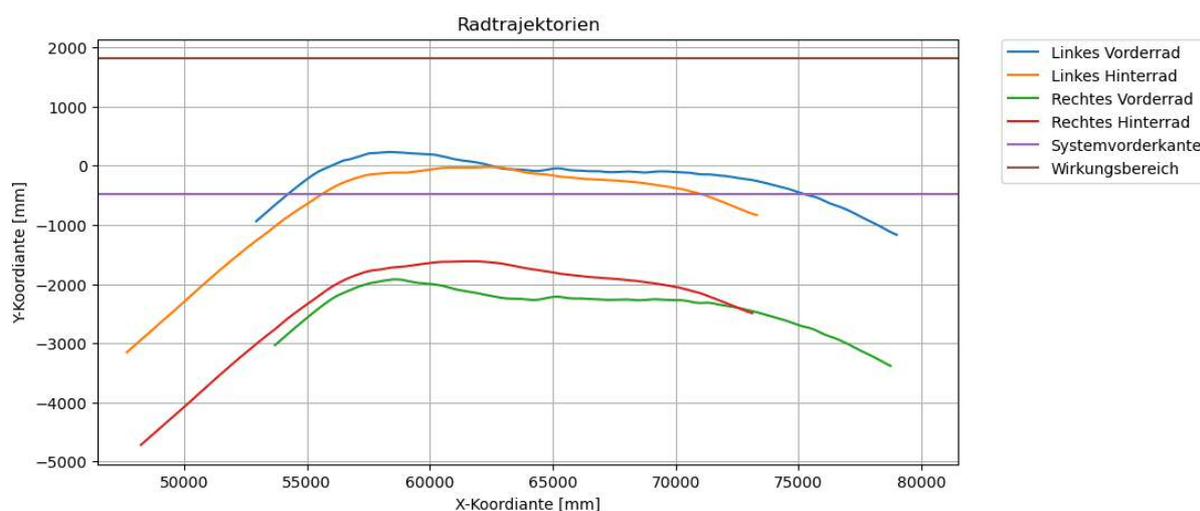


Abbildung 52: Radtrajektorien und Systemparameter beim TB61 Anprall an die Basis-ÜK

In Tabelle 13 sind die Werte für die Auslenkungen des FRS ( $D_m$  und  $W_m$ ) und für die Fahrzeugeindringung ( $V_{Im}$ ) aus dem Test mit jenen aus der Simulation verglichen. Zudem wurde kontrolliert ob die Werte aus der Simulation innerhalb der Toleranzen laut EN 16303 [6] liegen. Alle Werte liegen innerhalb der jeweiligen Limits und somit wird die Simulation als valide angesehen.

Tabelle 13: Vergleich der Bewertungskriterien für die Anprallkonfiguration TB61 an die Basis-ÜK

Kriterium	Test	Simulation	Toleranzen laut EN16303	Toleranzbereich	Status
$D_m$ [m]	1,18	0,995		$0,962 < x < 1,398$	erfüllt
$W_m$ [m]	1,95	1,843		$1,732 < x < 2,168$	erfüllt
$V_{Im}$ [m]	2,42	2,052		$2,002 < x < 2,838$	erfüllt

### 3.1.3 Zusammenfassung der versuchstechnischen Bewertung der Basis-ÜK

Der Vergleich der Fahrzeugkinematik und Systemauslenkung aus den Versuchen und der Simulation in den Anprallkonfigurationen TB32 und TB61 zeigte eine sehr gute Übereinstimmung. Ebenfalls sind die Bewertungskriterien ASI, THIV, ToF,  $D_m$ ,  $W_m$  und  $V_{Im}$  innerhalb der Toleranzen gemäß EN 16303. Die Simulationsmodelle sind somit valide und konnten für die weiteren Untersuchungen der Basis-ÜK herangezogen werden. Die einzelnen Varianten für die Einflussuntersuchung als auch die Abwandlungen für die Simulation weiterer FRS-kombinationen wurden ausgehend von diesem Modell aufgesetzt bzw. umgebaut.

### 3.2 Einflussuntersuchung der einzelnen Verbesserungsmaßnahmen

Durch Modifikation des Modells der Basis-ÜK wurden verschiedene Varianten erstellt, um den Einfluss der in Kapitel 2.6 beschriebenen Maßnahmen identifizieren zu können. Durch die Simulation der TB32 als auch der TB61 Anprallkonfiguration für die verschiedenen Varianten, konnte gezielt der Einfluss einer Maßnahme isoliert betrachtet werden. Der Vergleich der Systemparameter zwischen Basis-ÜK und modifizierter Variante ließ die Berechnung der relativen Abweichungen von ASI für die TB32 Simulation als auch des Wirkungsbereiches sowie der Zugkräfte im Leitschienenband und in den Kupplungen für die TB61 Simulation zu.

#### 3.2.1 V1: Keine Stehverdichtung im Stahlsystem

Im Modell der Basis-ÜK wurde die Stehverdichtung in den ersten zwei Feldern des FRS Stahl auf den ursprünglichen Steherabstand des Basis-FRS abgeändert. In Abbildung 53 ist der relative Vergleich der Systemparameter ASI, Wirkungsbereich und der Zugkräfte im Leitschienenband und in den Kupplungen gegenüber der Basis-ÜK veranschaulicht. Bei Erhöhung des Steherabstandes wurde das FRS Stahl weicher und der ASI verringert sich bei der TB32 Simulation um 32,6 %.

In der TB61 Simulation ist eine Zunahme des Wirkungsbereiches um 13,0 % festzustellen. Durch die stärkere Auslenkung des FRS erhöhten sich dadurch allerdings auch die auftretenden Zugkräfte im vorderen Leitschienenband (+21,2 %). Jedoch ist kaum einer Veränderung in den Zugkräften des hinteren Leitschienenbandes zu erkennen (+0,3 %). Die höhere Auslenkung des FRS führte zu einer Erhöhung der Zugkräfte in der Kupplung um 9,6 %.

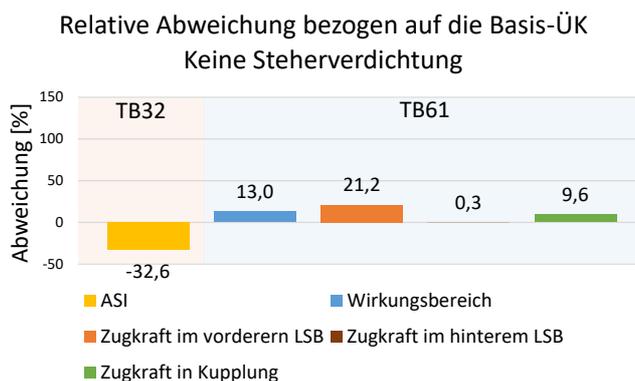


Abbildung 53: Relative Veränderung der Systemparameter bei Erhöhung des Steherabstandes im Stahlsystem

In der Draufsicht auf die ÜK bei Fahrzeuganprall in der TB32 Konfiguration in Abbildung 54 ist ein geringer Unterschied in der Deformation der Fahrzeugfront zu erkennen.

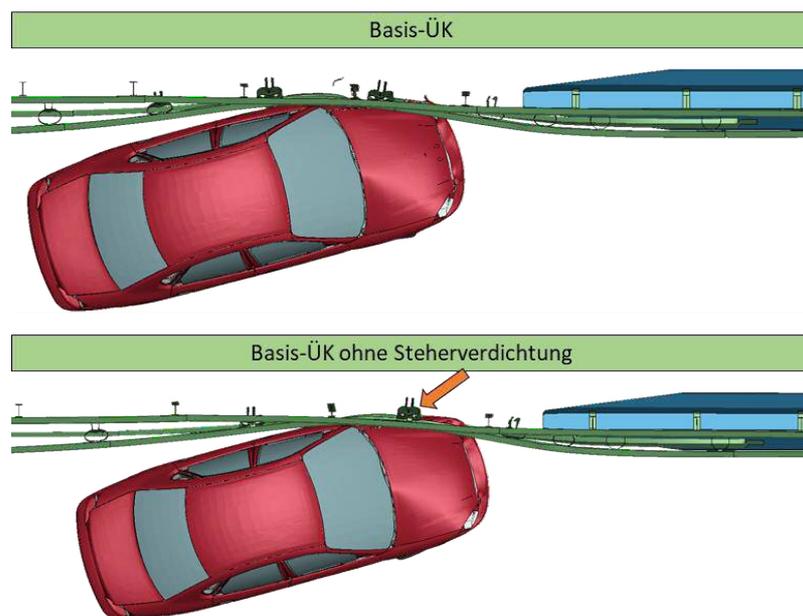


Abbildung 54: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Erhöhung des Steherabstandes – TB32

Durch den höheren Steherabstand wurde der ASI positiv beeinflusst, wirkte sich hingegen bei der TB61 Anprallkonfiguration negativ auf das Gesamtsystemverhalten aus. Abbildung 55 zeigt die Interaktion des Lkw mit dem FRS zum Zeitpunkt der maximalen Systemauslenkung für die Basis-ÜK (links) und die Basis-ÜK ohne Stehverdichtung (rechts). Im FRS Stahl ohne Stehverdichtung verschob der Lkw das FRS weiter (Erhöhung des Wirkungsbereiches in rot markiert) und führte somit zu höheren Zugkräften im Leitschienenband und den Kupplungen.

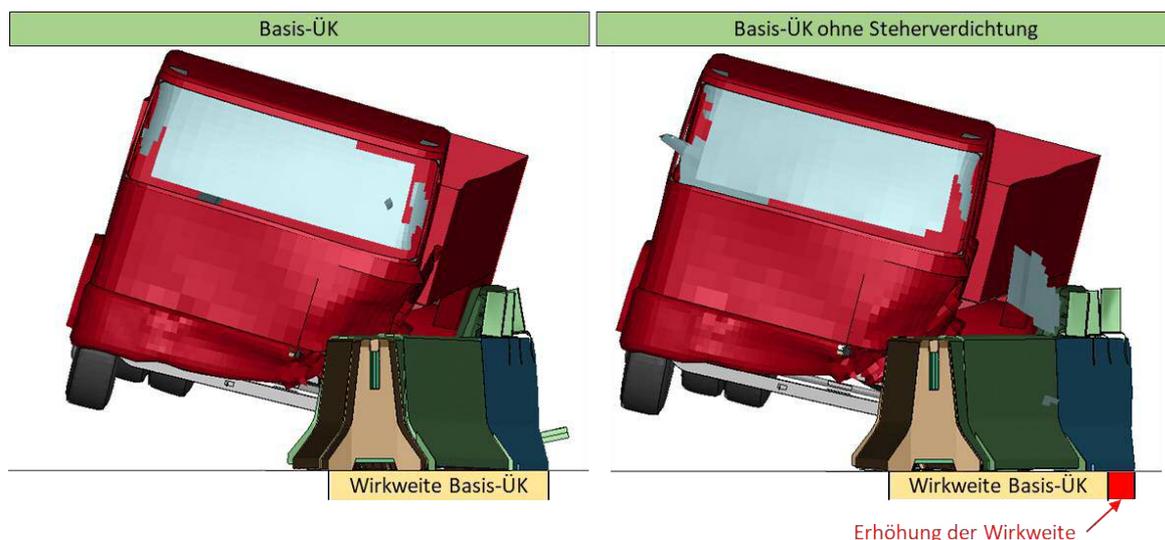


Abbildung 55: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Erhöhung des Steherabstandes – TB61

### 3.2.2 V2: Größerer Abstand des letzten Stehers zum Anschlusselement

Der letzte Steher wurde im Modell der Basis-ÜK entfernt, um somit den Abstand zwischen Steher und Anschlusselement, zu erhöhen. Bei Verzicht auf den letzten Steher erhöht sich der ASI bei der TB32 Simulation um 5,9 % (Abbildung 56). Um diesen Effekt in der TB32 Simulation aufzeigen zu können, musste allerdings der Anprallpunkt des Pkw um 2,5 m in Richtung Beton FRS verschoben werden, da bei dem originalen Anprallpunkt keine Interaktion des Fahrzeuges mit dem letzten Steher stattfand. Die Anpassung des Anprallpunktes wurde im Modell der Basis-ÜK als auch in der Variante ohne den letzten Steher vor dem Anschlusselement vorgenommen, um die beiden Simulationen vergleichen zu können.

Für die TB61 Simulation wurde der Anprallpunkt unverändert belassen. Beim Anprall des Lkw erhöhte sich der Wirkungsbereich des Systems um 5,9 %. Die Zugkräfte im vorderen Leitschienenband blieben mit +1,2 % annähernd gleich, verringerten sich aber im hinteren Leitschienenband um 6,2 %. Durch die erhöhte Auslenkung des FRS erhöhten sich auch die Kupplungskräfte um 5,2 %.

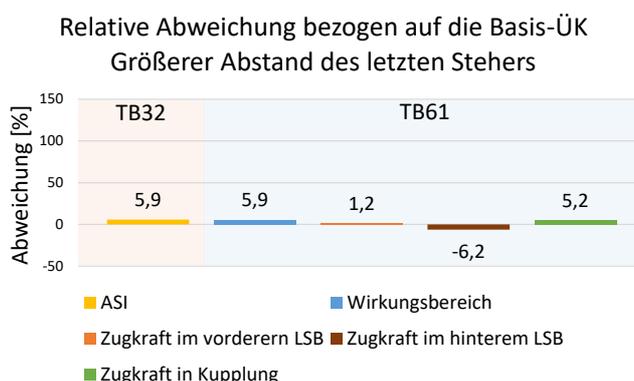


Abbildung 56: Relative Veränderung der Systemparameter bei Erhöhung des Abstand des Stehers zum AE

Bei der Betrachtung der Deformation des FRS konnten keine Unterschiede durch die geringe Erhöhung des ASI bei der TB32 Simulation festgestellt werden. Abbildung 57 zeigt den Anprall an die Basis-ÜK links und rechts den Anprall an die Basis-ÜK ohne den letzten Steher vor dem Anschlusselement. Das vordere Leitschienenband und das Gleitprofil verformten sich durch den fehlenden Widerstand des Stehers etwas mehr und führte somit zu einer etwas stärkeren Umlenkung des Pkw.

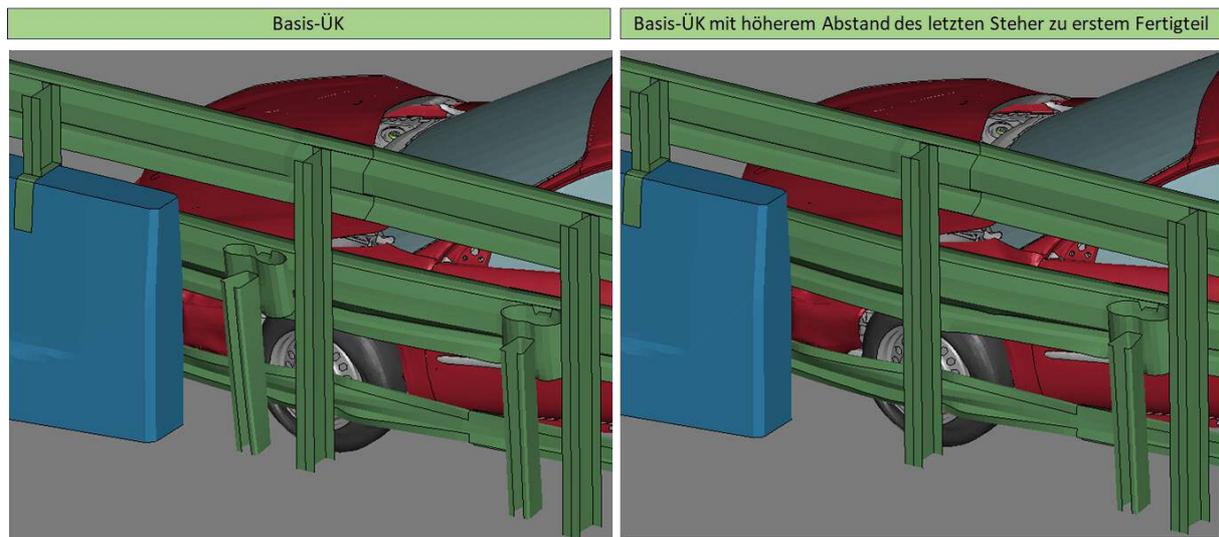


Abbildung 57: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Erhöhung des Abstand des letzten Stehers – TB32

Auch bei der TB61 Simulation ist die etwas erhöhte Auslenkung des FRS bei Fehlen des Stehers optisch kaum zu erkennen (Abbildung 58). Lediglich der Kontakt des Vorderrades zum Steher (rechts) lässt einen Unterschied in der Kinematik vermuten, welcher zu den geringen Änderungen in den auftretenden Zugkräften führt.

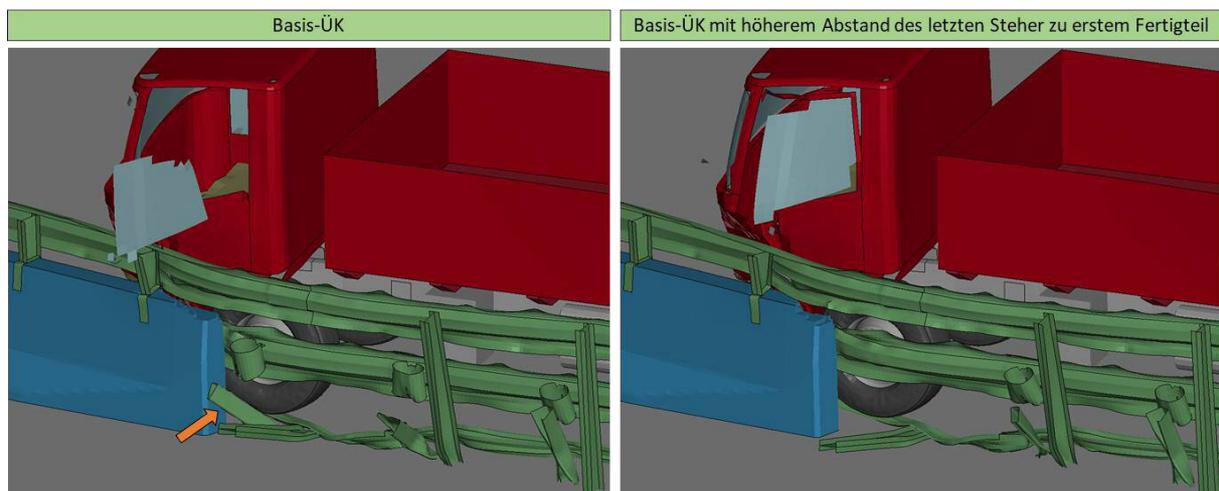


Abbildung 58: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Erhöhung des Abstand des letzten Stehers – TB61

### 3.2.3 V3: Keine Abschrägung des Anchlusselementes

Wurde das Anchlusselement an der Stirnseite nicht abgeschrägt, erhöhte sich der ASI beim Anprall des Pkw um 13 % (Abbildung 59). Da auch hier das Fahrzeug bei originalem Anprallpunkt nicht in Interaktion mit dem Anchlusselement kam, musste analog zur Variante V2 der Anprallpunkt des Pkw verschoben werden. Im Modell der Basis-ÜK als auch in der Variante ohne Abschrägung des Anchlusselementes wurde der Anprallpunkt daher um 2 m in Richtung Beton FRS verlagert.

In der TB61 Simulation (mit ursprünglichem Anprallpunkt) ist eine Erhöhung des Wirkungsbereiches um 12,5 % festzustellen. Die Zugkräfte erhöhen sich im vorderen Leitschienenband um 4,1 % und um 4,3 % in den Kupplungen.

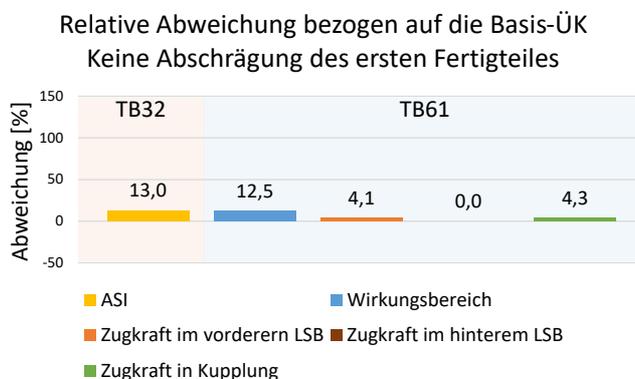


Abbildung 59: Relative Veränderung der Systemparameter bei Begradigung des Anschlusselementes

In Abbildung 60 ist der Unterschied beim Anprall des Pkw veranschaulicht. Beim Anprall an die Basis-ÜK (links) gleitet das linke Vorderrad am Anschlusselement ab. Bei der Simulation an die Basis-ÜK ohne die Abschrägung des Anschlusselements traf das Rad direkt auf die Kante zur Stirnseite des Standard-Fertigteils (rechts), was zu einer Erhöhung der Insassenbelastung (ASI) führt.

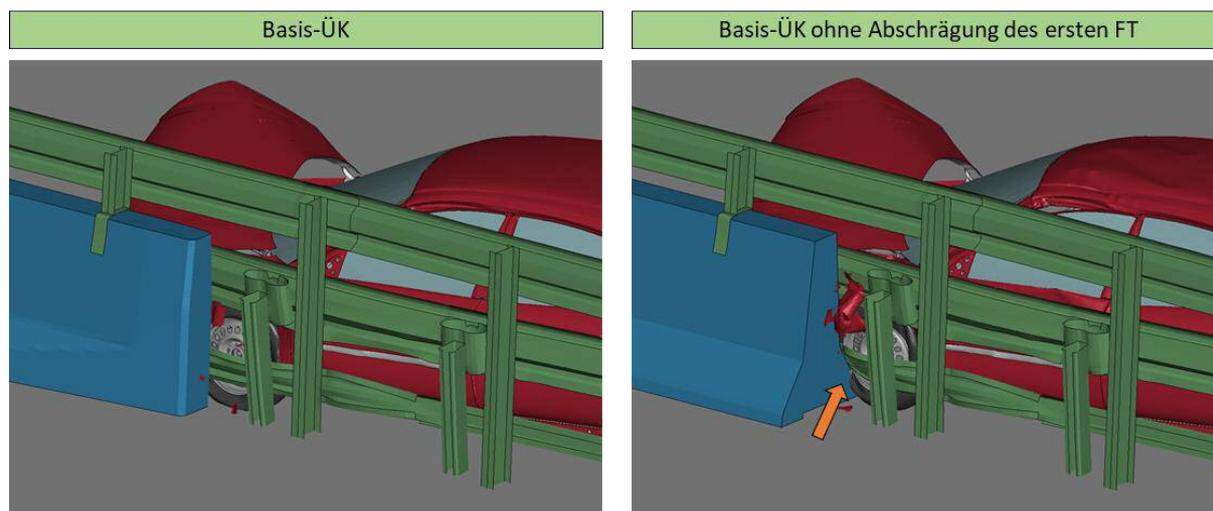


Abbildung 60: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Begradigung des Anschlusselementes – TB32

Ein ähnliches Verhalten ist bei der TB61 Anprallkonfiguration in Abbildung 61 zu erkennen, wenn auch mit geringerem Einfluss auf die Fahrzeugkinematik. Das Vorderrad des Lkw fuhr auf die Kante an der Stirnseite des Anschlusselementes auf (links) was in weitere Folge zur stärkeren Verschiebung des FRS und dadurch zur Erhöhung des Wirkungsbereiches führte.

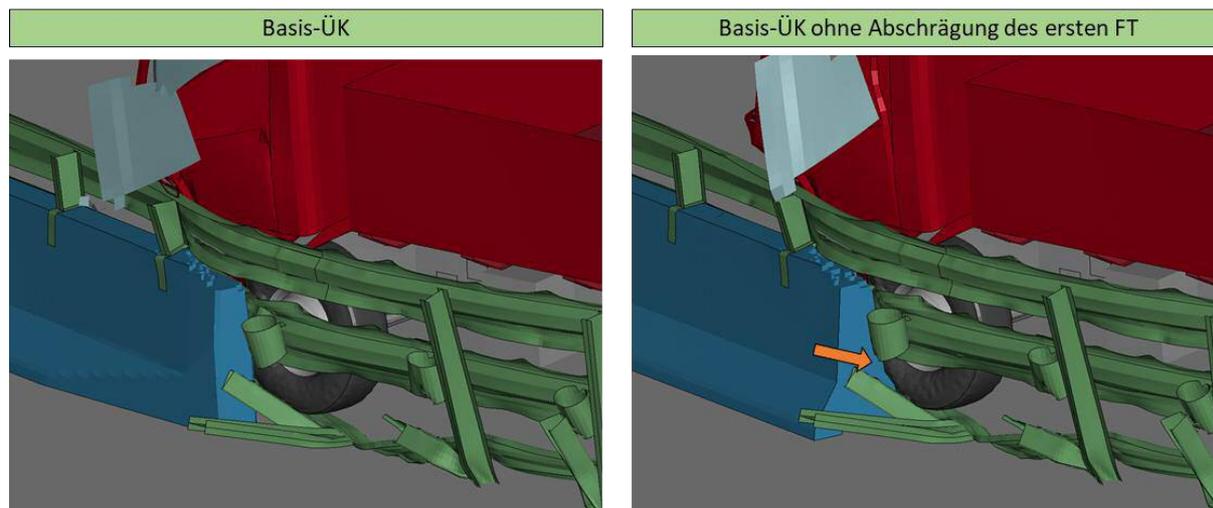


Abbildung 61: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Begradigung des Anschlusselementes – TB61

### 3.2.4 V4: Keine Dämpfungselemente zwischen Leitschieneband und Fertigteile

Bei Verzicht auf die Dämpfungselemente verringerte sich der ASI bei der TB32 Anprallkonfiguration um 13,5 % (Abbildung 62). Auch hier musste der Anprallpunkt für die TB32 Simulation in der Basis-ÜK und der modifizierten Variante um 3 m in Richtung Beton FRS verschoben werden, um den Einfluss der Dämpfungselemente abbilden zu können.

Aufgrund der fehlenden Verbindung des Anschlusselementes mit dem vorderen Leitschieneband konnte das Anschlusselement in der TB61 Simulation stärker auslenken und führte somit zu einer Erhöhung des Wirkungsbereiches um 8,7 % (unveränderter Anprallpunkt). Es ist ein Zuwachs in der Zugkraft des vorderen Leitschienebandes um 29,0 % aber eine Verringerung der Zugkraft im hinteren Leitschieneband um 10,4 % festzustellen. Die Zugkräfte in den Kupplungen veränderten sich nur geringfügig (+1,3 %).

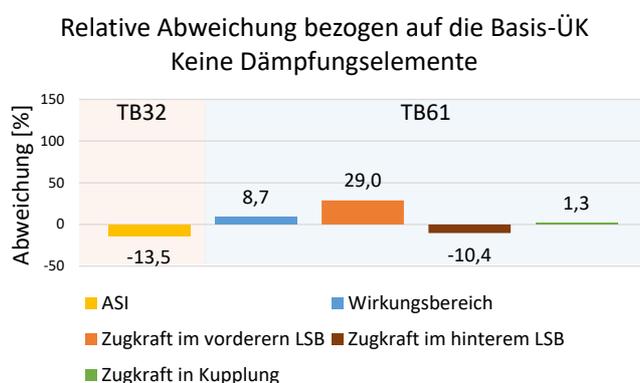


Abbildung 62: Relative Veränderung der Systemparameter bei Verzicht auf die Dämpfungselemente zwischen Leitschieneband und Fertigteile

Durch das Fehlen der Dämpfungselemente legt sich das Leitschienenband beim Fahrzeuganprall an das Anschlusselement an (Abbildung 63). Dieses Anlegen verändert die Geometrie des FRS im Anprallbereich und führt zu einer anderen Umlenkinematik des Fahrzeuges. In dieser Anprallkonfiguration, wie sie hier untersucht wurde, resultiert dieser Umstand in einer Verringerung des ASI Wertes. Wirkte sich diese Veränderung im FRS für diese TB32 Anprallkonfiguration positiv aus, hatte diese Modifikation hingegen bei der TB61 Simulation negative Auswirkungen.

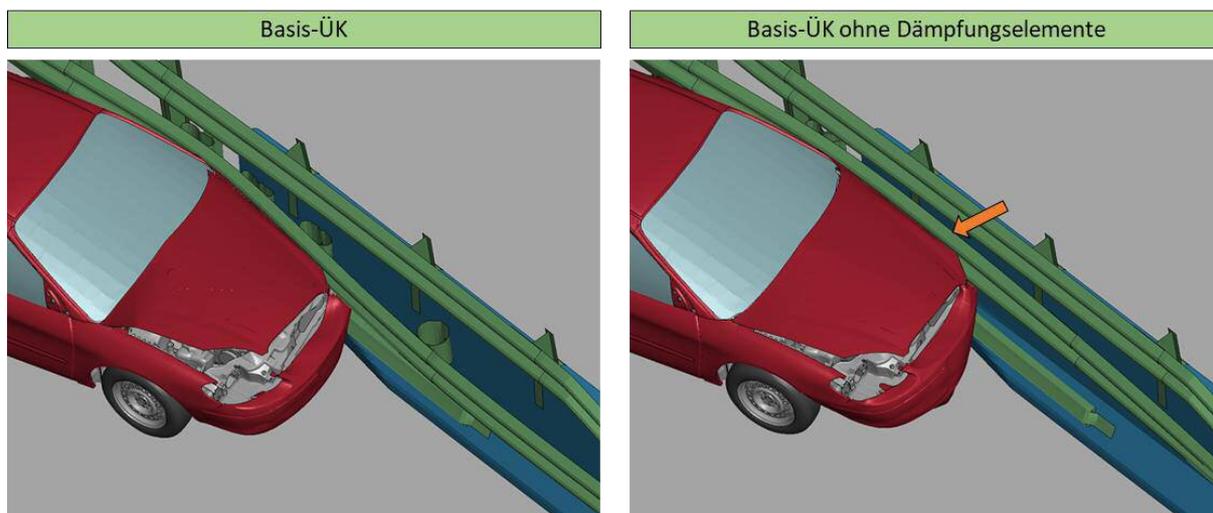


Abbildung 63: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Verzicht auf die Dämpfungselemente – TB32

Abbildung 64 zeigt, wie das Leitschienenband durch das Fehlen der Dämpfungselemente (rechts) stärker um die Stirnseite des Anschlusselementes geknickt wird, als in der Basis-ÜK (links). Dies ist auch der Grund für die Erhöhung der Zugkräfte im vorderen Leitschienenband.

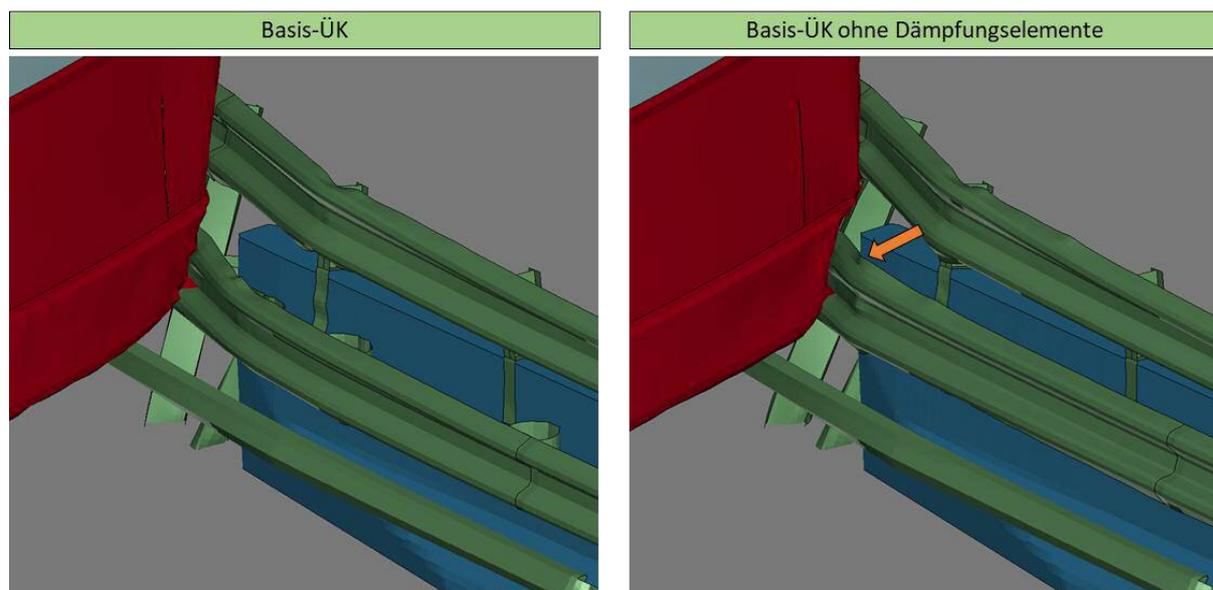


Abbildung 64: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Verzicht auf die Dämpfungselemente – TB61

### 3.2.5 V5: Kein Versatz der Fertigteile

Es ist in dieser Variante eine Erhöhung des ASI um 36,1 % festzustellen (Abbildung 65). Durch den Abstand zwischen Leitschienenband und Anschlusselement stand weniger Deformationsweg zur Energieabsorption zur Verfügung und führte damit zu einer stärkeren Umlenkung des Fahrzeuges und somit zu einem höheren ASI Wert.

In der simulierten TB61 Anprallkonfiguration veränderte sich die Auslenkung der ÜK kaum (-1,6 %). Durch das Fehlen der Dämpfungselemente müssen vom vorderen Leitschienenband um 9,4 % mehr Zugkräfte aufgenommen werden, aber vom hinteren Leitschienenband um 4,5 % weniger. Die Kupplungskräfte erhöhten sich in dieser Variante um 7,3 %.

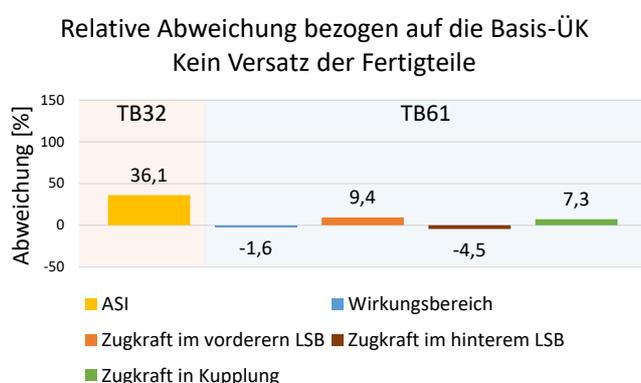


Abbildung 65: Relative Veränderung der Systemparameter bei Begradigung der Schrägstellung der Fertigteile

Die Erhöhung des ASI in der TB32 Simulation ist auf den geringeren Abstand zwischen hinterem und vorderem Leitschienenband zurückzuführen. Durch die in der Flucht zur Systemvorderkante aufgestellten Fertigteile, rücken die Steher des hinteren Leitschienenbandes zwangsläufig in Richtung Systemvorderkante, um das Leitschienenband an der Krone des Anschlusselementes anschließen zu können. Die Front des Fahrzeuges kam damit mit den beiden letzten Stehern des hinteren Leitschienenbandes in Kontakt und hackt ein (Abbildung 66 rechts). In der Basis-ÜK (Abbildung 66 links) ist nur eine geringe Berührung der Fahrzeugfront mit dem vorletzten Steher des hinteren Leitschienenbandes anhand einer kleinen Deformation am Steher zu erkennen.

Es muss hier erwähnt sein, dass dieses Verhalten, je nach Geometrie der Fahrzeugfront, in unterschiedlicher Ausprägung beobachtet werden kann. Es wird angenommen, dass Fahrzeuge mit einem geringeren Abstand zwischen Stoßstange und Vorderachse weniger unter das vordere Leitschienenband eintauchen und es somit zu einem sanfteren Kontakt zwischen Fahrzeug und Steher kommen kann. Nichtsdestotrotz wurde die Basis-ÜK mit dem hier verwendeten Fahrzeugmodell auf den Test validiert und repräsentiert somit das Verhalten des realen Testfahrzeuges.

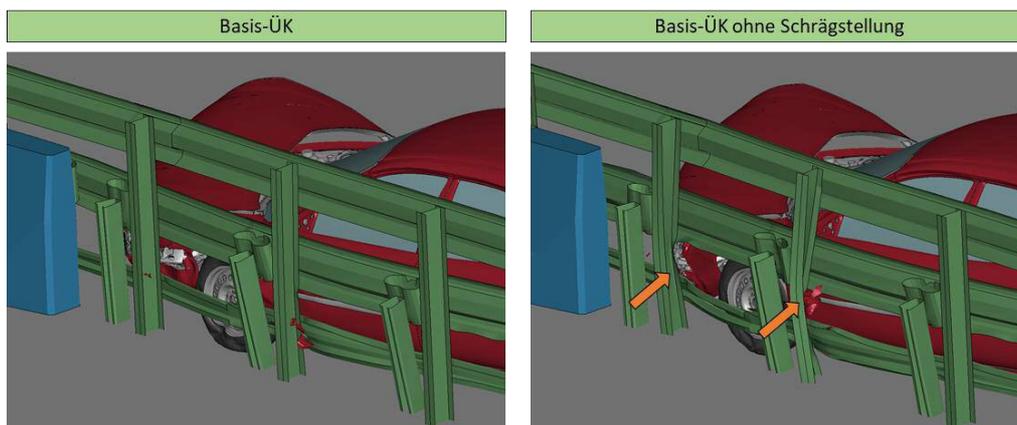


Abbildung 66: Vergleich der Fahrzeugkinematik ohne Schrägstellung der Fertigteile – TB32

Abbildung 67 zeigt die Auswirkung auf die Interaktion zwischen Fahrzeug und FRS, wenn das Anschlusselement nicht nach hinten versetzt wird und kein Raum für die Montage von Dämpfungselementen zwischen Leitschieneband und Anschlusselement bleibt. Das nach hinten versetzte Anschlusselement und das erste Dämpfungselement sorgen für eine harmonische Umlenkung des Leitschienebandes (Basis-ÜK, links). Im Gegensatz dazu ist in der modifizierten Variante eine starke Knickung des Leitschienebandes an der Kante zur Stirnseite des Anschlusselementes zu beobachten, was wiederum zum Anstieg in den Zugkräften führt, als auch zu einer Überbelastung des vorderen Leitschienebandes führen kann.

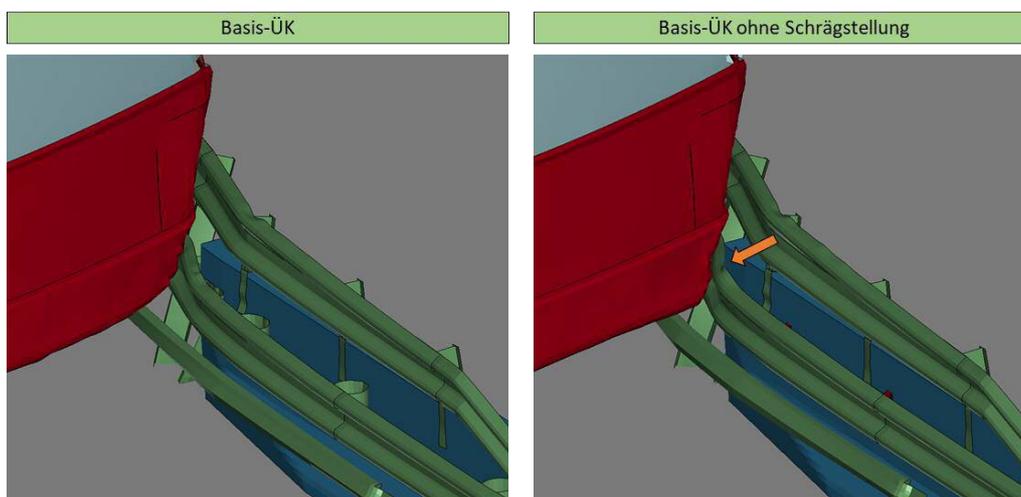


Abbildung 67: Vergleich der Fahrzeugkinematik ohne Schrägstellung der Fertigteile – TB61

### 3.2.6 V6: Weniger Aufsatzsteher auf dem Anschlusselement

Der ASI aus der TB32 Simulation wurde durch die Reduktion der Aufsatzsteher auf der Krone des Anschlusselementes kaum beeinflusst (-1,4 %), siehe Abbildung 68. Der Kontakt des Pkw beschränkt sich auf das vordere Leitschieneband und das Anschlusselement wird durch die Umlenkung des Fahrzeuges am Leitschieneband nicht berührt. Auch bei einer etwaigen Änderung des Anprallpunktes wäre eine Interaktion des Fahrzeuges mit dem hinteren Leitschieneband auf Höhe des

## Ergebnisse

Anschlusselementes und dadurch mit den Aufsatzstehern aus geometrischen Gegebenheiten nicht möglich.

Hingegen sind Einflüsse in der TB61 Simulation zu beobachten. Durch die geänderte Anzahl und Position der Anbindungspunkte erhöhte sich der Wirkungsbereich der ÜK um 6,0 %. Dadurch, dass der erste Steher einen größeren Abstand zur Stirnseite des Anschlusselementes hat, kann das Anschlusselement stärker auslenken als in der Basis-ÜK. Daraus erhöhten sich die auftretenden Zugkräfte im vorderen Leitschienenband um 6,5 % und im hinteren Leitschienenband um 7,1 %. Ebenso ist eine Erhöhung in den Kupplungskräften um 6,0 % ersichtlich.

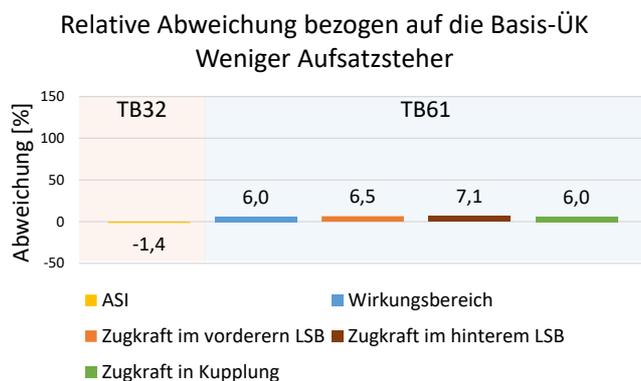


Abbildung 68: Relative Veränderung der Systemparameter bei Verringerung der Anzahl der Aufsatzsteher

Abbildung 69 zeigt links das Systemverhalten der Basis-ÜK und rechts jenes der Variante in der die Verbindung des hinteren Leitschienenbandes mit dem Anschlusselement auf zwei Steher reduziert wurde. Durch die Verringerung der Steheranzahl wurde das hintere Leitschienenband stärker deformiert und das Anschlusselement später aktiviert und somit auch später ausgelenkt.

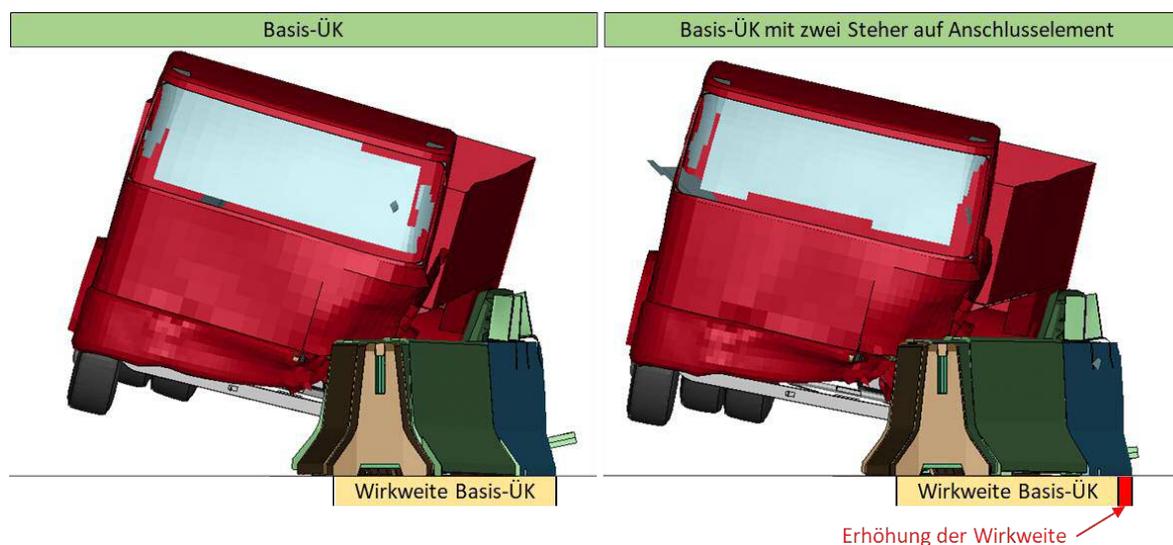


Abbildung 69: Vergleich der Fahrzeugkinematik bei Verringerung der Steher am Anschlusselement – TB61

### 3.2.7 V7: Kein Gleitprofil im FRS Stahl

Ohne das Gleitprofil ist eine massive Erhöhung des ASI um 122,2 % für die TB32 Simulation festzustellen (Abbildung 70). Durch das fehlende Gleitprofil wurde das Fahrzeug durch die fehlende Abstützung des Vorderrades weniger abgeleitet und das Vorderrad hakte somit am Steher bzw. an der Stirnseite des Anschlusselementes ein.

In der TB61 Simulation ist eine Erhöhung des Wirkungsbereiches um 15,3 %, der Zugkräfte im vorderen und hinteren Leitschienenband um jeweils 22,9 % und 4,7 % als auch in den Kupplungen um 8,9 % ersichtlich. Kinematisch ist kein Unterschied des Fahrzeugverhaltens in den beiden TB61 Simulationen zu erkennen. Durch das fehlende Gleitprofil wurde die ÜK mehr ausgelenkt. Die höhere Auslenkung führte zu höheren Zugkräften im Leitschienenband und in den Kupplungen.

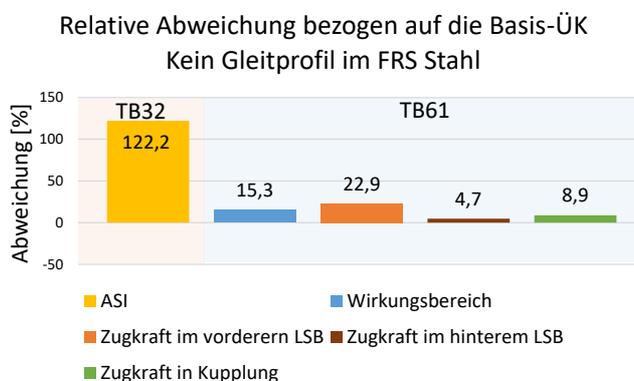


Abbildung 70: Relative Veränderung der Systemparameter bei Entfernen des Gleitprofils im Stahlsystem

Abbildung 71 zeigt den Vergleich der Kinematik für die Basis-ÜK (links) und die Basis-ÜK ohne Gleitprofil (rechts) für die TB32 Anprallkonfiguration. Der Zeitpunkt bei Anprall an den Steher (obere Abbildungen) zeigt wie das Vorderrad des Pkw über das Gleitprofil am Steher abgeleitet. Hingegen stieß bei Fehlen des Gleitprofils das Vorderrad bereits auf den drittletzten Steher des vorderen Leitschienenbandes und hackte bei den vorletzten Stehern beider Leitschienenbänder ein. In weiterer Folge ist ein frontaler Anprall der Längsträger am Anschlusselement zu beobachten (untere Abbildungen). Bei der Basis-ÜK verhindert das Gleitprofil und das vordere Leitschienenband ein Einhaken des Pkw an den Stehern.

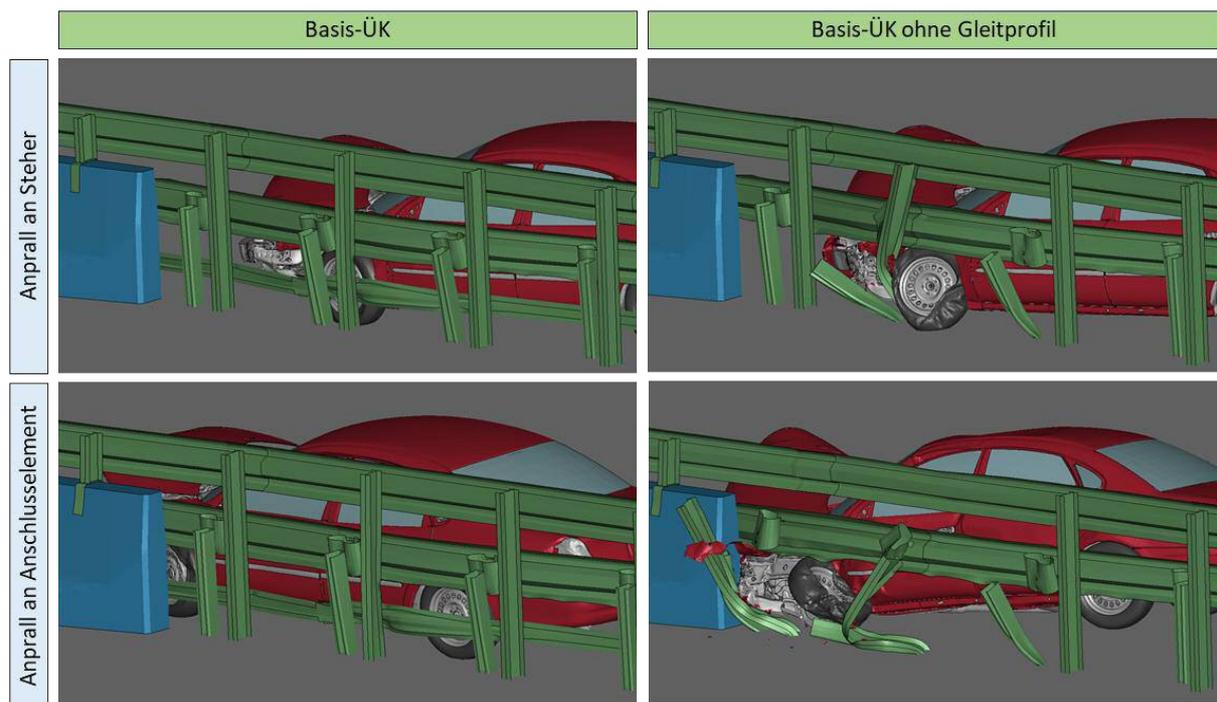


Abbildung 71: Vergleich der Fahrzeugkinematik mit und ohne Gleitprofil

### 3.2.8 Zusammenfassung der Einflussuntersuchung

Die relativen Veränderungen von ASI, Wirkungsbereich ( $W_m$ ) und den Zugkräften im vorderen Leitschienenband ( $F_{LS_v}$ ), im hinteren Leitschienenband ( $F_{LS_h}$ ) und Kupplungen ( $F_K$ ) sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Die Einfärbung bezieht sich auf das Maß der Abweichung von null, wobei in Gelb markierte Felder eine Erhöhung des Wertes und blau eingefärbte Felder eine Verringerung des Wertes darstellen. Je kräftiger die Einfärbung, desto größer die Abweichung. In der Spalte „K“ wurde ebenso ein kritisches Verhalten des Fahrzeuges oder des FRS dokumentiert.

Der ASI wird am stärksten von der Steifigkeit des FRS durch Änderung des Steherabstandes (-32,6 %) und durch ein Gleitprofil, welches das Einhängen am Anschlusselement verhindert (+122 %), beeinflusst. Die Zugkraftverteilung in den beiden Leitschienenbändern lässt sich über alle Maßnahmen regulieren, wobei das Anbringen von Dämpfungselementen den stärksten Einfluss darauf hat. Die Kupplungskräfte werden am stärksten von der Steifigkeit des FRS Stahl beeinflusst (Steherverdichtung und Gleitprofil) aber auch durch den initialen Versatz der Fertigteile.

Tabelle 14: Relative Veränderung der Systemparameter für die einzelnen Varianten

Variation des Parameters	TB32		TB61				
	ASI	K	Wm	F_LS_v	F_LS_h	F_K	K
V1: Keine Stehverdichtung im Stahlsystem	-32,6	-	13,0	21,2	0,3	9,6	-
V2: Höherer Abstand des letzten Stehers zum Anschlusselement	5,9	-	5,9	1,2	-6,2	5,2	-
V3: Keine Abschrägung des Anschlusselementes	13,0	Anprall an Stirnseite des AE	12,5	4,1	0,0	4,3	Anprall an Stirnseite des AE
V4: Keine Dämpfungselemente zwischen Leitschienenband und Fertigteile	-13,5	-	8,7	29,0	-10,4	1,3	Knickung des LSB um AE
V5: Kein Versatz der Fertigteile	36,1	Kontakt mit hinteren Stehern	-1,6	9,4	-4,5	7,3	Knickung des LSB um AE
V6: Weniger Aufsatzsteher auf dem Anschlusselement	-1,4	-	6,0	6,5	7,1	6,0	-
V7: Kein Gleitprofil im Stahlsystem	122,2	Einhaken und Anprall an Stirnseite des AE	15,3	22,9	4,7	8,9	-

Obwohl sich die Nichtberücksichtigung gewisser Maßnahmen teilweise positiv auf Kriterien auswirken kann, wie z.B. durch Verringerung des ASI durch Erhöhung des Steherabstandes, müssen die Veränderungen immer im Gesamtkontext von TB32 und TB61 betrachtet werden. Dabei steht stets der Kompromiss zwischen Durchbruchsisicherheit bzw. Auslenkung des FRS beim TB61 Anprall und der Insassenbelastung im TB32 Anprall im Vordergrund. Ebenso sind die Auswirkungen auf die Kinematik der Fahrzeuge, wie z.B. Anprall an Stirnseite des Anschlusselementes, als auch eine kritische Bauteilbelastung wie z.B. Knickung des Leitschienenbandes um das Anschlusselement mit zu betrachten.

Weiters ist zu beachten, dass auch einzelne Maßnahmen mit geringeren Einfluss laut Tabelle 14 in Kombination mit anderen Maßnahmen verstärkt wirken können. Nur die Kombination aller eingesetzten Maßnahmen führt zu einem kontinuierlichen Umlenken beider Fahrzeuge (Kinematik von Pkw und Lkw) und bieten ausreichend Schutz vor einem Durchbruch und sind jedenfalls anzuwenden.

### 3.3 Simulationsbasierter Nachweis der Anwendbarkeit der Maßnahmen auf weitere FRS

Die erarbeiteten Verbesserungsmaßnahmen, welche bei der Konzeptionierung der Basis-ÜK angewandt und auf deren Einflüsse untersucht wurden, wurden bei der Verbindung von weiteren FRS von unterschiedlichen Herstellern angewandt. Dadurch soll die konstruktive Gestaltung der Basis-ÜK als produktunabhängige Übergangskonstruktion auf deren Wirksamkeit auch bei anderen FRS-Kombinationen überprüft werden.

#### 3.3.1 Übergangskonstruktion IMEVA BL300 – DB100 6m

Beim Ersatz des FRS Stahl KB1 RH3 durch das FRS BL300 von der Firma IMEVA ist in der Draufsicht auf beide Modelle in Abbildung 72 im Übergangsbereich eine etwas geringere Verdrehung des Anschlusselementes zu erkennen. Durch Unterschiede in der Anprallkinematik des Lkw wird das Anschlusselement weniger ausgelenkt und dadurch weniger verdreht. In der Frontansicht (Abbildung 73) ist die dadurch resultierende Verringerung des Wirkungsbereiches der ÜK mit dem FRS von der Firma IMEVA ersichtlich.

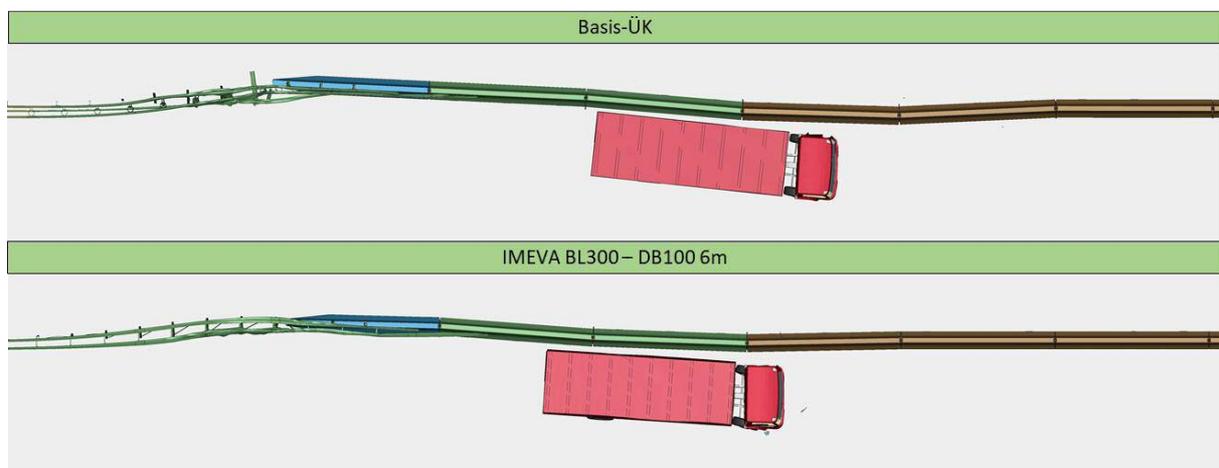


Abbildung 72: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK IMEVA BL300 – DB100 6m – Draufsicht

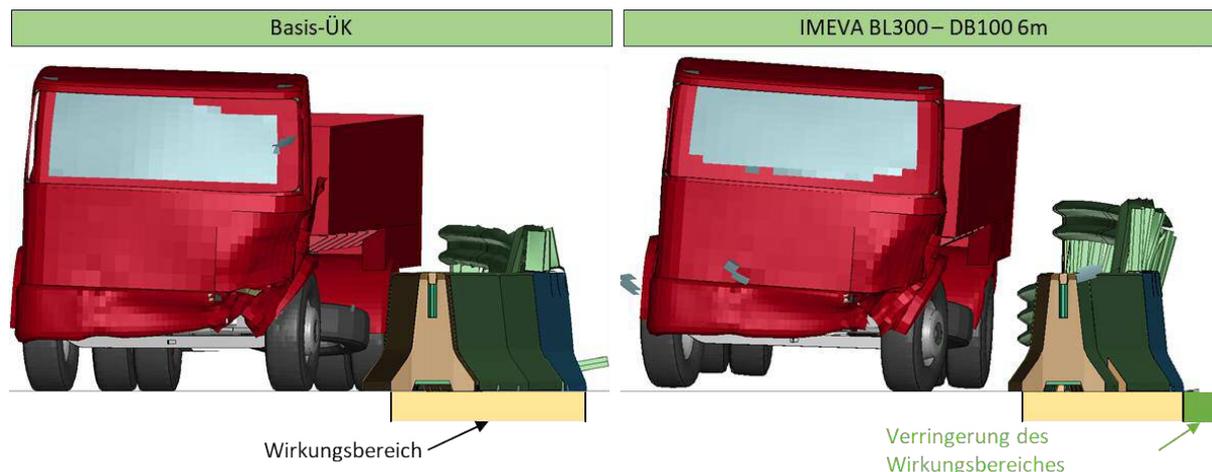


Abbildung 73: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK IMEVA BL300 – DB100 6m – Frontansicht

Beim Vergleich der auftretenden Zugkräfte in Tabelle 15 ist eine um 18 % geringere Belastung des hinteren Leitschienebandes in der ÜK, vergleichen zum Basis-FRS, festzustellen. Die Zugkraft im vorderen Leitschieneband veränderten sich kaum (-1 %) gegenüber jenen im Basis-FRS. Die oben beschriebenen Unterschiede in der Systemauslenkung führten zu einer um 10 % geringeren Zugkraft in den Kupplungen. Die maximale Zugkraft tritt in der Basis-ÜK als auch in der ÜK IMEVA BL300 – DB100 6m in der zweiten Kupplung (K2) auf.

Tabelle 15: Relative Veränderung der Bewertungskriterien der ÜK IMEVA BL300 – DB100 6m gegenüber Basis-FRS

Kriterium	Basis-FRS	Relative Abweichung gegenüber Basis-FRS
Max. Zugkraft im vorderen Leitschieneband	BL300	-1 %
Max. Zugkraft im hinteren Leitschieneband	BL300	-18 %
Max. Zugkraft in den Kupplungen	DB100 6m	-10 % (K2)

Die Kinematik beim TB32 Anprall an die beiden ÜK ist in Abbildung 74 gegenübergestellt. Durch die nach hinten versetzten Steher im FRS von der Firma IMEVA fand kein Kontakt zwischen Vorderrad und Steher statt und die Steifigkeit im FRS Stahl gewährleistet auch ein Abgleiten des Fahrzeuges. Da im FRS von der Firma IMEVA kein Gleitprofil angebracht ist und das vordere Leitschieneband tiefer liegt als im FRS KB1 RH3, führt der dadurch höhere Kontaktpunkt zu einer Deformation der Radaufhängung. Das FRS von der Firma IMEVA ist nicht auf den TB32 Anprall validiert, somit kann dieses Verhalten nicht plausibilisiert bzw. mit dem realen Verhalten verglichen werden.

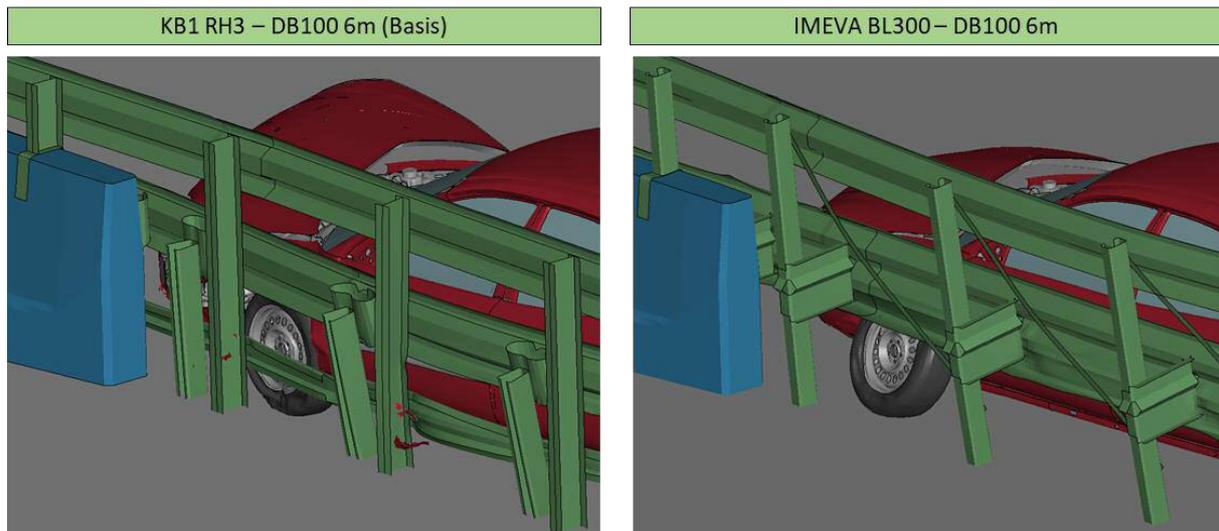


Abbildung 74: TB32 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK IMEVA BL300 – DB100 6m

### 3.3.2 Übergangskonstruktion KB1 RH3 – DB100 2m

Beim Ersatz des Beton FRS DB100 6m durch das FRS DB100 2m ist keine Veränderung der Fahrzeugkinematik zu beobachten. In der Draufsicht der beiden Modelle (Abbildung 75) ist im Übergangsbereich eine etwas geringere Verdrehung des Anchlusselementes zu erkennen. Im weiterführenden FRS mit den 2 m langen Fertigteilen zeigt das FRS durch die geringere Länge der Elemente eine geringere Verdrehung der Elemente zueinander. In der Frontansicht (Abbildung 76) ist eine etwas stärkere Gegenauslenkung des FRS mit 2 m langen Fertigteilen ersichtlic.

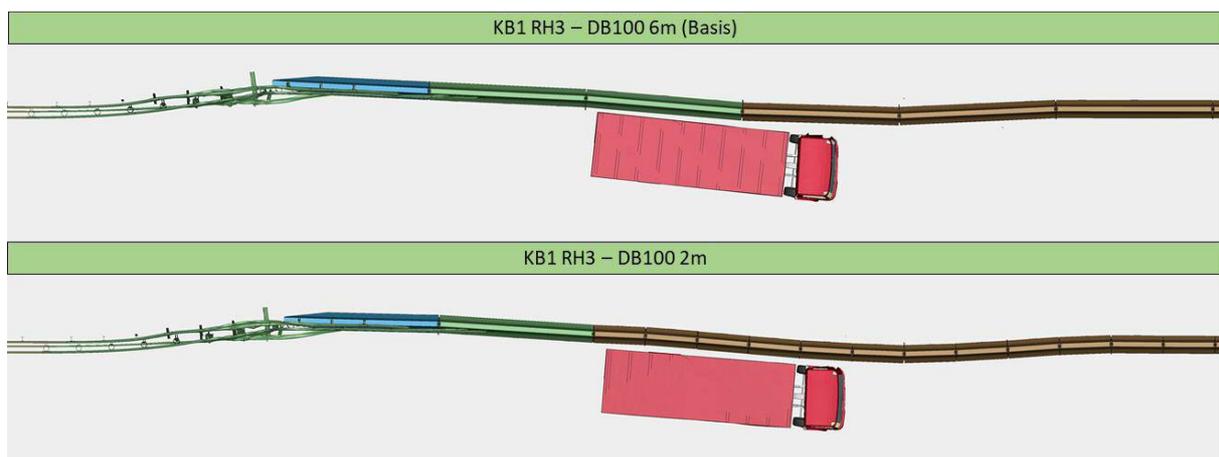


Abbildung 75: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK KB1 RH3 – DB100 2m – Draufsicht

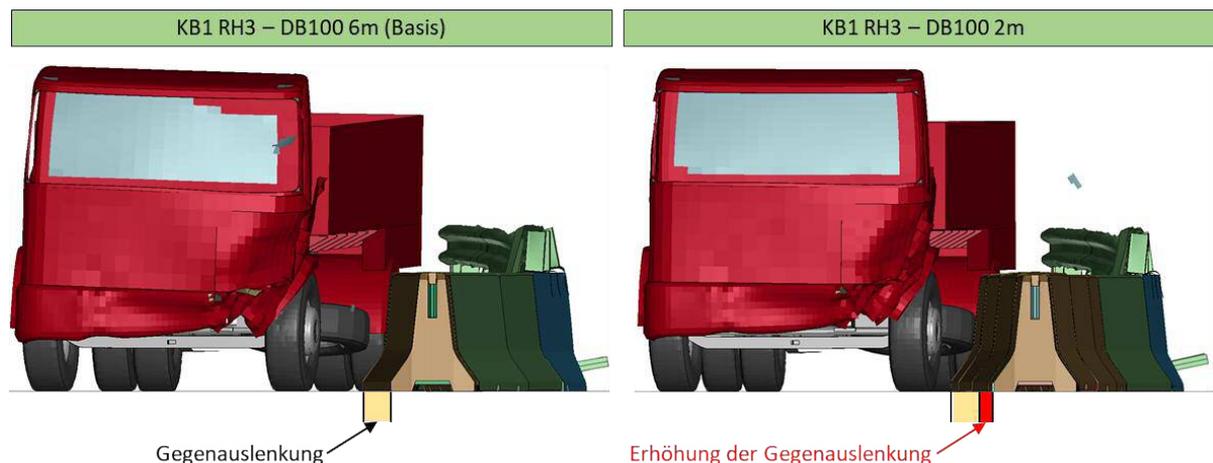


Abbildung 76: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK KB1 RH3 – DB100 2m – Frontalansicht

In Tabelle 16 sind die relativen Veränderungen der Bewertungskriterien für diese ÜK-Variante angegeben. Es ist eine geringe Erhöhung der Zugkraft in den Kupplungen um 3 % zu beobachten. Die Zugkraft im vorderen Leitschienenband verringert sich um -37 % und im hinteren Leitschienenband um -9 %. Es wird vermutet, dass diese Reduktion im größeren Längsspiel durch die höhere Anzahl an Elementen und somit Kupplungen im Beton FRS begründet ist.

Tabelle 16: Relative Veränderung der Bewertungskriterien der ÜK KB1 RH3 – DB100 2m gegenüber Basis-FRS

Kriterium	Basis-FRS	Relative Abweichung gegenüber Basis-FRS
Max. Zugkraft im vorderen Leitschienenband	KB1 RH3	-37 %
Max. Zugkraft im hinteren Leitschienenband	KB1 RH3	-9 %
Max. Zugkraft in den Kupplungen	DB100 6m	+3 % (K3)

Für den TB32 Anprall hatte die Änderung der Elementlänge im Beton FRS keinen Einfluss auf die Kinematik des Pkw und wird somit nicht weiter beschrieben.

### 3.3.3 Übergangskonstruktion KB1 RH3 – RB100L\_8

Beim Ersatz des FRS DB100 6m durch das FRS RB100L\_8 ist eine etwas spätere Drehung des Fahrzeuges festzustellen. In der Frontalansicht (Abbildung 78) ist zu erkennen, dass der Lkw Kontakt zum FRS RB100L\_8 hat, jedoch beim Anprall an die ÜK mit dem FRS DB100 6m zur selben Simulationszeit den Kontakt zum FRS bereits verlassen hat. In der Draufsicht (Abbildung 77) ist eine zur Basis-ÜK unterschiedliche Verformungscharakteristik des Beton FRS zu erkennen. Durch die längere Elementlänge wurde das FRS RB100L\_8 weniger ausgelenkt und die Elemente weniger zueinander verdreht.

## Ergebnisse



Abbildung 77: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK KB1 RH3 – RB100L\_8 – Draufsicht

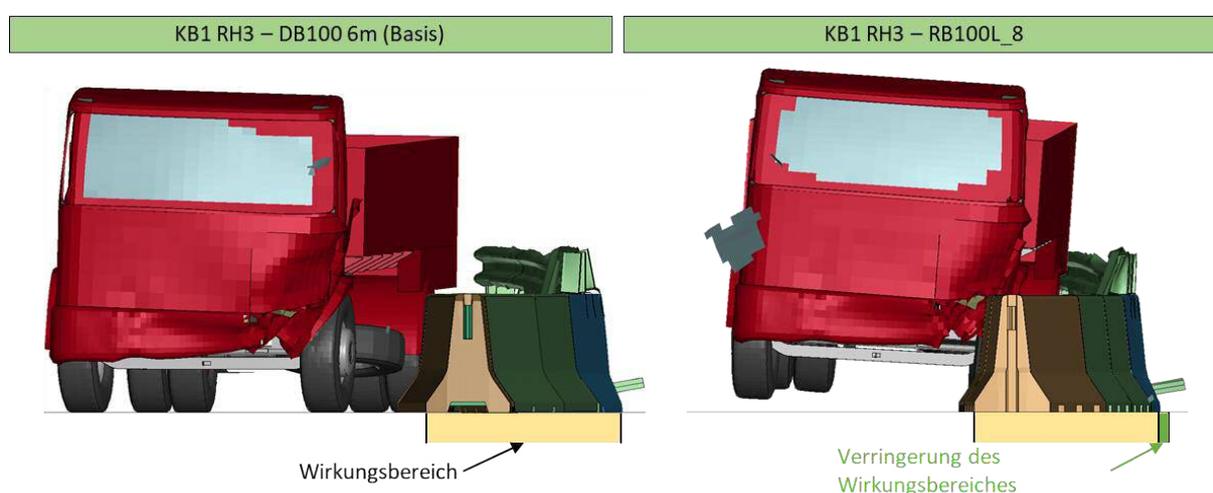


Abbildung 78: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK KB1 RH3 – RB100L\_8 – Frontalansicht

Durch die geringere Systemauslenkung wirkt eine geringere Zugkraft im vorderen (-5 %) und hinteren (-51 %) Leitschienenband. Der Kraftpeak, welcher zu einer um 21 % höheren Kupplungskraft gegenüber dem Basis-FRS RB100L\_8 führt, tritt in der zweiten Kupplung (K2) auf. Es wird vermutet, dass höhere Zugkraft entsteht, wenn durch die Verdrehung die Elemente auf Knirsch gehen. Die dahinter folgenden Elemente sind länger und dadurch schwerer und erschweren dadurch die Systemverschiebung.

Tabelle 17: Relative Veränderung der Bewertungskriterien der ÜK KB1 RH3 – RB100L\_8 gegenüber Basis-FRS

Kriterium	Basis-FRS	Relative Abweichung gegenüber Basis-FRS
Max. Zugkraft im vorderen Leitschienenband	KB1 RH3	-5 %
Max. Zugkraft im hinteren Leitschienenband	KB1 RH3	-51 %
Max. Zugkraft in den Kupplungen	DB100 2m	+21 % (K2)

Beim Vergleich der TB32 Anprallkonfigurationen (Abbildung 79) ist kein Unterschied in der Kinematik festzustellen. Die Unterschiede in der Geometrie der jeweiligen Anschlusselemente von der Firma DELTABLOC und von der Firma REBLOC wirken sich nicht auf den Fahrzeuganprall aus.

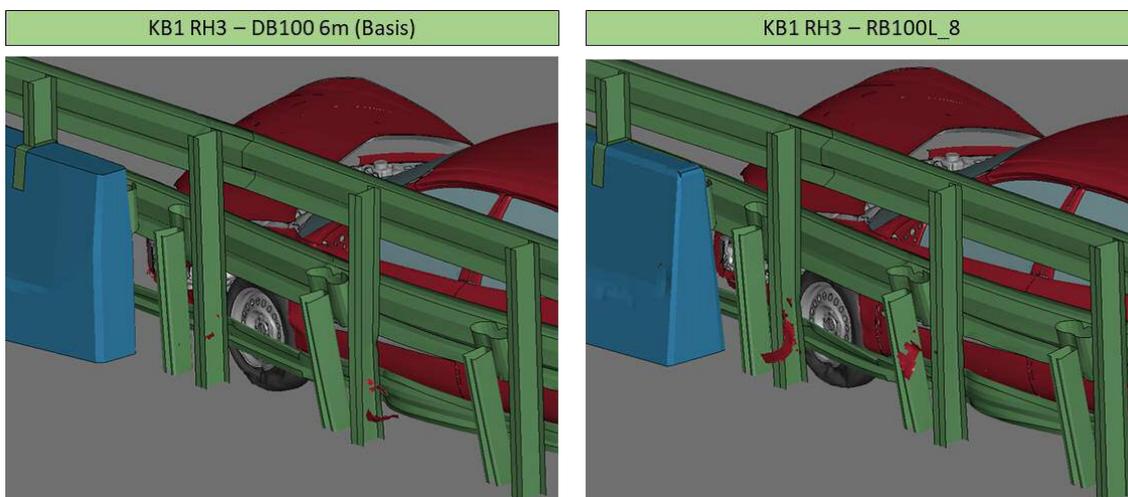


Abbildung 79: TB32 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK KB1 RH3 – RB100L\_8

### 3.3.4 Übergangskonstruktion KB1 RH2 – DB100 6m

Durch den Ersatz des Stahl FRS durch das FRS KB1 RH2 (Wegfall des hinteren Leitschienenbandes und der dazugehörigen Steher gegenüber dem FRS KB1 RH3) wird die Aufhaltestufe der Übergangskonstruktion auf H2 herabgesetzt. Demzufolge wurde auch die Simulation der ÜK KB1 RH2 – DB100 6m in der Anprallkonfiguration TB51 (Bus, 13.000 kg, 70 km/h, 20°) durchgeführt. Durch die Simulation unterschiedlicher Anprallkonfigurationen in der Basis-ÜK und der hier beschriebenen ÜK, ist ein Vergleich dieser nicht möglich. In Abbildung 80 ist die Draufsicht und in Abbildung 81 die Frontalansicht der Fahrzeugkinematik zum Zeitpunkt der maximalen Systemauslenkung und zum Zeitpunkt des Heckanpralles dargestellt. Der Bus steigt beim Anprall an das Anschlusselement auf, wie es auch in realen Anpralltests an Beton FRS zu beobachten ist. Der Heckschlag des Busses ist im Test massiver als in der Simulation. Dieses Phänomen konnte auch in der Validierungssimulation festgestellt werden. Da die auftretenden Kupplungszugkräfte um 31 % geringer sind als die Vergleichswerte der Hersteller, wird angenommen, dass auch bei einem stärkeren Heckanprall diese nicht überschritten werden.

## Ergebnisse

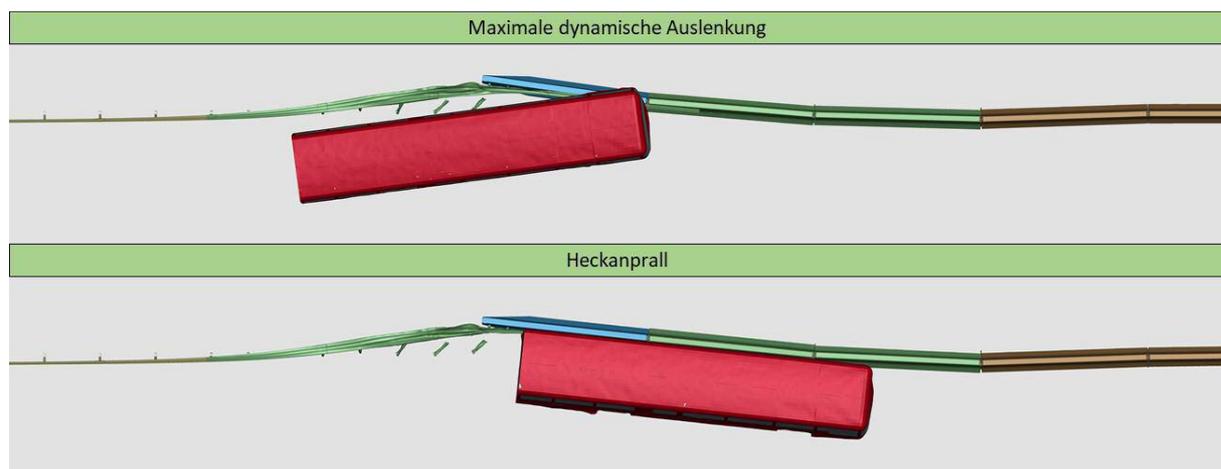


Abbildung 80: Kinematik bei TB51 Anprall an die ÜK KB1 RH2 – DB100 6m – Draufsicht



Abbildung 81: Kinematik bei TB51 Anprall an die ÜK KB1 RH2 – DB100 6m – Frontansicht

Die selbe Annahme gilt bei dem Vergleich der Zugkräfte mit den jeweiligen Basis-FRS (Tabelle 19). Hier ist eine Verringerung der auftretenden Zugkraft in den Kupplungen um 13 % zu beobachten. Auch hier wird angenommen, dass bei einem eventuell stärkeren Heckaufprall die Zugkraft weit unter den Vergleichswerten liegen werden. Die maximale Zugkraft tritt in der zweiten Kupplung (K2) auf. Im Leitschienenband verringern sich die Zugkraft um 31 %.

Tabelle 18: Relative Veränderung der Bewertungskriterien der ÜK KB1 RH2 – DB100 6m gegenüber Basis-FRS

Kriterium	Basis-FRS	Relative Abweichung gegenüber Basis-FRS
Max. Zugkraft im Leitschienenband	KB1 RH2	-31 %
Max. Zugkraft in den Kupplungen	DB100 6m	-13 % (K2)

Bei der TB32 Anprallkonfiguration kann, im Gegensatz zur TB51 Anprallkonfiguration, ein Vergleich mit der Basis-ÜK angestellt werden. In Abbildung 82 ist eine stärkere Deformation des H2 Stahl FRS zu

erkennen (rechts) als im H3 FRS der Basis-ÜK (links). Die Gesamtkinematik des Fahrzeuges ist bei beiden Übergangskonstruktionen vergleichbar.

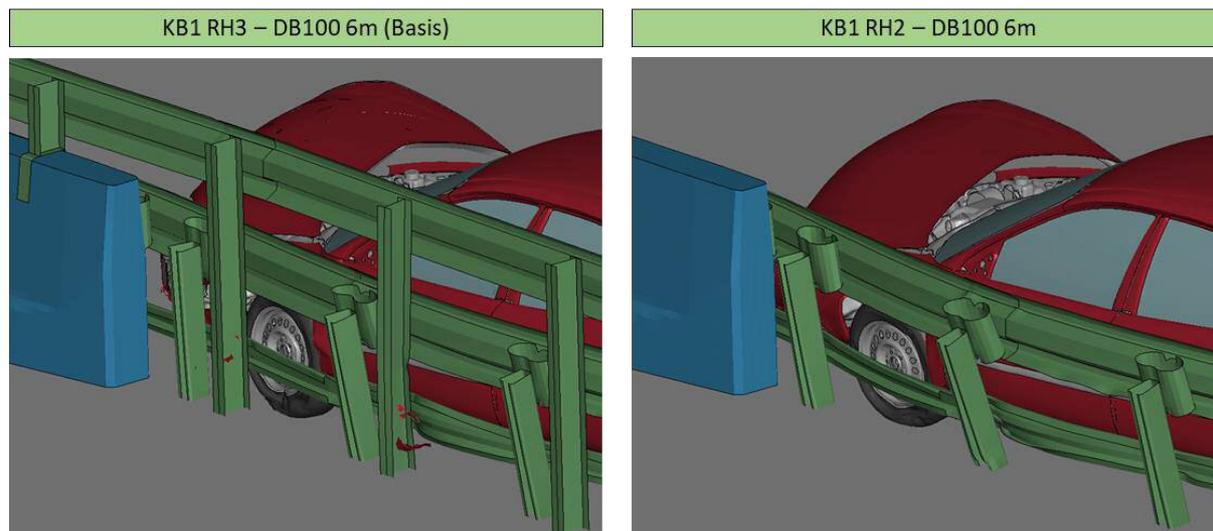


Abbildung 82: TB32 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK KB1 RH2 – DB100 6m

### 3.3.5 Übergangskonstruktion Fracasso 3n24872 – DB100 6m

Auch beim Ersatz des Stahl FRS durch das H2 FRS 3n24872 von der Firma Fracasso kann kein Vergleich mit der Basis-ÜK angestellt werden. In Abbildung 83 ist die Draufsicht und in Abbildung 84 die Frontalansicht der Fahrzeugkinematik zum Zeitpunkt der maximalen Systemauslenkung und zum Zeitpunkt des Heckanpralles dargestellt. Der Bus steigt beim Anprall an das Anschlusselement weniger auf als es bei dem H2 FRS KB1 RH2 von der Firma VAKF zu beobachten war. Der Heckschlag des Busses fällt auch hier etwas geringer aus, als in der Realität. Auch hier wird angenommen, dass bei einem stärkeren Heckanprall die Kupplungskräfte die Vergleichswerte der Hersteller nicht überschritten werden, da die auftretenden Kupplungszugkräfte in der Validierungssimulation des FRS DB100 6m um 31% geringer sind als die Vergleichswerte waren.

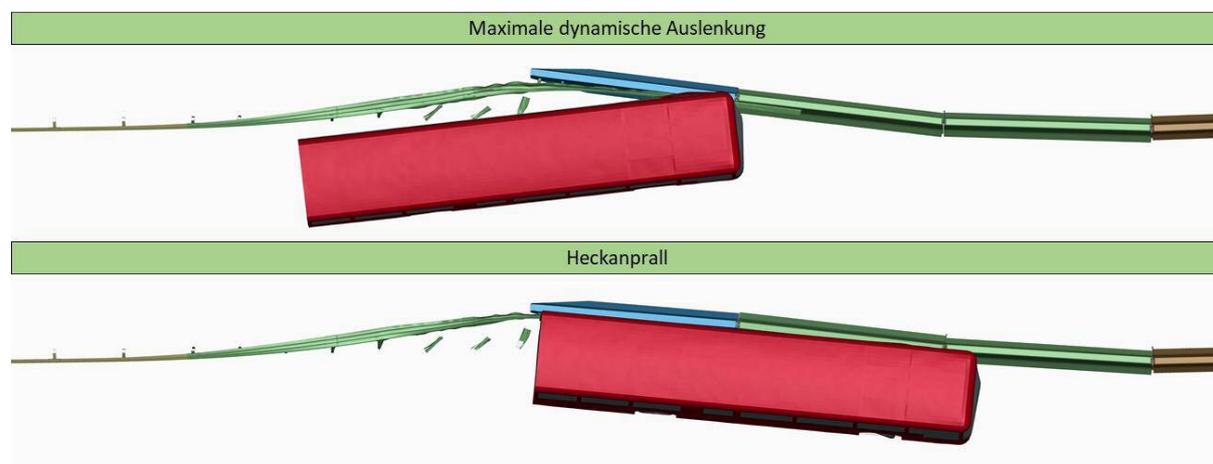


Abbildung 83: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK Fracasso 3n24872 – DB100 6m – Draufsicht

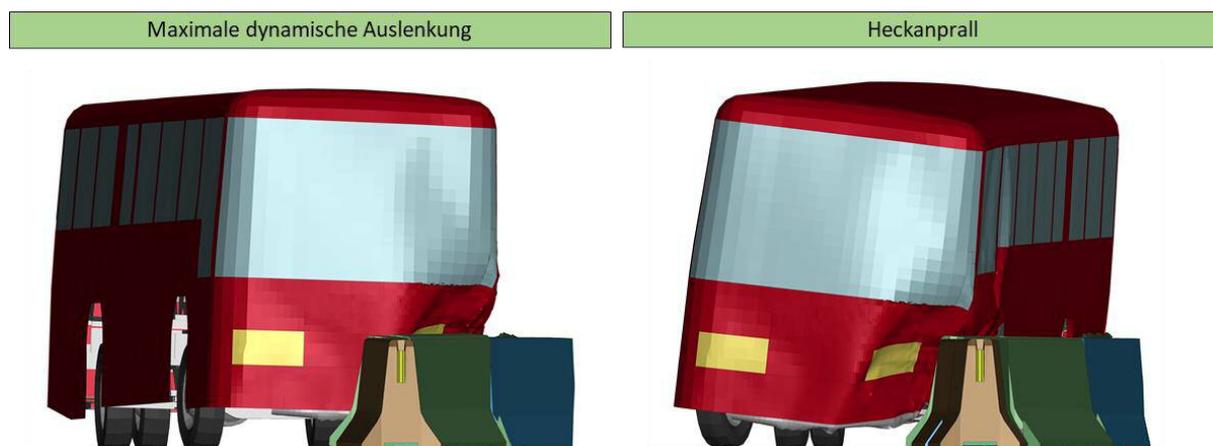


Abbildung 84: TB61 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK Fracasso 3n24872 – DB100 6m – Frontansicht

Im Vergleich zum Basis-FRS erhöht sich die Zugkraft in den Kupplungen um 10 % in der ÜK mit dem FRS DB100 6m (Tabelle 19). Die maximale Zugkraft tritt in der zweiten Kupplung (K2) auf. Die Zugkraft verringert sich im Leitschienenband um 34 %.

Tabelle 19: Relative Veränderung der Bewertungskriterien der ÜK 3n24872 – DB100 6m gegenüber Basis-FRS

Kriterium	Basis-FRS	Relative Abweichung gegenüber Basis-FRS
Max. Zugkraft im Leitschienenband	3n24872	-34 %
Max. Zugkraft in den Kupplungen	DB100 6m	+10 % (K2)

Bei der TB32 Anprallsimulation an das FRS von der Firma Fracasso ist zu erkennen, dass das FRS weicher ist, als jenes in der Basis-ÜK. Deswegen wird das Leitschienenband stärker verformt (Abbildung 85 rechts). Durch die Räder des Fahrzeuges werden die Steher derart verformt, dass die Verbindung zum Leitschienenband versagt und das Vorderrad in weiterer Folge an das Anschlusselement anprallt. Verglichen mit dem H2 Stahl FRS KB1 RH2 ist hier im FRS von der Firma Fracasso kein Gleitprofil angebracht, welches das Umlenken des Pkw unterstützt. Es wird angenommen, dass ein zusätzliches Gleitprofil im FRS von der Firma Fracasso im Bereich des Überganges zum Anschlusselement eine Verbesserung der Fahrzeugkinematik bringt. Auch hier ist zu erwähnen, dass das FRS von der Firma Fracasso nicht auf den TB32 Anprall validiert ist und somit die Reifen-Steher Interaktion nicht verifiziert werden kann.

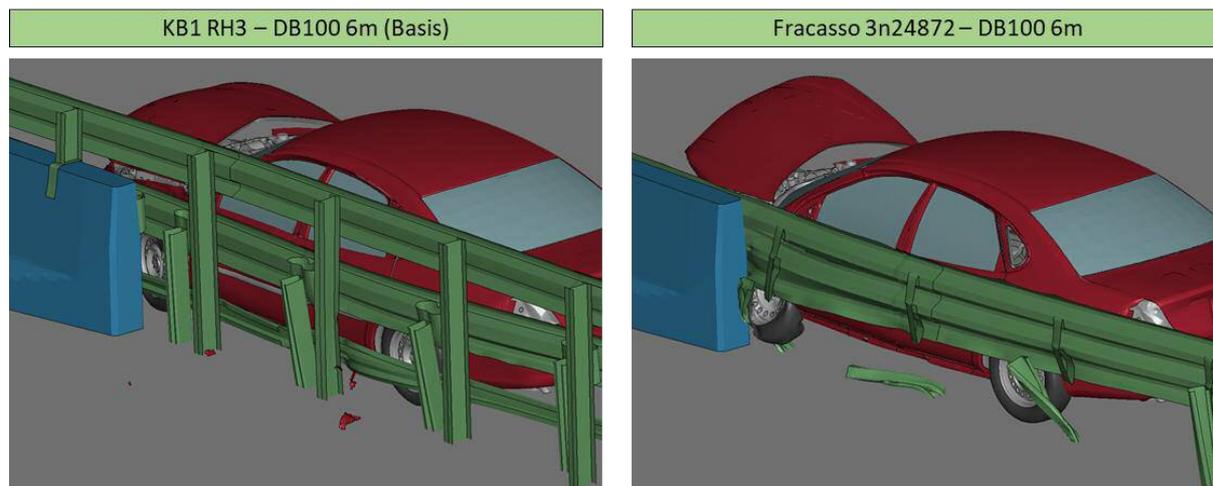


Abbildung 85: TB32 Kinematik von der Basis-ÜK mit der ÜK 3n24872 – DB100 6m

### 3.3.6 Zusammenfassung zur Anwendbarkeit der Maßnahmen auf weitere FRS

In Tabelle 20 sind die relativen Abweichungen der Zugkräfte in den jeweiligen Übergangskonstruktionen zusammengefasst. Zusätzlich sind in der ersten Zeile auch die Werte der Basis-ÜK angeführt. Die Kräfte im Leitschienenband erhöhen sich lediglich in der Basis-ÜK (KB1 RH3 – DB100 6m) um 2 %. In allen anderen ÜK ist eine Verringerung der Werte im Vergleich zu deren jeweiligem Basis-FRS zu beobachten. Die Zugkräfte in den Kupplungen erhöhen sich bei Einsatz des FRS DB100 6m in der Übergangskonstruktion um maximal 10 %. Wird ein Stahl FRS an das Beton FRS RB100L\_8 von der Firma REBLOC angeschlossen, ist eine Erhöhung von 21 % in den Kupplungen festzustellen.

Tabelle 20: Relative Abweichung der Zugkräfte gegenüber jeweiligem Basis-FRS

Übergangskonstruktion	Max. Zugkraft im vorderen Leitschienenband [%]	Max. Zugkraft im hinteren Leitschienenband [%]	Max. Zugkraft in den Kupplungen [%]
KB1 RH3 - DB100 6m*	2	-23	6 (K2)
BL300 - DB100	-1	-18	-10 (K2)
KB1 RH3 - DB100 2m	-37	-9	-12 (K3)
KB1 RH3 - RB100L_8	-5	-51	21 (K2)
KB1 RH2 - DB100 6m	-31	-	-13 (K2)
3n24872 - DB100 6m	-34	-	10 (K2)

\* Basis-ÜK

### 3.4 Berücksichtigung von Realsituationen

Wie in Kapitel 2.8 beschrieben, wurden reale Einbaubedingungen, welche im Bestand durch bauliche Gegebenheiten auf der Rückseite des FRS zu Einschränkungen der maximal möglichen Systemauslenkung bei einem Fahrzeuganprall führen können, über die Implementierung generischer Blöcke abgebildet und untersucht. Abbildung 86 zeigt den Zeitpunkt der maximalen Systemauslenkung für die Basis-ÜK (links oben, grau), die Basis-ÜK mit Wirkungsbereichseinschränkung 2 (WBE2) (rechts oben, blau), die Basis-ÜK mit WBE3 (links unten, rot) und die Basis-ÜK mit WBE4 (rechts unten, grün) für die TB61 Anprallkonfiguration. Ohne WBE kippt das Anschlusselement um  $3^\circ$ . Wird nun der Wirkungsbereich eingeschränkt, verhindert der starre Block die weitere Verschiebung des Fußes des Anschlusselementes, wodurch dieses stärker zu kippen beginnt. Der Winkel des Anschlusselementes erhöht sich bei WBE4 auf  $6^\circ$ , bei WBE3 auf  $9^\circ$  und bei WBE2 auf  $14^\circ$ .

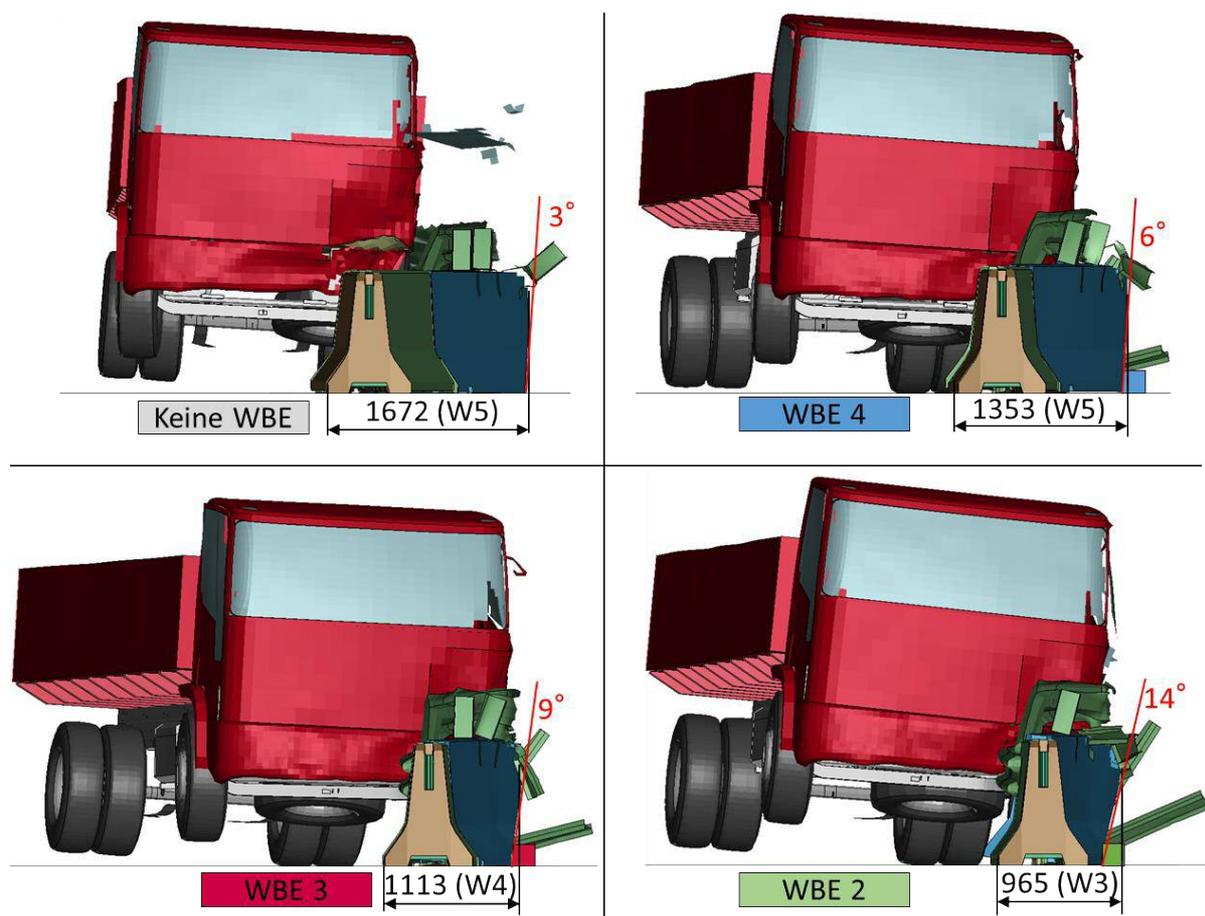


Abbildung 86: Systemauslenkungen bei verschiedenen Wirkungsbereichseinschränkungen (WBE)

Weiters wurde der Einfluss auf die Fahrzeugkinematik untersucht. In Abbildung 87 sind die Zeitpunkte der stärksten Fahrzeugverdrehung für die verschiedenen WBE dargestellt und die jeweiligen

Neigungswinkel der Ladeflächenseitenwände eingezeichnet. Durch die verringerte Auslenkung des Anchlusselementes durch die steigende WBE, neigt sich das Fahrzeug stärker über das FRS.

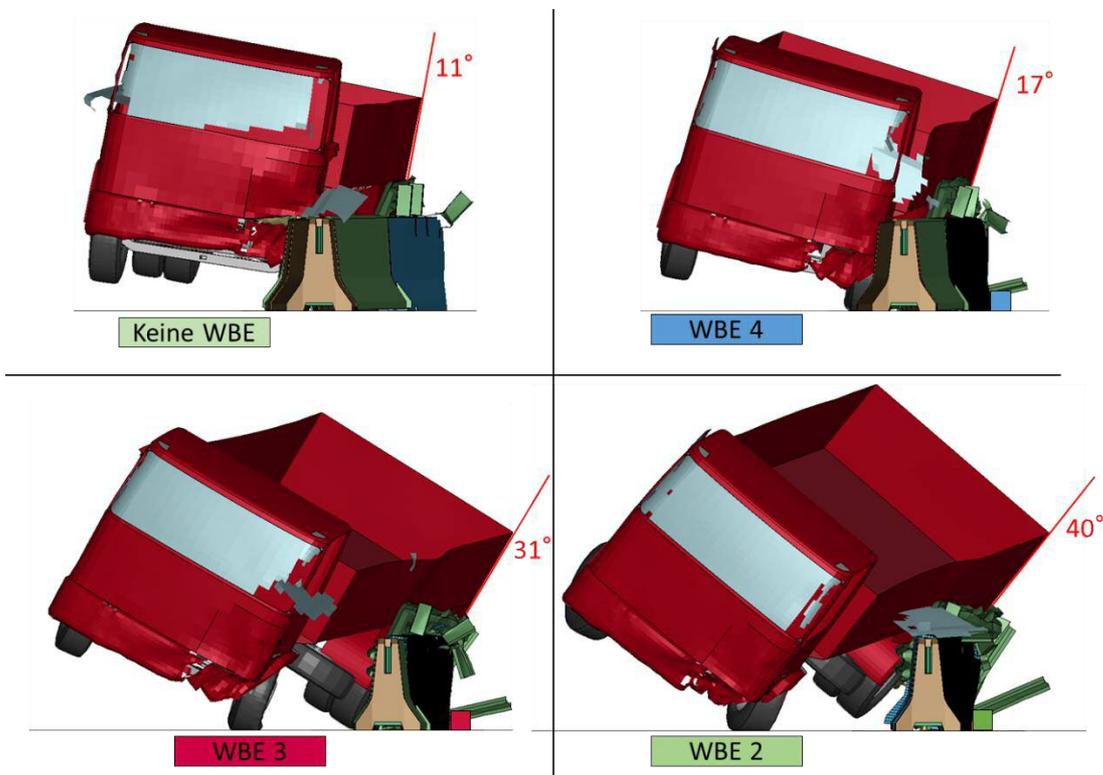


Abbildung 87: Fahrzeugkinematik bei verschiedenen Wirkungsbereichseinschränkungen (WBE)

In Abbildung 88 sind die relativen Abweichungen des Wirkungsbereiches sowie der Neigungen von Anchlusselement und Fahrzeug bezogen auf die Basis-ÜK für jede Wirkungsbereichseinschränkung aufgetragen. Wie zu erwarten, ist ein klarer Abwärtstrend der Wirkungsbereiche bei steigender Einschränkung des möglichen Verschiebeweges des FRS (WBE) zu beobachten. Umgekehrt verhalten sich die Element- und Fahrzeugneigungen und zeigen einen Anstieg bei Erhöhung der WBE.

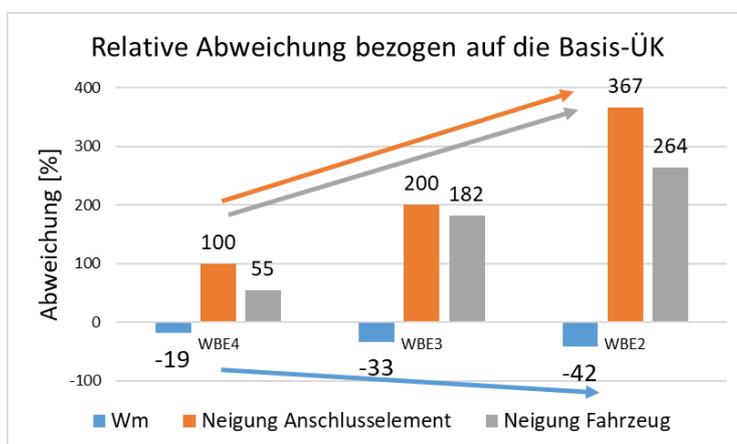


Abbildung 88: Relative Abweichung der Wirkungsbereiche, Element- und Fahrzeugneigung bezogen auf die Basis-ÜK

Ein Abwärtstrend ist ebenso bei den auftretenden Kupplungskräften in Abbildung 89 zu erkennen. Mit steigender Einschränkung der Verschiebefreiheit des FRS werden die Kupplungen durch die verminderte Systemauslenkung entlastet. Die Zugkräfte im vorderen Leitschienenband zeigen einen leichten Aufwärtstrend, hingegen im hinteren Leitschienenband ist kein deutlicher Trend erkennbar. Bei WBE4 und WBE3 sind niedrigere und bei WBE2 sind höhere Werte der Zugkräfte im hinteren Leitschienenband als in der Basis-ÜK zu beobachten.

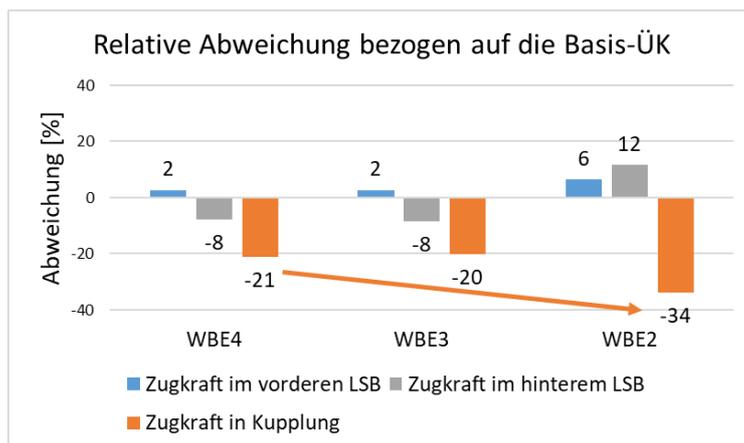


Abbildung 89: Relative Abweichung der Zugkräfte in Kupplungen und Leitschienenband bezogen auf Basis-ÜK

Aus Erfahrungen durch Realversuche der Hersteller ist bekannt, dass stark kippende Elemente zu hohen Kupplungsbelastungen als auch zu einer unerwünschten Kinematik des Fahrzeuges führen können. Die starke Kippbewegung des Anschlusselementes, wie sie in den Simulationen mit WBE auftritt, kann eine Verwindung der Kupplung hervorrufen, wobei diese durch Torsionsbelastung aufgedehnt werden kann. In weiterer Folge ist dadurch ein Versagen des Kupplungsverbundes möglich, in dem der Kupplungsknochen aus der Klaue ausfädelt. Zudem kann das gekippte Element als Rampe wirken und zum Aufsteigen und Überschlagen des Lkw führen.

Die Einschränkung der Verschieblichkeit der Elemente kann zudem hohe Belastungen im Leitschienenband bewirken. Je stärker die Verschieblichkeit des Anschlusselementes begrenzt wird, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Leitschienenband an der Stirnseite des Anschlusselementes geknickt wird und es an dieser Stelle zur Überlastung des Materials kommt. Mit den im gegenständlichen Projekt aufgebauten Simulationsmodellen ist das Abbilden eines derartigen Versagens nicht möglich.

Zusammengefasst kann angemerkt werden, dass bei höheren WBE die Elemente durch die verringerte Verschiebemöglichkeit zu kippen beginnen. In diesem Fall wirkt sich das zwar positiv auf die auftretenden Zugkräfte in den Kupplungen aus, aber es kann auch zu Torsionsbelastungen in den Kupplungen als auch zu einer kritischen Fahrzeugkinematik, wie z.B. Aufsteigen oder Kippen des Lkw, führen.

### 3.5 Maßnahmen und Handlungsempfehlungen

Auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse wurden Handlungsempfehlungen für die Sanierung von Übergangskonstruktionen von einem Stahl FRS auf ein Beton FRS im Bestand erarbeitet.

#### 3.5.1 Anwendungsbereich

Die Handlungsempfehlungen wurden anhand zwei stellvertretender FRS erarbeitet und auf fünf weitere FRS-kombinationen angewandt. Demzufolge wurde die Anwendbarkeit der Handlungsempfehlungen auf diese FRS-paarungen überprüft, bedeutet aber nicht die Anwendbarkeit auf jede beliebige FRS-paarung. Der Anwendungsbereich definiert sich über die Eigenschaften der für die Untersuchung gewählten FRS. Bei der möglichen FRS-kombination sind unter anderem die Wirkungsbereiche der kombinierten FRS zu beachten. Ein simulationsbasierter Nachweis der Funktionsfähigkeit erfolgte ausschließlich für die FRS-kombinationen in Tabelle 21. Die Funktionalität von FRS-kombinationen mit abweichenden Wirkungsbereichen und Aufhaltestufen (AS), sowie anderen Funktionsweisen und abweichenden Geometrien, wurde nicht untersucht.

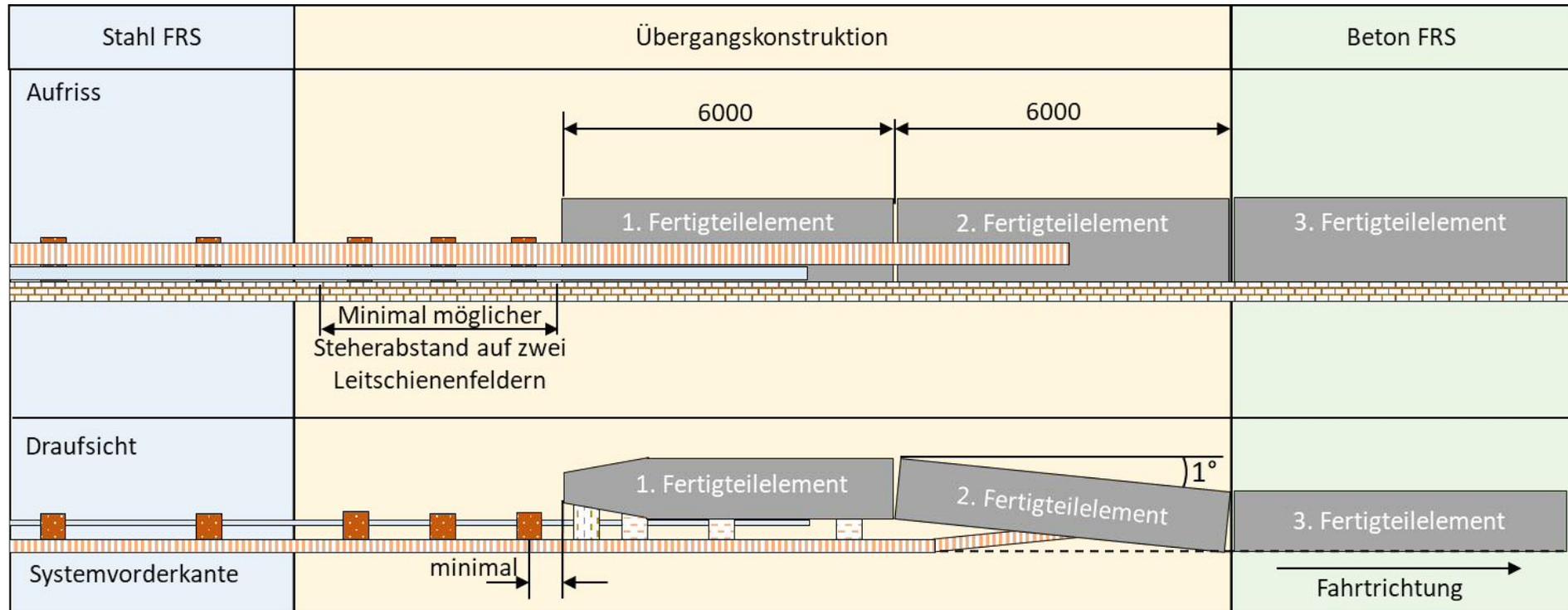
Tabelle 21: FRS-kombinationen mit Nachweis für die Anwendbarkeit der Handlungsempfehlungen

Übergangskonstruktion		Stahl FRS			Beton FRS		
FRS	AS	AS	Wirkungsbereich		AS	Wirkungsbereich	
KB1 RH3 – DB100 6m *	H3	H3	TB11 W2	TB61 W5	H4b	TB11 W2	TB81 W6
KB1 RH3 – DB100 2m							
BL300 – DB100 6m					H3	TB61 W5	
KB1 RH2 – DB100 6m	H2	H2	TB11 W2	TB51 W5	H4b	TB11 W2	TB81 W6
3n24872 – DB100 6m							

\* validiert

Die untersuchte ÜK wurde für den Anschluss eines Beton FRS mit 6 m langen und freistehenden Fertigteilen konzipiert. Über die Simulation dieser ÜK mit Beton FRS mit 2 m und 8 m langen Elementen wurde dessen Anwendbarkeit untersucht. Eventuelle Einflüsse auf die Funktionalität der ÜK bei Einsatz von Fertigteilenelementen mit abweichenden Längen wurden nicht untersucht.

In Abbildung 90 und in Abbildung 91 sind die Standardlösungen für die H2 und H3 ÜK nach der Anwendung der erarbeiteten Handlungsempfehlungen dargestellt. Die verschiedenen Bauteile sind farblich markiert, in der Legende beschriftet und in den folgenden Kapiteln mit dem jeweiligen Buchstaben referenziert.



- A  Leitschienenband
- B  Steher des Leitschienenbandes
- C  Dämpfungselement
- D  Dämpfungselement zusätzlich
- H  Gleitprofil

Abbildung 90: Schema der H2 Übergangskonstruktion unter Anwendung der Handlungsempfehlungen

Ergebnisse

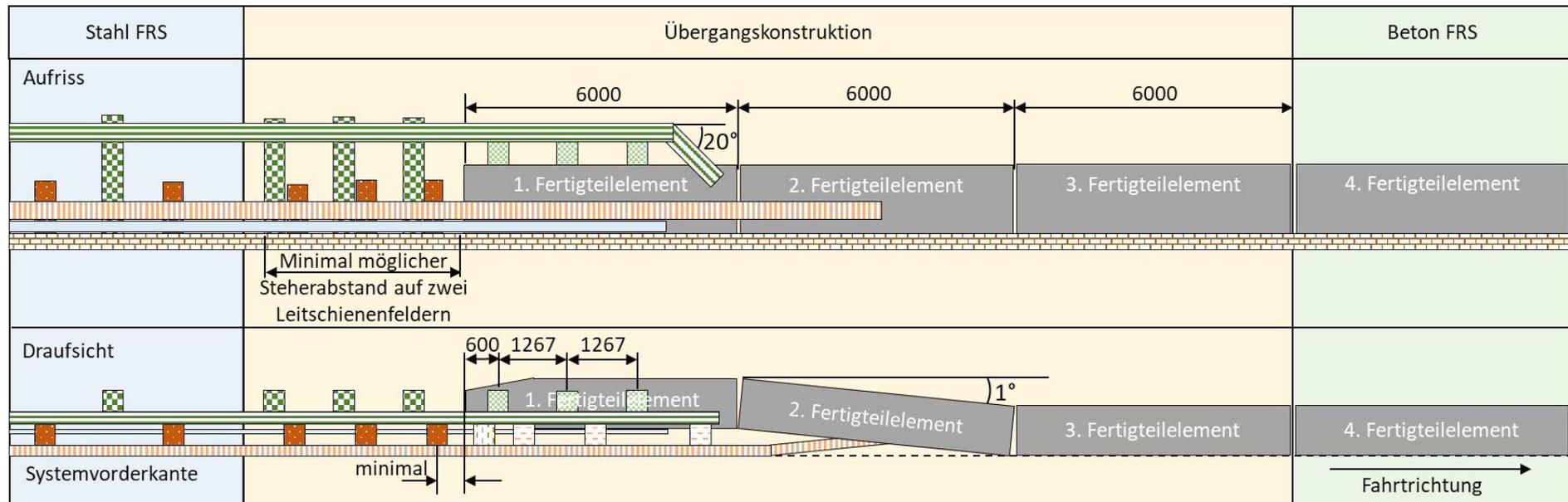


Abbildung 91: Schema der H3 Übergangskonstruktion unter Anwendung der Handlungsempfehlungen

### 3.5.2 Konstruktive Maßnahmen im Stahl FRS

Folgend werden die bei der Sanierung von Bestandsübergängen notwendigen Anpassungen im Stahl FRS beschrieben.

#### Steherverdichtung

Im Stahl FRS ist für jedes Leitschienenband (A und E) auf den letzten beiden Leitschienenfeldern vor dem ersten Fertigteilelement eine Steherverdichtung auf den minimal möglichen Steherabstand vorzunehmen. Hierbei sind die in der Stahlleitschiene bereits vorgegebenen Bohrungen zu verwenden.

#### Letzter Steher vor Fertigteilelement

Der letzte verankerte Steher des vorderen Leitschienenbandes (A) ist, je nach örtlichen Platzverhältnissen, so nahe wie möglich am ersten Fertigteilelement zu platzieren. Dabei ist ein maximaler Abstand, welcher sich aus der Hälfte des minimal möglichen Steherabstandes berechnet, nicht zu überschreiten.

### 3.5.3 Konstruktive Maßnahmen im Beton FRS

Folgend werden die bei der Sanierung von Bestandsübergängen notwendigen Anpassungen im Beton FRS beschrieben.

#### Aufstellung der Fertigteilelemente

Die ersten drei Fertigteile haben eine Länge von 6 m. Das in Fahrtrichtung erste Fertigteilelement verfügt über Abschrägungen im ersten Drittel des Elementfußbereichs und ist parallel zur Fahrtrichtung nach hinten zu versetzen. Die genaue Lage des ersten Fertigteilelementes ergibt sich durch die Schrägstellung des zweiten Fertigteilelementes um  $1^\circ$ , wobei das dritte Fertigteilelement wieder mit der Systemvorderkante fluchtet.

#### Verstärkte Fertigteilelemente

Die Bewehrung und das Zugband des ersten Fertigteils muss so ausgeführt sein, dass eine bewehrungsfreie Verankerungszone für den Anschluss des hinteren Leitschienenbandes (E) und des Gleitprofils (H) entsteht. Die Verankerungszone für das hintere Leitschienenband (E) sollte mindestens die Abmessungen  $3,0 \times 0,4$  m aufweisen. Eine zusätzliche Bewehrung speziell im Kupplungsbereich bei Elementanfang und -ende, die dem erhöhten Krafteintrag gerecht wird, ist ebenso vorzusehen.

Das zweite Fertigteil muss den erhöhten Krafteintrag des ersten Fertigteils aufnehmen können. Die Kupplungsabmessung muss mindestens der des ersten Elements entsprechen. Analog verhält es sich

zur Ausbildung und Lage der konstruktiven Bewehrung. Im dritten Fertigteil kann der Übergang auf das Standardelement erfolgen.

### **Zugverbund**

Die Bewehrung im ersten und zweiten Fertigteil sind so auszuführen, dass der Anschluss des vorderen Leitschienenbandes (A) und des hinteren Leitschienenbandes (E) die in Tabelle 22 angegebenen FRS-abhängigen Zugkräfte übertragen werden können.

Die Kupplungen in den Fugen im Übergangsbereich der jeweiligen ÜK (sprich: die erste Fuge in der ÜK für die Aufhaltstufe H2 und die erste und zweite Fuge in der ÜK für die Aufhaltstufe H3) müssen die in Tabelle 22 aufgelisteten systemabhängigen Zugkräfte übertragen können.

### **3.5.4 Verbindung von Stahl FRS und Beton FRS**

Die Verbindungen zwischen den Stahl- und Betonbauteilen sind bei der Sanierung folgendermaßen zu gestalten.

#### **Vorderes Leitschienenband (A)**

Das vordere Leitschienenband (A) wird mittels vier Dämpfungselementen (C und D) aus dem Stahl FRS mit dem ersten Fertigteillement verbunden. Die Position der drei Dämpfungselemente (C) ergibt sich durch die bereits vorhandenen Bohrungen im Leitschienenband. Ein zusätzliches Dämpfungselement (D) ist im Verjüngungsbereich des ersten Fertigteillements zu positionieren. Die Position ist so zu wählen, dass eine zuverlässige Verankerung im ersten Fertigteillement gewährleistet ist. Die dafür nötigen Bohrungen im Leitschienenband sind bei Bedarf vor Ort herzustellen.

Das vordere Leitschienenband (A) ist nach der Anbindung an das letzte Dämpfungselement (C) in Richtung Fertigteil-Wand zu verziehen und nach dem Übergang vom ersten zum zweiten Fertigteillement im zweiten Fertigteillement zu verankern. Das vordere Leitschienenband (A) ist in der Höhe nicht zu verziehen. Die Position der Verankerung des vorderen Leitschienenbandes (A) ist so zu wählen, dass eine zuverlässige Kraftübertragung vom Leitschienenband zur Bewehrung des zweiten Fertigteillements gewährleistet ist. Empfohlen wird hier ein Randabstand zur nächsten Fuge von mindestens 0,5 m. Die Verankerung des vorderen Leitschienenbandes (A) im zweiten Fertigteillement ist mit einer passenden Anschlussplatte zu realisieren, welche die in Tabelle 22 angegebenen FRS-abhängigen Zugkräfte übertragen kann.

### **Hinteres Leitschienenband (E)**

Drei Aufsatzsteher (G) des hinteren Leitschienenbandes (E) sind im Abstand von 0,6 m von der Stirnseite des ersten Fertigteiltes über U-Profil Bügel an der Krone des ersten Fertigteiltelementes mit einem jeweiligen Steherabstand von 1,267 m zu befestigen. Das hintere Leitschienenband (E) ist anprallseitig an diesen Aufsatzsteher (G) zu befestigen. Ist ein horizontaler Verzug des hinteren Leitschienenbandes (E) nötig, um an die Aufsatzsteher (G) anbinden zu können, ist dieser im Bereich der Stehverdichtung vor dem ersten Fertigteil zu realisieren.

Nach der Anbindung an den letzten Aufsatzsteher (G) ist das hintere Leitschienenband (E) in einem 20° Winkel in Richtung Fertigteil-Wand zu verziehen und vor dem Übergang vom ersten zum zweiten Fertigteiltelement anprallseitig im ersten Fertigteiltelement zu verankern. Die Position der Verankerung ist so zu wählen, dass eine zuverlässige Zugverbindung vom Leitschienenband zur Bewehrung des ersten Fertigteiltelementes gewährleistet wird. Empfohlen wird hier ein Randabstand zur nächsten Fuge von mindestens 0,5 m. Die Verankerung des Leitschienenbandes im Fertigteiltelement ist mit einer passenden Anschlussplatte zu realisieren, welche die in Tabelle 22 angegebenen FRS-abhängigen Zugkräfte übertragen kann.

### **Gleitprofil (H)**

Das Gleitprofil ist ohne vertikalen Verzug an das erste Fertigteiltelement anzulegen und mit ausreichend Abstand zur Elementstirnseite im Elementfuß zu verankern. Ist im Stahl FRS kein Gleitprofil vorhanden, ist ein Gleitprofil über zwei Leitschienenfeldern vor dem ersten Fertigteil anzubringen und wie beschrieben zu befestigen. Der Beginn des ergänzten Gleitprofils ist so zu gestalten, dass sowohl Eindringen des Gleitprofils in ein Fahrzeug beim Anprall möglichst verhindert wird als auch eine ausreichende Endverankerung gegeben ist.

#### **3.5.5 Zu übertragende Zugkräfte**

Um die Zugbandwirkung in der sanierten Übergangskonstruktion gewährleisten zu können, müssen die in den folgenden Tabellen angegebenen Zugkräfte in den Leitschienenbändern und Kupplungen je nach verbautem FRS übertragen werden können. Die Werte in Tabelle 22 gelten für den H2 und Tabelle 23 für den H3 Übergang. Die Werte beruhen auf den Ergebnissen der Simulationen und sind somit nur für die simulierten Systeme gültig.

## Ergebnisse

Tabelle 22: Zu übertragbare Zugkräfte in den Leitschienenbändern und in den Kupplungen für den H2 Übergang

<b>Die Leitschienenbänder im Übergangsbereich sind so zu gestalten, dass die Aufnahme folgender Zugkräfte gewährleistet ist</b>	
VAKF KB1 RH2	Zugkräfte aus Basis-FRS
Fracasso 3n24872	Zugkräfte aus Basis-FRS
<b>Die Kupplungen der ersten drei Fertigteile im Übergangsbereich sind so zu gestalten, dass die Aufnahme folgender Zugkräfte gewährleistet ist</b>	
DELTABLOC DB100 6m	Zugkräfte aus Basis-FRS

Tabelle 23: Zu übertragbare Zugkräfte in den Leitschienenbändern und in den Kupplungen für den H3 Übergang

<b>Die Leitschienenbänder im Übergangsbereich sind so zu gestalten, dass die Aufnahme folgender Zugkräfte gewährleistet ist</b>	
VAKF KB1 RH3	+2% der Zugkräfte gegenüber Basis-FRS
IMEVA BL300	Zugkräfte aus Basis-FRS
<b>Die Kupplungen der ersten drei Fertigteile im Übergangsbereich sind so zu gestalten, dass die Aufnahme folgender Zugkräfte gewährleistet ist</b>	
DELTABLOC DB100 6m	+10% gegenüber Basis-FRS
REBLOC RB100L_8	+21% gegenüber Basis-FRS

## 4 DISKUSSION

In den folgenden Kapiteln wird zum einen die für die Untersuchungen angewendete Methodik und zum anderen die daraus resultierenden Ergebnisse diskutiert.

### 4.1 Abschätzung der Rückhaltewirkung eines FRS mittels FE-Simulation

Die Ergebnisse beruhen auf Finite-Elemente Simulationen, welche für die Untersuchungen von Crash-Lastfällen weitläufige Anwendung finden. In diesem Projekt konnten anhand der Simulationen realistische Ergebnisse produziert und über Parameterstudien neue Erkenntnisse zu verschiedenen Einflüssen erarbeitet werden. Die Ergebnisse sind unter folgenden Gesichtspunkten zu betrachten.

#### 4.1.1 Generelle Einschränkungen von FE-Simulationen

FE-Simulationen unterliegen auf Grund der nötigen Diskretisierung immer Vereinfachungen. So werden z.B. Schraubenverbindungen mittels 1D-Elementen dargestellt oder Geometrien vereinfacht. Ob die Modelle auch trotz dieser Vereinfachungen die Realität abbilden können, wird anhand der Validierung, in denen reale Tests nachgebildet und mit den Ergebnissen der Simulation verglichen werden, bestimmt. Werden validierte FRS modifiziert oder wie im vorliegendem Projekt zusammengeführt und erweitert, kann nicht zu hundert Prozent garantiert werden, dass das Verhalten des FRS der Realität entspricht, aber es kann über die zu Grunde liegende Validierung plausibilisiert werden.

#### 4.1.2 Prognosegüte der Anprallsimulationen

Alle Modelle der Stahl FRS und des Beton FRS von der Firma REBLOC wurden für die Anprallkonfigurationen der jeweiligen Aufhaltstufe validiert. Das Modell des Beton FRS von der Firma DELTABLOC wurde auf die TB81 Anprallprüfung validiert. Die Anprallkonfigurationen TB51 und TB61 wurden mit dem validierten Modell des FRS simuliert. Auch wenn die Gesamtsimulationen für diese Anprallkonfigurationen nicht validiert wurden, basieren sie doch auf einem validierten Modell des FRS. Dadurch konnten die auftretenden Zugkräfte auch für diese Lastfälle ermittelt werden. Ebenso wurde das Beton FRS von der Firma DELTABLOC mit 2 m langen Fertigteilen für die Anprallkonfiguration TB61 simuliert.

In einem iterativen Validierungsprozess und in Zusammenarbeit mit den Experten der Herstellerfirmen, wurden die Modelle der FRS als auch der Fahrzeuge erstellt. Der Einsatz der validierten Modelle in dem Gesamtmodell der ÜK lieferte realistische Ergebnisse für die TB32 und TB61 Anprallkonfiguration. Dadurch konnte die Konstruktion des Überganges optimiert werden und zeigt in

dem darauffolgenden Realversuch positive Ergebnisse. Für die exakte Reproduktion der Systemdeformation und des ASI Wertes, waren Anpassungen in den Fahrzeugmodellen und der Steifigkeit des Untergrundes der Stehverankerung notwendig. Die Adaptierungen in den Fahrzeugmodellen war notwendig, da die Auswahl der zur Verfügung stehenden Fahrzeugmodelle für die FE-Simulation auf wenige Fahrzeuge begrenzt ist. Im vorliegenden Projekt waren die hauptsächlich Einflussparameter die Geometrie der Stoßstange des Pkw und die Steifigkeit der Kabine des Lkw. Unabhängig davon konnte aber bereits im Vorfeld zum realen Test das FRS- sowie Fahrzeugverhalten bei den zwei simulierten Anprallkonfigurationen prognostiziert werden.

Auch die Simulationen der TB51 Anprallkonfigurationen für die ÜK mit Aufhaltestufe H2 lieferten realistische Ergebnisse. Auch wenn kein Vergleich mit realen Testergebnissen durchgeführt wurde, konnte mit Hilfe der Experten das FRS- und Fahrzeugverhalten plausibel abgebildet werden. Einzig der Heckschlag des Busses an das jeweilige FRS wurde in der Simulation schwächer abgebildet, als er bei vergleichbaren realen Tests zu beobachten ist. Es wird vermutet, dass Eigenschaften des Fahrwerkes als auch die Steifigkeiten der Fahrzeugfront darauf Einfluss nehmen. In künftigen Studien ist eine genauere Untersuchung dieses Verhaltens ratsam.

#### **4.1.3 Wahl der Anprallpunkte**

Es wurden drei Anprallpunkte als kritisch angenommen und simuliert. Durch Auswertung von Deformation des FRS und Fahrzeugkinematik konnte der kritischste der drei Anprallpunkte identifiziert werden. Dieser lag bei 4.460 m vor dem Anschlusselement. Die sogenannte Sackbildung war für die Wahl dieses Anprallpunktes ausschlaggebend.

Es wurden reale Tests der Anprallprüfungen TB32 und TB61 mit diesem Anprallpunkt durchgeführt und auch die Einflüsse der konstruktiven Maßnahmen und von weiteren FRS-paarungen untersucht. Somit beruhen die Erkenntnisse aus der Studie und auch die dadurch formulierten Handlungsempfehlungen auf den Ergebnissen eines Fahrzeuganpralles an diesem Anprallpunkt.

Die Untersuchung weiterer Anprallpunkte außerhalb des Bereiches über den sich die drei untersuchten Anprallpunkte erstrecken (also Verschiebung des Anprallpunktes weiter in Richtung der beiden Basis-FRS), bringt keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn. Die Sackbildung war für den identifizierten kritischsten Anprallpunkt maximal. Es wird angenommen, dass bei allen weiteren Anprallpunkten die Sackbildung deutlich geringer ist, da das Fahrzeug entweder vom Stahl FRS oder vom Beton FRS bereits umgelenkt wird.

## 4.2 Einflüsse unterschiedlicher Verbesserungsmaßnahmen

Die Einflüsse der einzelnen konstruktiven Maßnahmen wurden in einer Parameterstudie untersucht. Auf Basis des finalen Modells der Basis-ÜK wurden Varianten erstellt, in welchen jeweils eine der Maßnahmen nicht berücksichtigt wurde. Die Ergebnisse der Varianten wurden anschließend mit den Ergebnissen der Basis-ÜK verglichen. So zeigten sich bei einigen Maßnahmen mehr und bei andern Maßnahmen weniger Verbesserungspotential. Teilweise hatten Maßnahmen entgegengesetzte Auswirkungen auf das Verbesserungspotential bei der TB23 und der TB61 Anprallkonfiguration. Wirkte sich zum Beispiel eine Stehverdichtung bei der TB61 Simulation positiv auf die auftretenden Zugkräfte aus, war bei der TB32 Simulation ein negativer Effekt beim ASI zu beobachten. Durch die Kombination aller Maßnahmen wurden negative Einflüsse einiger Maßnahmen durch positive Effekte anderer Maßnahmen ausgeglichen, somit konnte das volle Potential ausgeschöpft werden.

## 4.3 Anwendbarkeit der Verbesserungsmaßnahmen im Bestand

Ein Ziel bei der Erarbeitung der Handlungsempfehlungen war es, diese produktunabhängig zu gestalten, um möglichst für alle im Bestand befindlichen ÜK eine Verbesserung der Verkehrssicherheit zu erreichen. Durch die Vielzahl der möglichen FRS-kombinationen war jedoch weder eine simulationsbasierende noch eine versuchstechnische Bewertung aller Übergangskonstruktionen im Rahmen dieses Projektes machbar. Dennoch konnte über die Simulation von fünf weiteren Übergangskonstruktionen die Anwendbarkeit der Verbesserungsmaßnahmen für FRS mit vergleichbarer Funktionalität und Geometrie aufgezeigt werden. Schlussendlich wurden sechs Übergangskonstruktionen (inklusive der Basis-ÜK) mit FRS-kombinationen der am häufigsten im Bestand befindlichen FRS von fünf verschiedenen Herstellern simuliert und dessen Funktionsfähigkeit untersucht.

### 4.3.1 Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich der Handlungsempfehlungen beschränkt sich auf die Wirkungsbereiche und Aufhaltestufen Kombination der hier verwendeten Basis-FRS. Die Funktionalität der ÜK mit FRS-kombinationen mit abweichenden Wirkungsbereichen und Aufhaltestufen wurde nicht untersucht.

### 4.3.2 Verwendete Bauteile

Alle Übergangskonstruktionen können großteils mit Standardbauteilen oder mit geringfügigen Anpassungen aufgestellt werden. Beispielsweise mussten für die geprüfte ÜK lediglich die Aufsatzsteher und der Anschluss des oberen Leitschienenbandes extra angefertigt werden.

### **4.3.3 Notwendigkeit eines Gleitprofils**

Es hat sich gezeigt, dass das Anbringen eines Gleitprofils im Stahl FRS die Wahrscheinlichkeit eines stirnseitigen Anpralls eines Pkw an das Anschlusselement deutlich reduziert. Es wird daher empfohlen, bei FRS, welche ohne Gleitprofil aufgestellt sind, unabhängig von der Leitschienenbreite ein Gleitprofil nachzurüsten.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Vielzahl von im Bestand befindlichen FRS verlangt nach möglichst system- und produktunabhängigen Sanierungsmaßnahmen um jede Kombination von unterschiedlichen FRS adressieren zu können. In PREVENT wurden Sanierungsmaßnahmen für ÜK von einem Stahl FRS auf ein Beton FRS erarbeitet und formuliert. Auf Basis der zwei am häufigsten aufgestellten FRS wurde eine Übergangskonstruktion entwickelt und bewertet. In einem Iterationszyklus zwischen Finite-Elemente Simulation und Realversuchen konnte diese analysiert und optimiert werden.

Eine Parameterstudie zu den Einflüssen von Maßnahmen zeigte das Verbesserungspotential dieser auf, wobei das ganze Potential erst in der Kombination aller Maßnahmen ausgeschöpft werden kann. Die Anwendbarkeit der Sanierungsmaßnahmen auf weitere FRS und auch auf FRS anderer Hersteller konnte simulationsbasierend bestätigt werden.

Die erarbeiteten Handlungsempfehlungen sind für die hier untersuchten FRS-Kombinationen anwendbar und greifen, bis auf wenige Ausnahmen, auf Standardbauteile der jeweils angeschlossenen FRS zurück und erlauben somit einen kosten- und zeiteffizienten Sanierungsablauf.

## 6 AUSBLICK

Die Untersuchungen zu verschiedenen Realsituationen wurde über die rein generische Abbildung einer Wirkungsbereichseinschränkung durchgeführt. Im Bestand ist jedoch eine Vielzahl an verschiedenen Realbedingungen anzutreffen. Diese beschränken sich nicht nur auf verbaute Objekte nahe der Rückhaltesysteme, sondern können auch Aufstellsituationen der Systeme selbst betreffen. Einflussanalysen von in Kurven oder an Böschungen aufgestellten Systemen geben Aufschluss über Auswirkungen auf das Anprall- und Systemverhalten. Die durchschnittliche Abkommensgeschwindigkeit von 110 km/h, welche in Realunfalluntersuchungen von Pkw-Abkommensunfällen [11, 12] ermittelt wurde, wird über die in der EN 1317-2 vorgeschriebene Anprallgeschwindigkeit von 100km/h (TB11) gut abgedeckt. Dennoch kann in Kurven ein höherer Anprallwinkel auftreten, als der in der EN 1317-2 vorgeschriebene Anprallwinkel von 20°.

Werden Randbedingungen des Fahrzeuganpralls betrachtet, beschränken sich diese im gegenständlichen Projekt auf die in der EN 1317-2 festgelegten Anprallkonfigurationen. Bei der TB11 Anprallkonfigurationen wird ein Pkw mit der Masse von 900 kg eingesetzt. Das durchschnittliche Leergewicht von neu zugelassenen Pkw in Deutschland steigerte sich von 1.479 kg (2012) auf 1.696 kg (2022) [13]. Europaweit betrachtet beträgt das Mindestgewicht ausgewählter Hersteller<sup>1</sup> seit 2001 stets über 1.000 kg, für das Jahr 2017 sogar über 1.150 kg [14]. Auch Studien zeigen die Unterschiede der Fahrzeugflotte im Straßennetz gegenüber der in der EN 1317-2 verwendeten Fahrzeuge auf und schlagen diesbezüglich Anpassungen vor [15].

Das Segment der elektrisch angetriebenen Pkw zeigt einen aufsteigenden Trend mit um 32,2% mehr Neuzulassungen in 2022 gegenüber 2021 [16]. Etwaige Einflüsse durch die neuartige Bauweise der elektrifizierten Pkw auf die Fahrzeugkinematik bei Anprall an ein Rückhaltesystem sind zu untersuchen. Über den ASI und THIV Wert können verschiedene Rückhaltesysteme untereinander zu vergleichen werden. Rückschlüsse auf tatsächliche Insassenbelastungen sind auf Basis dieser Werte nur schwer möglich. Studien fanden zwar teilweise Korrelationen zwischen dem ASI und Insassenverletzungen [17], aber eine Aussage über Verletzungsmechanismen und wie diese beeinflusst werden können, ist nicht möglich. Auch entwickeln sich Insassenschutzsysteme in den Fahrzeugen weiter, unter dessen Gesichtspunkten auch die Bewertung von Fahrzeugrückhaltesystemen betrachtet werden soll. Dabei bietet sich eine Überarbeitung des ASI und THIV an.

---

<sup>1</sup> Folgende Hersteller wurden in der Studie vom [14] berücksichtigt: Audi, BMW, Citroën, Dacia, Fiat, Ford, Hyundai, Kia, Mercedes-Benz, Nissan, Opel, Peugeot, Renault, Seat, Škoda, Suzuki, Toyota, Vauxhall, Volvo, VW, Mini, Chevrolet

## 7 ACKNOWLEDGEMENT

Besonderen Dank gilt den Firmen REBLOC GmbH, Fracasso Vi GmbH und IMEVA S.p.A für die Bereitstellung von Versuchsdaten ihrer Systeme, welche für die Validierung der Simulationsmodelle verwendet werden durften und für die Unterstützung mit fachlicher Expertise.

Die Autoren möchten sich zudem für die Nutzung der HPC-Ressourcen des ICluster bedanken, die vom ZID der Technischen Universität Graz zur Verfügung gestellt wurden.

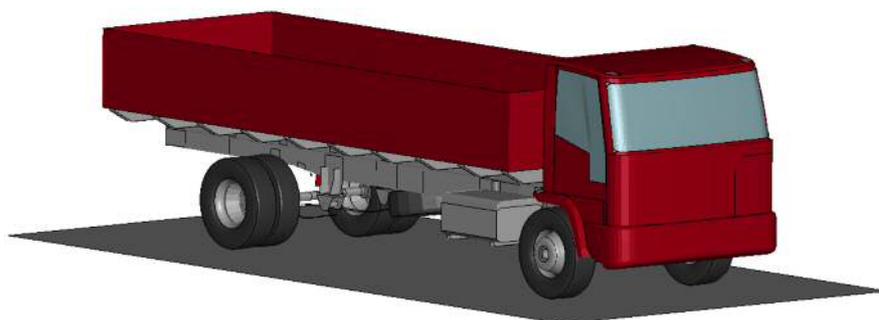
## 8 Referenzen

1. Statistik Austria. "2020. "Straßenverkehrsunfälle Jahresergebnisse 2019, Wien, Österreich.
2. Statistik Austria. "Unfalldatenmanagement (UDM)", [www.statistik.at](http://www.statistik.at) [Accessed 27 January 2023].
3. Comité Européen De Normalisation. "2002. "EN 1317-4: Road restraint systems — Part 4: Road restraint systems Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for terminals and transitions of safety barriers EN 1317-4:2001, **13.200; 93.080.30**.
4. Comité Européen De Normalisation. "2010. "EN 1317-1: Road restraint systems — Part 1: Terminology and general criteria for test methods EN 1317-1:2010-07, **13.200; 93.080.30**.
5. Comité Européen De Normalisation. "2011. "EN 1317-2: Road restraint systems — Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets EN 1317-2:2010-07, **13.200; 93.080.30**.
6. Comité Européen De Normalisation. "2020. "EN 16303:2020; Road restraint systems - Validation and verification process for the use of virtual testing in crash testing against vehicle restraint system EN 16303:2020-08, **13.200; 93.080.30**.
7. Livermore Software Technology Corporation. "2014. "LS-DYNA Keyword User's Manual, Livermore, California.
8. Shih Kwang Tay, Jiing Koon Poon, Roger Chan) Modeling Rebar in Reinforced Concrete for ALE Simulations. In: *14th International LS-Dyna User Conference*.
9. Klasztorny M., Nycz D, Dziewulski P, Gieleta R, Stankiewicz M, Zielonka K. (2019) Numerical Modelling of Post-Ground Subsystem in Road Safety Barrier Crash Tests.
10. NCAC. "Crash Simulation Vehicle Models", <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html> [Accessed 27 June 2013].
11. Tomasch E, Hoschopf H, Sinz W, Strnad B. (2016) Method to Optimise the Position of Rumble Strips on the Hard Shoulder to Avoid Run-off-road Accidents and Unnecessary Noise Pollution. *Transportation Research Procedia*, **14**: pp.3849–3858.
12. Tomasch E, Hoschopf H, Stefan Ch., Stütz R (2016) Requirements of a safety zone width for run-off-road accidents to prevent severe injuries when impacting hazardous objects. *Proceedings of European Road Infrastructure Congress*, 2016, Leeds, UK.
13. Kraftfahrt-Bundesamt. "2023. "Durchschnittliches Leergewicht von neu zugelassenen Personenkraftwagen in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2022",
14. International Council on Clean Transportation Europe. "2021. "European Vehicle Market Statistics: Pocketbook 2021/22, Berlin, Germany.

15. Hernández ZA, Álvarez F, Alonso M, Sañudo L. (2018) Analysis of the test criteria for vehicle containment systems in the Standard EN 1317 regarding the number of vehicles in use. *Transportation Research Procedia*, **33**: pp.315–322.
16. KBA. "2022. "Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen Jahr 2022",
17. Shojaati M (2003) Correlation between injury risk and impact severity index ASI. *Proceedings of 3rd Swiss Transport Research Conference, 2003, Monte Verità / Ascona.*

# Validierungsbericht laut EN16303

Fahrzeugmodell: 16t LKWs  
(EN1317 - TB61)



Datum: 18.10.2022

Verfasser: Kofler Desiree

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1.</b>	<b>ZWECK</b> .....	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>GELTUNGSBEREICH</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>FAHRZEUGMODELL</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>SIMULATIONSUMGEBUNG</b> .....	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>BEGRIFFE / ABKÜRZUNGEN</b> .....	<b>6</b>
<b>4.</b>	<b>DOKUMENTATION</b> .....	<b>6</b>
<b>4.1</b>	<b>ANFORDERUNGEN AN DAS FAHRZEUGMODELL</b> .....	<b>6</b>
4.1.1	<i>Aufbau des FE-Modells</i> .....	6
4.1.2	<i>Parameter des FE-Modells</i> .....	7
4.1.3	<i>Output Definitionen für Simulationsauswertung</i> .....	8
<b>4.2</b>	<b>SIMULATIONSBASIERTER NACHWEIS DER FUNKTIONSWEISE DES MODELLS</b> .....	<b>10</b>
4.2.1	1.1: <i>Statischer Test</i> .....	10
4.2.2	2.1: <i>Fahrwerk: Einfederung</i> .....	12
4.2.3	2.2: <i>Fahrwerk: Ausfederung</i> .....	15
4.2.4	2.3: <i>Lenkung</i> .....	17
4.2.5	3.1: <i>Geradeausfahrt</i> .....	19
4.2.6	3.2: <i>Kurvenfahrt</i> .....	20
4.2.7	3.3: <i>Stufenfahrt</i> .....	23
4.2.8	4.1: <i>Anprall an starre Wand</i> .....	26
<b>4.3</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>28</b>
<b>5.</b>	<b>MITGELTENDE DOKUMENTE</b> .....	<b>28</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: FE-Modell des zweiachsigen LKWs mit 16t Gesamtgewicht.....	5
Abbildung 2: Position des Beschleunigungsaufnehmers und der Positionsmessung im Fahrzeugmodell .....	8
Abbildung 3: Modellierungsmethode zur Messung des Lenkwinkels.....	9
Abbildung 4: Geometrische Beziehung zwischen Einfederweg des Hinterrades und der Radaufhängung .....	9
Abbildung 5: 1.1: Statischer Test – Simulationsaufbau des Test Setups.....	11
Abbildung 6: 1.1: Statischer Test – Zeitlicher Verlauf der Fahrzeugbeschleunigung.....	11
Abbildung 7: 1.1: Statischer Test – Zeitlicher Verlauf der Federwege .....	12
Abbildung 8: 2.1: Fahrwerk: Einfederung – Simulationsaufbau des Test Setups.....	13
Abbildung 9: 2.1: Fahrwerk: Einfederung – Kraft-Weg-Verlauf der linken vorderen Radaufhängung .....	13
Abbildung 10: 2.1: Fahrwerk: Einfederung – Kraft-Weg-Verlauf der rechten vorderen Radaufhängung.....	14
Abbildung 11: 2.1: Fahrwerk: Einfederung – Kraft-Weg-Verlauf der linken hinteren Radaufhängung .....	14
Abbildung 12: 2.1: Fahrwerk: Einfederung – Kraft-Weg-Verlauf der rechten hinteren Radaufhängung .....	14
Abbildung 13: 2.2: Fahrwerk: Ausfederung – Simulationsaufbau des Test Setups.....	15
Abbildung 14: 2.2: Fahrwerk: Ausfederung – Kraft-Weg-Verlauf der linken vorderen Radaufhängung .....	16
Abbildung 15: 2.2: Fahrwerk: Ausfederung – Kraft-Weg-Verlauf der rechten vorderen Radaufhängung.....	16
Abbildung 16: 2.2: Fahrwerk: Ausfederung – Kraft-Weg-Verlauf der linken hinteren Radaufhängung .....	17
Abbildung 17: 2.2: Fahrwerk: Ausfederung – Kraft-Weg-Verlauf der rechten hinteren Radaufhängung .....	17
Abbildung 18: 2.3: Lenkung – Simulationsaufbau des Test Setups.....	18
Abbildung 19: 2.3: Lenkung – Ackermann Prinzip .....	18
Abbildung 20: 3.1: Geradeausfahrt – Simulationsaufbau des Test Setups .....	19
Abbildung 21: 3.1: Geradeausfahrt – Fahrzeugtrajektorie .....	20
Abbildung 22: 3.1: Geradeausfahrt – Zeitlicher Verlauf des Energiegleichgewichts .....	20
Abbildung 23: 3.2: Kurvenfahrt – Simulationsaufbau des Test Setups .....	21
Abbildung 24: 3.2: Kurvenfahrt – Fahrtrajektorie.....	22
Abbildung 25: 3.2: Kurvenfahrt – Lenkwinkel .....	22
Abbildung 26: 3.2: Kurvenfahrt – Zeitlicher Verlauf des Energiegleichgewichts.....	23
Abbildung 27: 3.3: Stufenfahrt – Profil der Stufe laut EN 16303 .....	24
Abbildung 28: 3.3: Stufenfahrt – Simulationsaufbau des Test Setups.....	24
Abbildung 29: 3.3: Stufenfahrt – Federweg der vorderen Radaufhängung.....	25
Abbildung 30: 3.3: Stufenfahrt – Federweg der hinteren Radaufhängung.....	25
Abbildung 31: 3.3: Stufenfahrt – Zeitlicher Verlauf der kinetischen und totalen Energie .....	26
Abbildung 32: 3.3: Stufenfahrt – Zeitlicher Verlauf der kinetischen und totalen Energie .....	26
Abbildung 33: 4.1: Anprall an starre Wand – Simulationsaufbau des Test Setups .....	27
Abbildung 34: 4.1: Anprall an starre Wand – Totale Energie.....	27

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Geforderter Detailierungsgrad und Modellierung im Fahrzeugmodell.....	7
Tabelle 2: Normwerte und Toleranzen für 16t LKW laut EN1317 und dazugehörige Werte des FE-Modells .....	8
Tabelle 3: Verpflichtende Tests laut EN16303 .....	10
Tabelle 4: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse .....	28

## 1. ZWECK

Leitschienensimulationen werden am VSI mittels expliziten Finite-Elemente (FE) Modellen für den Solver LS-Dyna durchgeführt. Diese Gesamtmodelle, bestehend aus den Submodellen „Fahrzeug“ und „Fahrzeugrückhaltesystem“, werden basierend auf Testdaten validiert.

Für das Submodell „Fahrzeug“ stellt die Norm EN 16303 des Technical Committee CEN/TC 226 „Road equipment“ Vorgaben, dessen Erfüllung simulativ nachgewiesen werden muss. Diese Vorgaben beziehen sich auf den Detailgrad des Fahrzeugmodells, den Nachweis einer funktionsfähigen Fahrwerksmodellierung und die numerische Stabilität des Modells. Die Erfüllung dieser Vorgaben sollen eine realistische Kinematik des Fahrzeugs bei Anprallsimulationen nach EN1317 gewährleisten.

In diesem Dokument werden die Anforderungen aufgezeigt und die Anwendung auf ein spezifisches Fahrzeugmodell beschrieben.

## 2. GELTUNGSBEREICH

Die hier beschriebenen Ergebnisse beziehen sich auf ein konkretes Fahrzeugmodell für die Anprallkonfiguration TB61, welches auf einer definierten Simulationsumgebung (Cluster, Solver Version, usw.) simuliert wurde. Bei jeglicher Änderung im Modell oder Umstellung der Simulationsinfrastruktur muss das Validierungsverfahren erneut durchgeführt werden, um weiterhin die Validität des Modells gewährleisten zu können.

### 2.1 Fahrzeugmodell

Im vorliegenden Bericht wird die Validität laut EN16303 des folgenden FE-Modells dargestellt:

- Zweiachsiger Lastkraftwagen mit 16t Gesamtgewicht für die Verwendung bei Simulationen der Anprallkonfiguration TB61, siehe Abbildung 1.

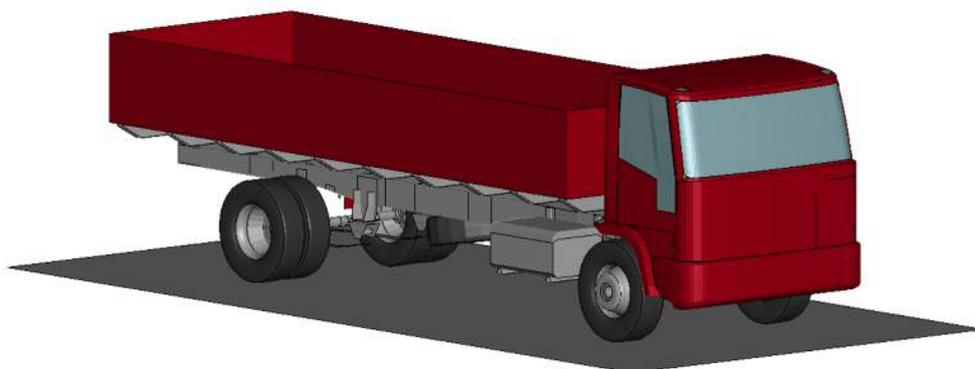


Abbildung 1: FE-Modell des zweiachsigen LKWs mit 16t Gesamtgewicht

## 2.2 Simulationsumgebung

Folgende Infrastruktur wurde für die Simulationen verwendet:

- Cluster: VSI Icluster / 2 Knoten zu je 20 CPU / OpenMPI 183
- Solver: LS-Dyna R9.3.1 / MPP / double precision

## 3. BEGRIFFE / ABKÜRZUNGEN

FE: Finite Elemente

n.a.: nicht anwendbar

n.e.: nicht erforderlich

SPX, SPY, SPZ: Massenschwerpunkt in X, Y und Z

## 4. DOKUMENTATION

Im Kapitel aus 5: *Requirements for numerical vehicle model* der Norm EN 16303:2020 werden die Anforderungen an die FE-Modelle der Fahrzeuge definiert.

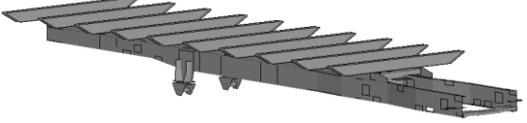
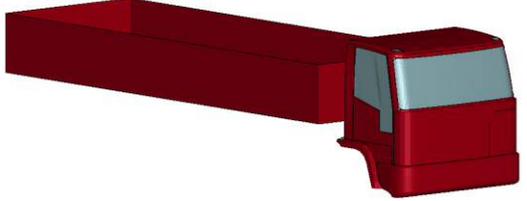
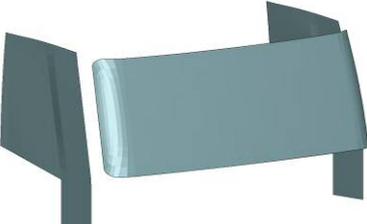
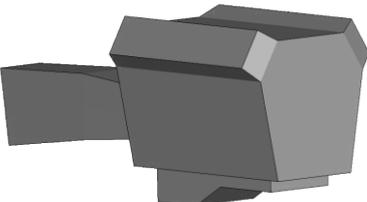
Der Grundaufbau des FE-Modells ist in Kapitel 5.1 *Modelling* vorgegeben und in 5.3 *Test methodology* sind die Definitionen für die durchzuführenden Validierungssimulationen zu finden. Der Inhalt jener Absätze wird hier folgend abgearbeitet.

### 4.1 Anforderungen an das Fahrzeugmodell

#### 4.1.1 Aufbau des FE-Modells

Die EN 16303 gibt den Detaillierungsgrad der Fahrzeugmodelle vor, wobei bestimmte Komponenten definiert sind, welche im Modell vorhanden sein müssen. Tabelle 1 fasst diese zusammen und beschreibt die Umsetzung im hier validierten Fahrzeugmodell.

Tabelle 1: Geforderter Detailierungsgrad und Modellierung im Fahrzeugmodell

Laut Norm geforderte Komponenten	Realisierung im FE-Modell	Darstellung
<b>Rahmen</b>	Mittels Finiten Elementen (SHELL) modelliert und elastisch-plastisches Materialverhalten	
<b>Karosserie</b>	Mittels Finiten Elementen (SHELL) modelliert und elastisch-plastisches Materialverhalten	
<b>Fahrwerk vorne und hinten</b>	Mittels Finiten Elementen (SHELL) modelliert wobei Feder und Dämpfer mittels BEAM Elementen modelliert wurden	
<b>Reifen</b>	Mittels Finiten Elementen (SHELL und SOLID) modelliert und elastisch-plastisches Materialverhalten	
<b>Lenkung</b>	Generische Modellierung mittels kinematischen Gelenken und starren Verbindungen	n.a.
<b>Scheiben</b>	Mittels Finiten Elementen (SHELL) modelliert und elastisch-plastisches Materialverhalten	
<b>Motorblock</b>	Mittels Finiten Elementen (SOLID) modelliert und starres Materialverhalten	
<b>Zuladung</b>	Generische Modellierung mittels zur Karosserie verbundenen Massenpunkten	n.a.

#### 4.1.2 Parameter des FE-Modells

Das Fahrzeugmodell muss in Bezug auf Maße und Massen dem realen Testfahrzeuge laut EN1317-1:2010 entsprechen. Die darin festgelegten Normwerte und dazugehörigen Toleranzen als auch die entsprechenden Maße und Massen des FE-Modells für den 16t LKW sind in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Normwerte und Toleranzen für 16t LKW laut EN1317 und dazugehörige Werte des FE-Modells

	Normwert	Toleranz	FE-Modell	In Toleranz
<b>Masse [kg]</b>				
Gesamtprüfmasse	16 000	±500	15 900	ja
Prüf-Trägheitsmasse	16 000	±500	15 900	ja
Einschließlich Höchstballast	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Dummy auf Fahrersitz	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
<b>Maße [m]</b>				
Radspur (vorne / hinten)	2.00	±15%	2.04 / 1.83	ja / ja
Radradius (unbelastet)	0.52	±15%	0.531	ja
Radabstand (zwischen den äußeren Achsen)	6.70	±15%	5.71	ja
<b>Lage des Massenschwerpunktes [m]</b>				
Längsabstand von der Vorderachse (SPX) ± 10%	3.10	± 10%	3.08	ja
Seitlicher Abstand von der Fahrzeugmittellinie (SPY)	0.00	± 0.10	0.005	ja
Höhe über dem Boden (SPZ):				
Fahrzeugmasse (± 10%)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Last (+15%, -5%)	1.60	(+15%, -5%)	1.759	ja
<b>Fahrzeugart</b>				
Anzahl der Achsen	1 S + 1/2	2-3	1 S + 1	ja

#### 4.1.3 Output Definitionen für Simulationsauswertung

##### Modellierung des Beschleunigungsaufnehmers und der Positionsmessung

Zur Messung der Beschleunigungen und Position des Fahrzeuges wurde ein Output an einem Knoten definiert. Dazu wurde ein starrer Würfel mit der Karosserie verbunden und an einem Knoten des Würfels ein \*DATABASE\_HISTOY\_NODE Output implementiert, siehe Abbildung 2. Über die zusätzliche Implementierung eines \*ELEMENT\_SEATBELT\_ACCELEROMETER können lokale wie globale Koordinaten, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen des Knotens in allen drei Achsen ausgegeben werden. Die Position des Messpunktes wurde gemäß EN 1317 im Fahrzeugschwerpunkt, welcher im Preprocessor Visual-Crash DYNA 15.0 von ESI ermittelt wurde, festgelegt.

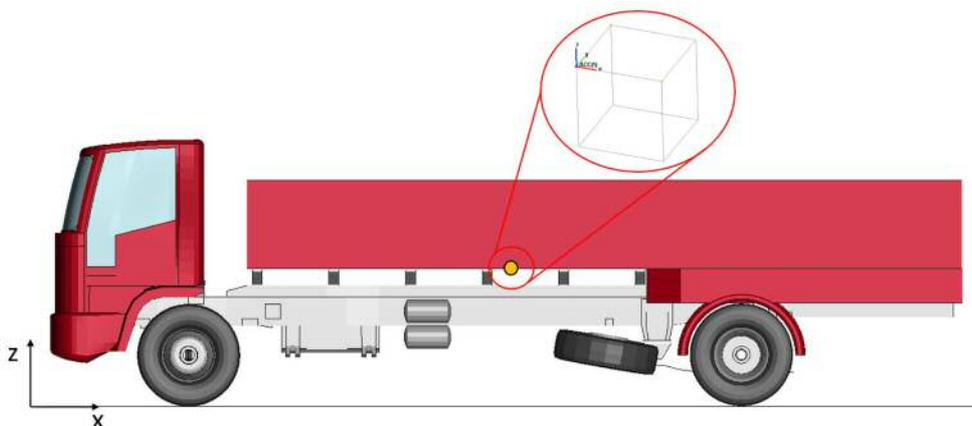


Abbildung 2: Position des Beschleunigungsaufnehmers und der Positionsmessung im Fahrzeugmodell

## Messung von Federkräften und Federwege

Die Federkräfte und Federwege der Radaufhängungen werden über die Implementierung von Outputs über \*DATABASE\_HISTORY\_DISCRETE\_ID an den jeweiligen 1D-Elementen ausgewertet. Somit können Kräfte in Längsrichtung für Zug und Druck als auch die Längenänderung der Federn analysiert werden.

## Messung des Lenkwinkels

In Abbildung 3 ist die Modellierungsmethode zur Lenkwinkelausgabe anhand des rechten Vorderrades dargestellt. Es wird ein Koordinatensystem mit der X-Achse entlang der Lenkachse an beiden gelenkten Rädern definiert. Der Lenkwinkel wird nun durch die Drehung des markierten Knotens am Innenring der Felge um diese Achse bestimmt.

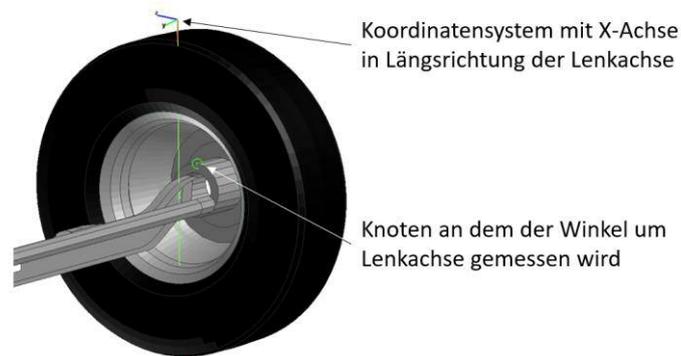


Abbildung 3: Modellierungsmethode zur Messung des Lenkwinkels

## Messung des Einfederweges des Rades

Der Einfederweg des Rades wird über die lokale Verschiebung in Z des Knotens am Innenring der Felge, welcher auch zur Ausgabe des Lenkwinkels herangezogen wird, gemessen. Bei der vorderen Achse stimmen Einfederweg des Rades und der Feder überein, da sich die Feder der Radaufhängung in Achse zur Radnabe befindet, siehe Abbildung 3. An der Hinterachse weicht der Einfederweg des Rades von jenem der Feder aufgrund geometrischer Bedingungen im Modell des 16t HVG ab, siehe Abbildung 4.

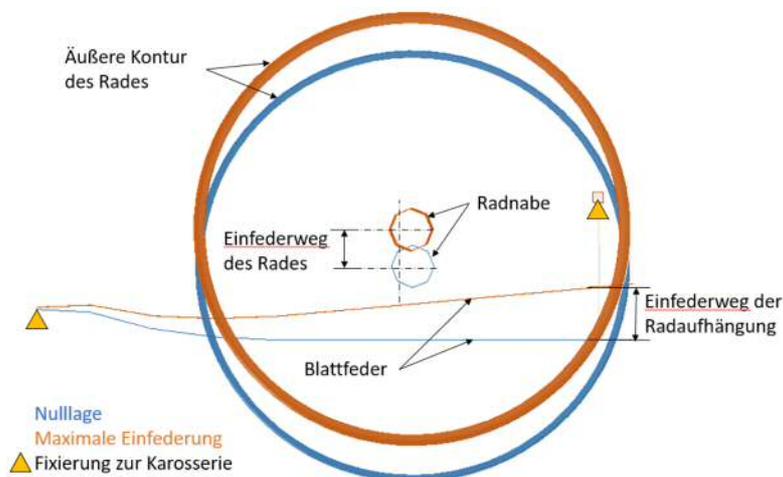


Abbildung 4: Geometrische Beziehung zwischen Einfederweg des Hinterrades und der Radaufhängung

## 4.2 Simulationsbasierter Nachweis der Funktionsweise des Modells

Die EN16303 gibt 8 verpflichtende Tests vor, welche mit dem Fahrzeugmodell simuliert werden müssen, diese sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Verpflichtende Tests laut EN16303

Gruppe	ID	Test	Nachweis
Set 1: Fahrzeug Setup	1.1	Statischer Test	Stabilität des Modells
Set 2: Radaufhängung und Lenkung	2.1	Fahrwerk: Einfederung	Verhalten der Radaufhängung
	2.2	Fahrwerk: Ausfederung	Verhalten der Radaufhängung
	2.3	Lenkung	Ackermann-Prinzip
Set 3: Handhabung des Fahrzeug	3.1	Geradeausfahrt	Stabilität des Modells
	3.2	Kurvenfahrt	Verhalten der Lenkung
	3.3	Stufenfahrt	Verhalten der Radaufhängung
Set 4: Stabilität des Fahrzeuges im Crash	4.1	Anprall an starre Wand	Deformationsverhalten

### 4.2.1 1.1: Statischer Test

#### Vorgaben laut EN 16303

##### Ziel:

- Überprüfung der Stabilität des Fahrzeugmodells und des generellen Setups im stationären Zustand
- Überprüfung der Stabilität über einen Zeitraum wie er auch in Anprallsimulationen simuliert wird

##### Zu liefernde Ergebnisse:

- Zeitlicher Verlauf der Fahrzeugbeschleunigung (mit CFC60 gefiltert)
- Zeitlicher Verlauf des Federwegs

##### Einzuhaltende Toleranzen:

- Maximale Beschleunigungen:  $< \pm 3,0 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$
- Maximaler Federweg:  $\Delta s < |20| \text{ mm}$

##### Randbedingungen:

- Freistehendes Fahrzeug auf Untergrund
- Erdbeschleunigung

#### Simulationsaufbau

Das Fahrzeugmodell wurde auf einem starren Untergrund positioniert und mit Erdbeschleunigung belastet, siehe Abbildung 5. Dieser stationäre Zustand wurde über eine Zeit von zwei Sekunden simuliert. Die Beschleunigung in vertikaler Richtung (z) wurde im implementierten Beschleunigungsaufnehmer gemessen. Der Federweg wurde über die Längenänderung der Feder-Beams in der Vorder- und Hinterachse bestimmt.

Der Reifendruck wird über eine abrupte Füllung des Reifenvolumens zu Simulationsstart erzeugt. Um daraus entstehende Einflüsse auf das Beschleunigungssignal zu vermeiden, wurde das Fahrzeug bis zu einem Zeitpunkt nach der vollständigen Füllung der Reifen (200ms)

festgehalten. Das gemessene Beschleunigungssignal, welche den Einfedervorgang abbilden soll, wird ab diesem Zeitpunkt bewertet.

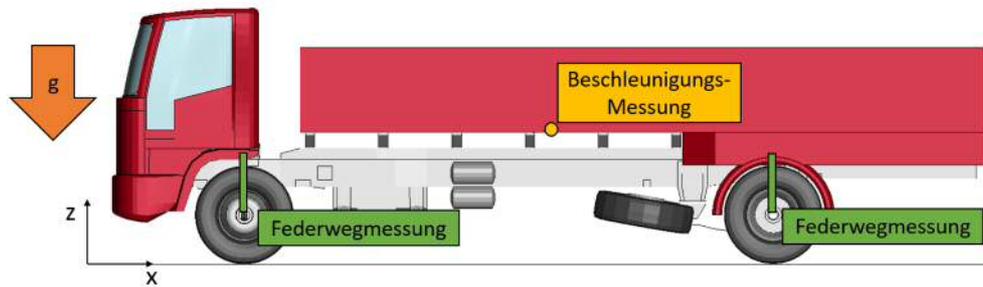


Abbildung 5: 1.1: Statischer Test – Simulationsaufbau des Test Setups

### Simulationsergebnisse

In Abbildung 6 ist der Verlauf des Beschleunigungssignales über die Simulationsdauer aufgetragen. Die Toleranzen laut EN 16303 sind in rot und der Startpunkt des Einfedervorganges in grün markiert. Das Beschleunigungssignal liegt innerhalb der Toleranzen und erfüllt somit die Vorgaben laut EN 16303.

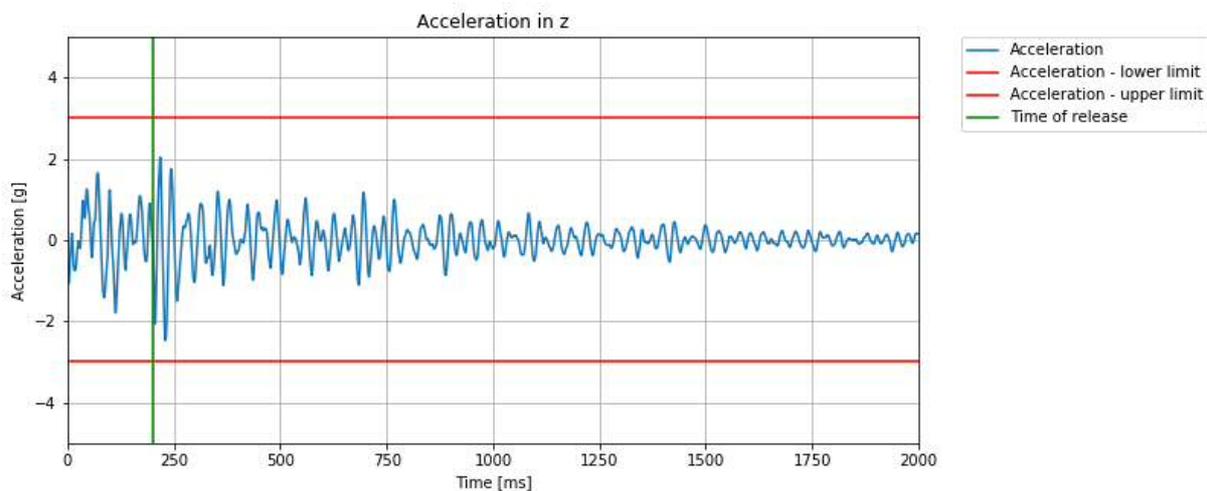


Abbildung 6: 1.1: Statischer Test – Zeitlicher Verlauf der Fahrzeugbeschleunigung

In Abbildung 7 ist der Verlauf des Federweges über die Simulationsdauer für jedes Rad aufgetragen. Die Toleranzen laut EN 16303 sind in Rot und der Startpunkt des Einfedervorganges in Grün markiert. Der Federweg liegt bei allen Rädern innerhalb der Toleranzen und erfüllt somit die Vorgaben laut EN 16303.

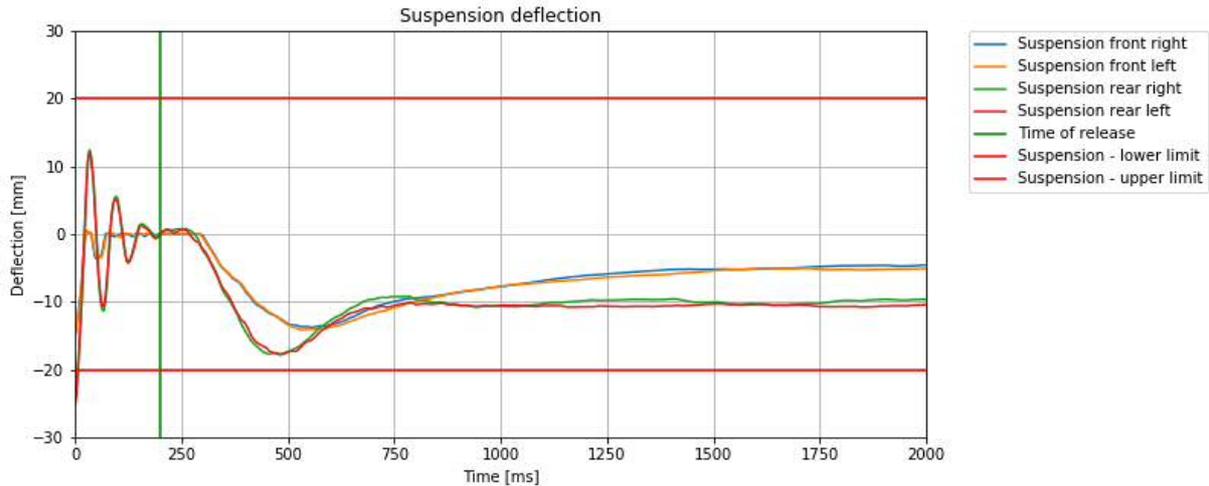


Abbildung 7: 1.1: Statischer Test – Zeitlicher Verlauf der Federwege

#### 4.2.2 2.1: Fahrwerk: Einfederung

##### Vorgaben laut EN 16303

##### Ziel:

- Überprüfung der Federungskinematik und Belastungs- und Entlastungskapazitäten

##### Zu liefernde Ergebnisse:

- Vergleich der vorgegebenen Federkennlinie mit dem Ansprechverhalten der Federn bei Belastung
- Identifikation des maximalen Einfederweges

##### Einzuhaltende Toleranzen:

- Abweichung zwischen vorgegebener und gemessener Federkennlinie:  $\Delta F < |0,05| \cdot F^0$   
wobei  $F^0$  die Federkraft im stationärem Zustand ist

##### Randbedingungen:

- Separate Belastung der einzelnen Radaufhängungen
- Kräfteinleitung in Federachse über eine Dauer von einer Sekunde
- Kräfteinleitung bis zur vollständigen Kompression der Feder
- Räumliche Fixierung der Verbindungspunkte der Feder zur Karosserie
- Keine Erdbeschleunigung

##### Simulationsaufbau

Der Simulationsaufbau ist in Abbildung 8 dargestellt. Die oberen Anbindungspunkte der Federbeine werden im Raum fixiert. Alle Räder werden unabhängig voneinander in z nach oben bewegt. Die Angriffspunkte der Kräfte liegen hierbei auf den jeweiligen Felgen. Die zeitlichen Verläufe der Federbewegungen und der Federkräfte werden aufgezeichnet, siehe Kapitel 4.1.3.

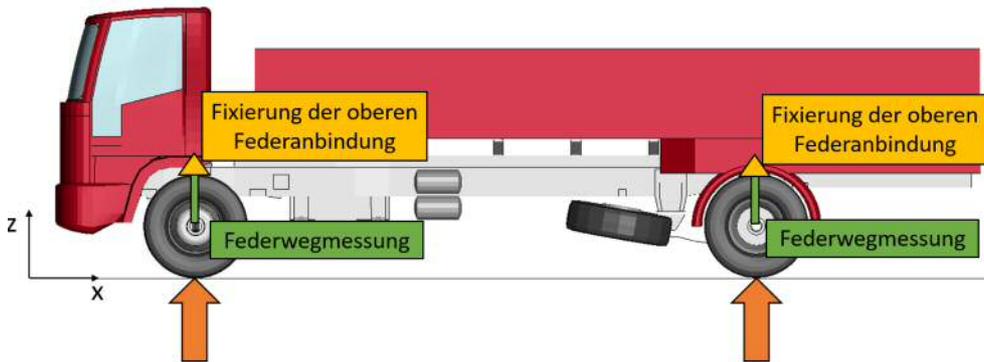


Abbildung 8: 2.1: Fahrwerk: Einfederung – Simulationsaufbau des Test Setups

### Simulationsergebnisse

In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind die Kraft-Weg-Verläufe der linken und rechten vorderen Radaufhängung und in Abbildung 11 und Abbildung 12 jene der linken und rechten hinteren Radaufhängung dargestellt. Die vorgegebene Kraft-Weg-Kurve ist in Gelb und die Toleranzen laut EN 16303 in Rot eingezeichnet. Die zur Berechnung der Toleranz nötigen Federkräfte im stationärem Zustand ( $F^0$ ) wurden im Zuge der Simulation „Statischer Test“ gemessen. Die Kraft-Weg-Verläufe liegen innerhalb der Toleranzen und erfüllen somit die Vorgaben laut EN 16303.

Der maximale Einfederweg der Vorderräder liegt bei 68 mm und jener der Hinterräder bei 91 mm.

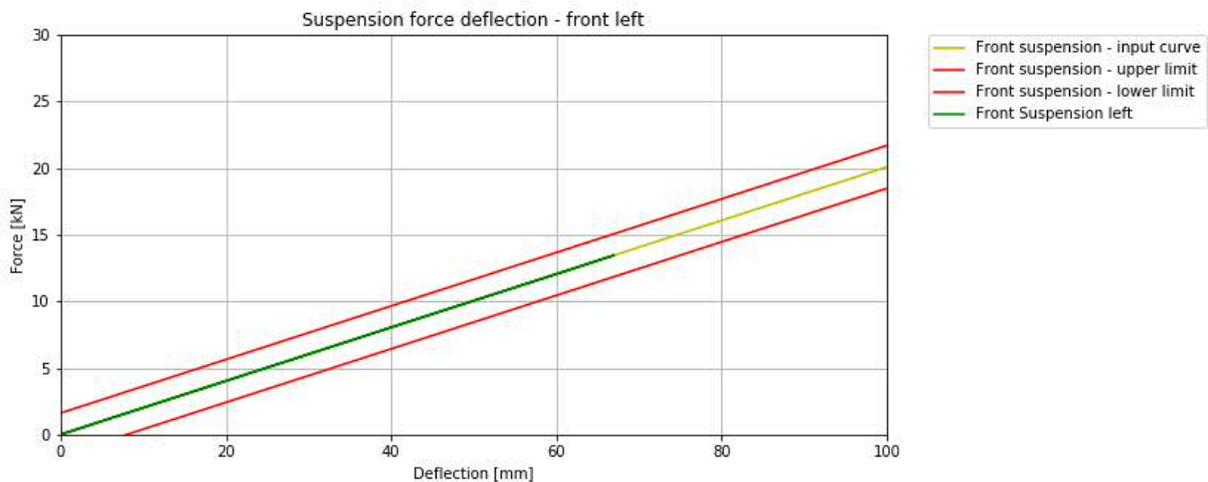


Abbildung 9: 2.1: Fahrwerk: Einfederung – Kraft-Weg-Verlauf der linken vorderen Radaufhängung

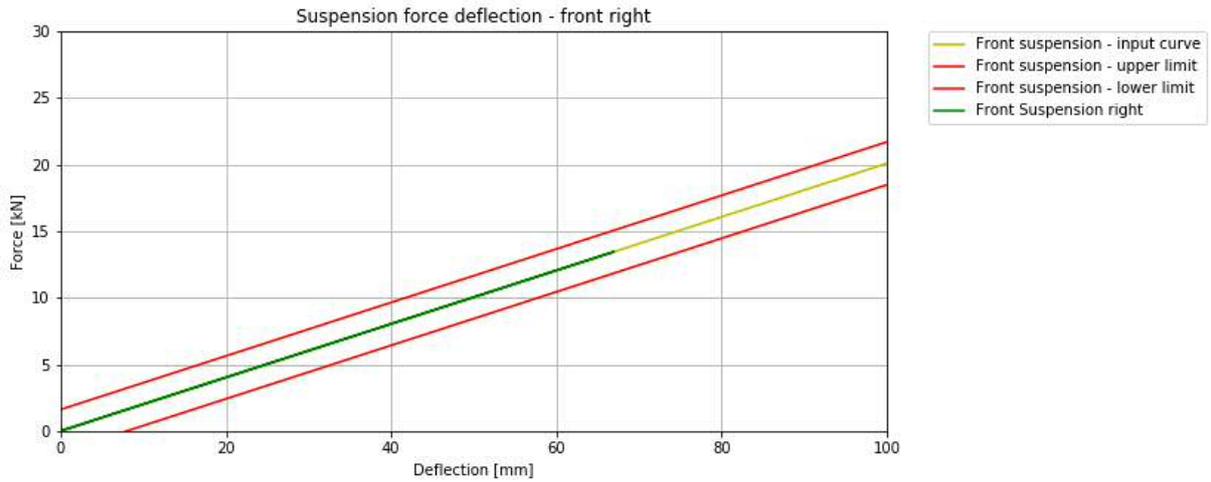


Abbildung 10: 2.1: Fahrwerk: Einfederung – Kraft-Weg-Verlauf der rechten vorderen Radaufhängung

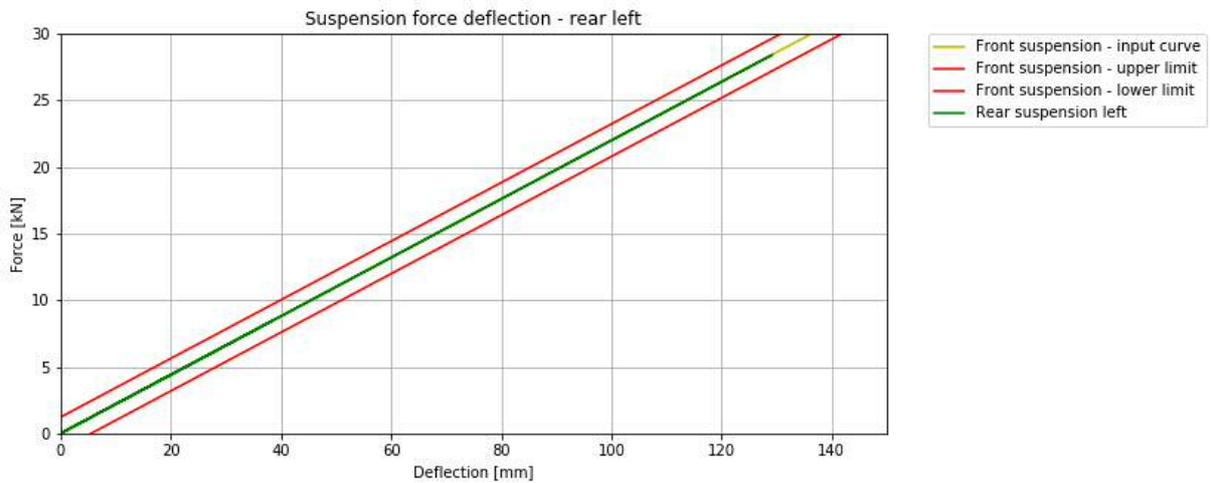


Abbildung 11: 2.1: Fahrwerk: Einfederung – Kraft-Weg-Verlauf der linken hinteren Radaufhängung

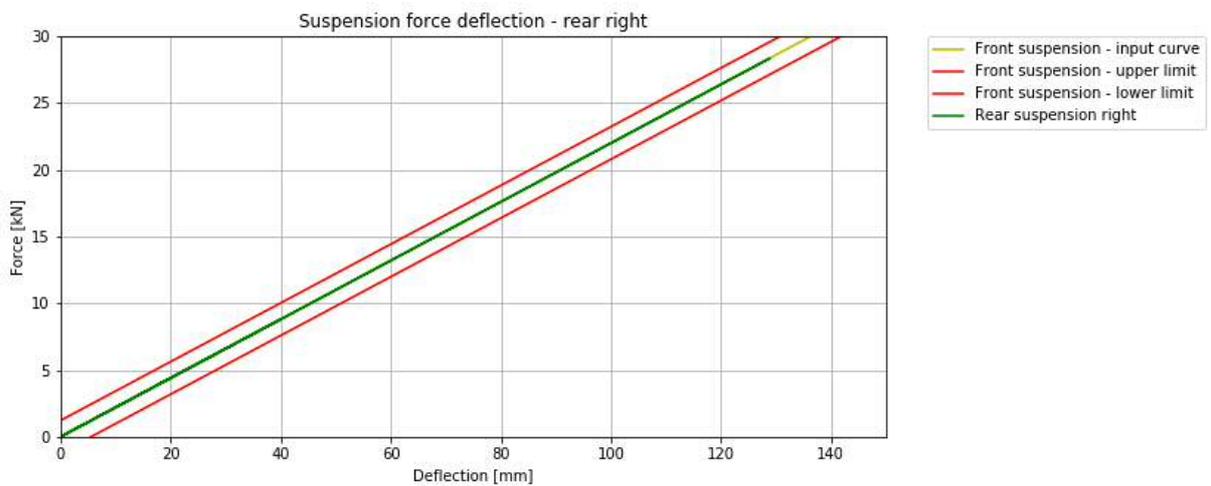


Abbildung 12: 2.1: Fahrwerk: Einfederung – Kraft-Weg-Verlauf der rechten hinteren Radaufhängung

#### 4.2.3 2.2: Fahrwerk: Ausfederung

##### Vorgaben laut EN 16303

###### Ziel:

- Überprüfung der Federungskinematik und Belastungskapazitäten

###### Zu liefernde Ergebnisse:

- Vergleich der vorgegebenen Federkennlinie mit dem Ansprechverhalten der Federn bei Belastung
- Identifikation des maximalen Ausfederweges

###### Einzuhaltende Toleranzen:

- Abweichung zwischen vorgegebener und gemessener Federkennlinie:  $\Delta F < |0,05| \cdot F^0$   
wobei  $F^0$  die Federkraft im stationärem Zustand ist

###### Randbedingungen:

- Separate Belastung der einzelnen Radaufhängungen
- Krafteinleitung in Federachse über eine Dauer von einer Sekunde
- Krafteinleitung bis zur vollständigen Expansion der Feder
- Räumliche Fixierung der Verbindungspunkte der Feder zur Karosserie
- Keine Erdbeschleunigung

##### Simulationsaufbau

Der Simulationsaufbau ist in Abbildung 13 dargestellt. Die oberen Anbindungspunkte der Federbeine werden im Raum fixiert. Alle Räder werden unabhängig voneinander in z nach unten bewegt. Die Angriffspunkte der Kräfte liegen hierbei auf den jeweiligen Felgen. Die zeitlichen Verläufe der Federbewegungen und der Federkräfte werden aufgezeichnet.

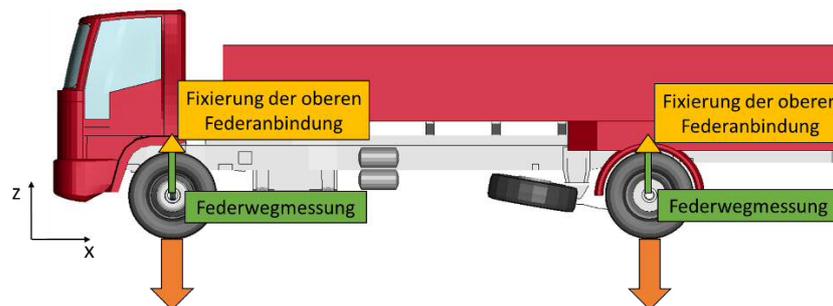


Abbildung 13: 2.2: Fahrwerk: Ausfederung – Simulationsaufbau des Test Setups

##### Simulationsergebnisse

In Abbildung 14 und Abbildung 15 sind die Kraft-Weg-Verläufe der linken und rechten vorderen Radaufhängung und in Abbildung 16 und Abbildung 17 jene der linken und rechten hinteren Radaufhängung dargestellt. Die vorgegebene Kraft-Weg-Kurve ist in Gelb und die Toleranzen laut EN 16303 in Rot eingezeichnet. Die zur Berechnung der Toleranz nötigen Federkräfte im stationärem Zustand ( $F^0$ ) wurden im Zuge der Simulation „Statischer Test“

gemessen. Die Kraft-Weg-Verläufe liegen innerhalb der Toleranzen und erfüllen somit die Vorgaben laut EN 16303.

Der maximale Ausfederweg der Vorderräder liegt bei 16 mm und jener der Hinterräder bei 95 mm.

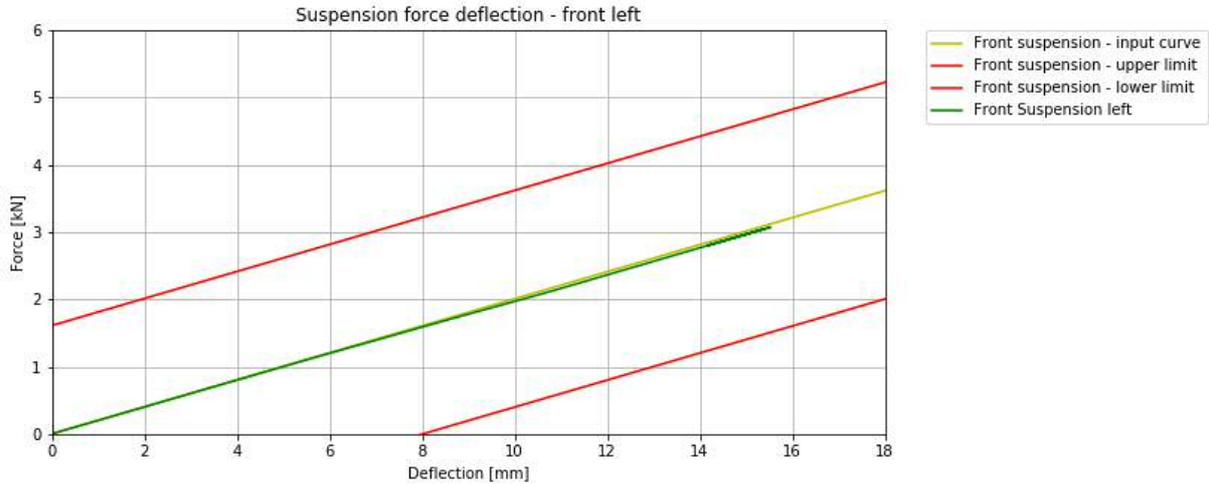


Abbildung 14: 2.2: Fahrwerk: Ausfederung – Kraft-Weg-Verlauf der linken vorderen Radaufhängung

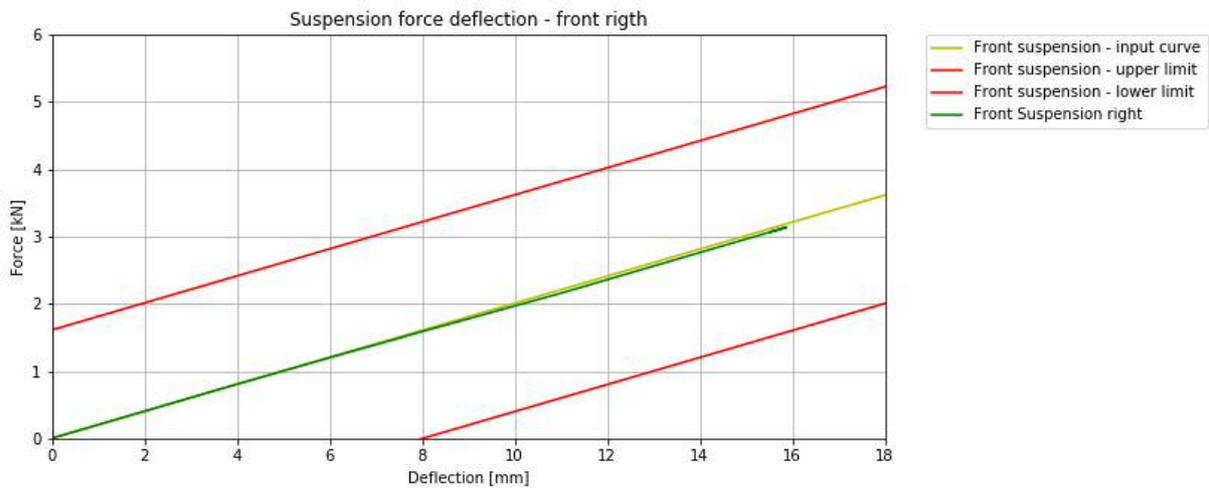


Abbildung 15: 2.2: Fahrwerk: Ausfederung – Kraft-Weg-Verlauf der rechten vorderen Radaufhängung

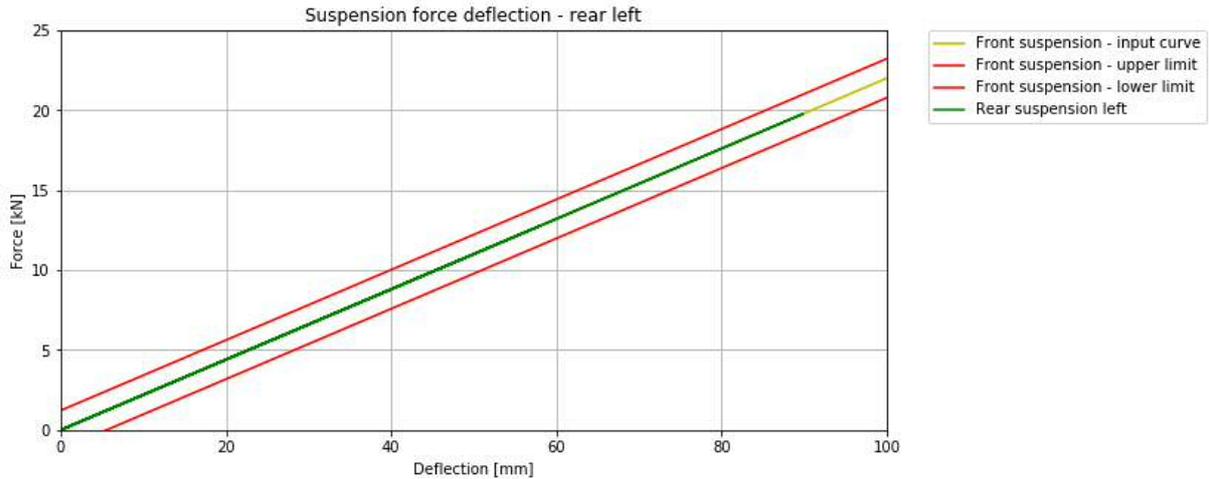


Abbildung 16: 2.2: Fahrwerk: Ausfederung – Kraft-Weg-Verlauf der linken hinteren Radaufhängung

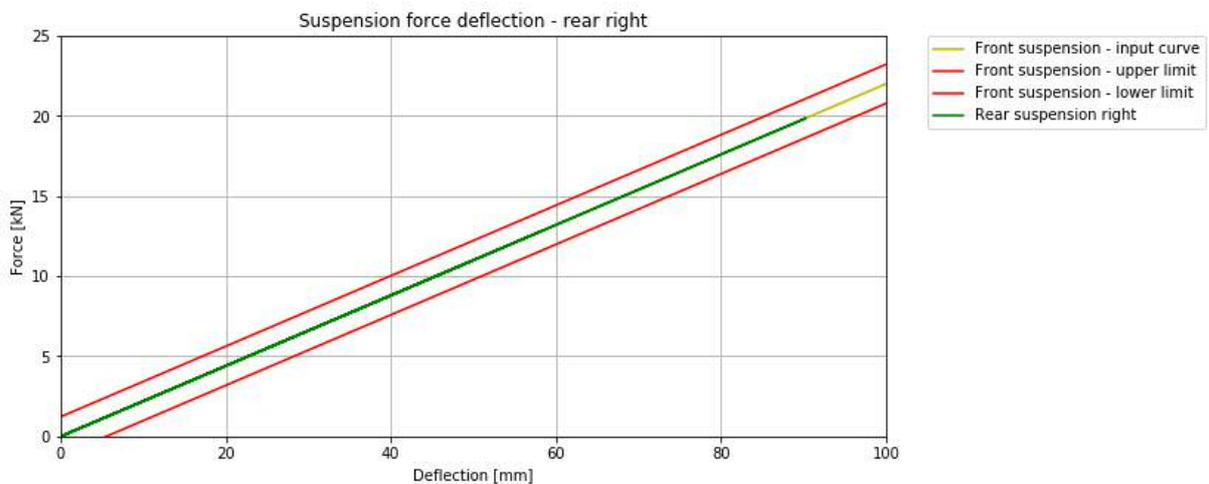


Abbildung 17: 2.2: Fahrwerk: Ausfederung – Kraft-Weg-Verlauf der rechten hinteren Radaufhängung

#### 4.2.4 2.3: Lenkung

##### Vorgaben laut EN 16303

##### Ziel:

- Überprüfung der Lenkinematik

##### Zu liefernde Ergebnisse:

- Vergleich der zeitlichen Lenkwinkel von linkem und rechten Rad
- Identifikation der maximalen Lenkwinkel bei reibungsfreiem Untergrund

##### Einzuhaltende Toleranzen:

- Überprüfung des Ackermann Prinzips

##### Randbedingungen:

- Erdbeschleunigung für stationäre Konditionen auf reibungsfreiem Untergrund
- Rotation eines der Räder über eine Zeit von einer Sekunde
- Aufzeichnung der Lenkwinkel aller gelenkten Räder

## Simulationsaufbau

Der Simulationsaufbau des Lenkungstestes ist in Abbildung 18 dargestellt. Das Fahrzeug wird über 4 Punkte an der Karosserie im Raum fixiert, wobei eine Bewegung in vertikaler Richtung weiterhin möglich bleibt. Das rechte Rad wird über die Vorgabe einer Drehung der Felge um die Lenkachse gedreht. Über den Lenkmechanismus wird das linke Rad dementsprechend mitgedreht. Der tatsächliche Lenkwinkel der beiden Räder wird anhand der Felgendrehung um die Federachse mitgemessen, siehe Kapitel 4.1.3. Die Erdbeschleunigung wirkt auf das Fahrzeug, welches auf einem starren Untergrund ohne Reibung positioniert ist.

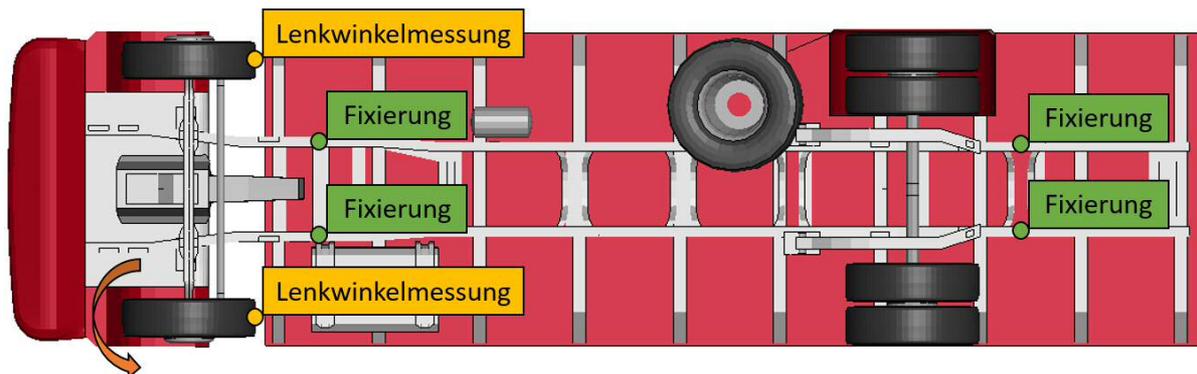


Abbildung 18: 2.3: Lenkung – Simulationsaufbau des Test Setups

## Simulationsergebnisse

Abbildung 19 stellt die Draufsicht auf das Fahrzeug (gelb) und Räder (schwarz) dar. Über die Analyse der Radwinkel wird das Ackermann Prinzip nachgewiesen. Die grüne und blaue Linie stellt die Radachse für das rechte und linke Rad nach Drehung des rechten Rades um  $20^\circ$  dar. Die rote Linie stellt die Achse der Hinterachse dar. Die Verlängerung der Vorderradachsen schneiden sich auf Höhe der geradestehenden Hinterachse, somit ist die Vorgabe laut EN 16303 erfüllt. Der Maximale Lenkwinkel liegt bei  $35,4^\circ$ .

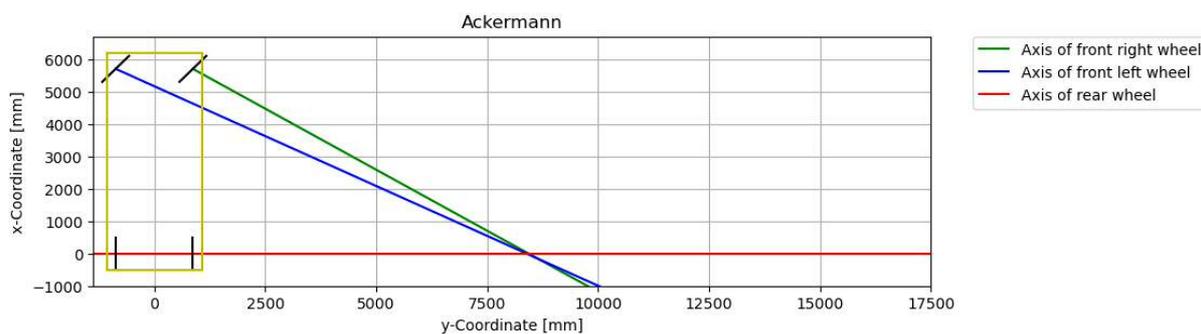


Abbildung 19: 2.3: Lenkung – Ackermann Prinzip

#### 4.2.5 3.1: Geradeausfahrt

##### Vorgaben laut EN 16303

###### Ziel:

- Überprüfung des kinematischen sowie numerisch stabilen Verhaltens des Fahrzeuges (Lenkung und Federung)
- Lineare Fahrt des Fahrzeuges für die Zeit von einer Sekunde

###### Zu liefernde Ergebnisse:

- Fahrtrajektorie
- Zeitlicher Verlauf des Energiegleichgewichts

###### Einzuhaltende Toleranzen:

- Die Fahrtrajektorie muss für eine Sekunde beibehalten werden
- Maximale Abweichung von der linearen Trajektorie mit der Länge  $L_t$ :  $\Delta s_0 = 0,1 * L_t$

###### Randbedingungen:

- Fahrgeschwindigkeit entspricht jener der Testgeschwindigkeit laut EN 1317
- Erdbeschleunigung
- Fahrt auf reibungsbehaftetem Untergrund

##### Simulationsaufbau

Das Fahrzeug wird auf einem starren Untergrund positioniert und mit Gravitationskraft beaufschlagt. Die initiale Geschwindigkeit des Fahrzeuges beträgt, wie bei einer TB61 Anprallkonfiguration, 80 km/h. Die Positionsmessung erfolgt, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, im Fahrzeugschwerpunkt.

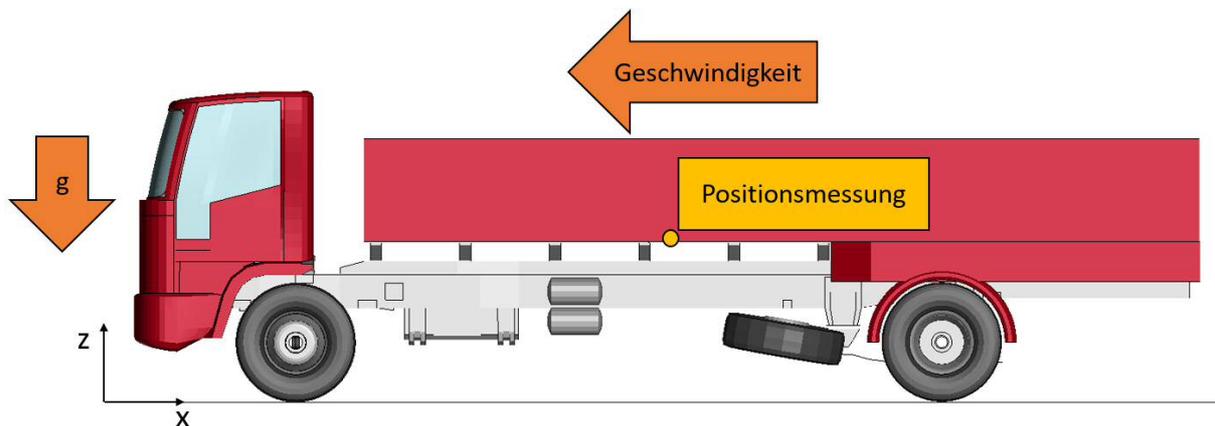


Abbildung 20: 3.1: Geradeausfahrt – Simulationsaufbau des Test Setups

##### Simulationsergebnisse

Abbildung 21 zeigt die Draufsicht auf die Trajektorie des Fahrzeugschwerpunktes (grün). Das obere und untere Limit der maximalen Abweichung ist in Rot eingezeichnet. Die Trajektorie liegt innerhalb der Toleranzen und erfüllt somit die Vorgaben laut EN 16303.

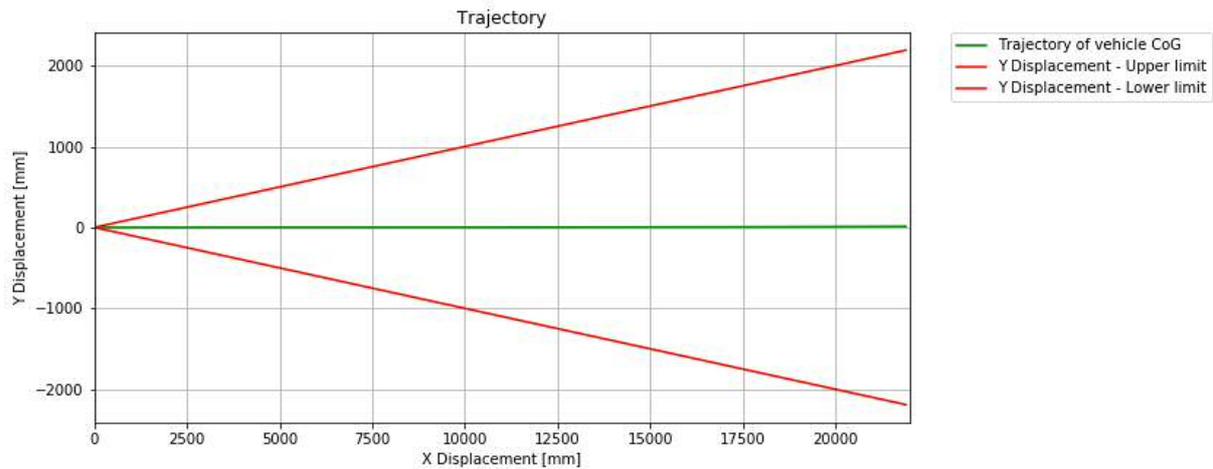


Abbildung 21: 3.1: Geradeausfahrt – Fahrzeugtrajektorie

In der folgenden Abbildung 22 sind die Verläufe für totale, interne und kinetische Energie aufgetragen. Der initiale Anstieg der internen Energie und dadurch auch der totalen Energie ist auf die Füllung der Reifen zurückzuführen, siehe dazu die Erklärung in Kapitel 4.2.1. Über den weiteren Simulationsverlauf steigt die interne Energie durch die Verformung der Reifen beim Rollen an. Der Abfall der kinetischen Energie kann anhand von Reibungsverlusten durch das Rollen der Reifen auf dem reibungsbehafteten Untergrund erklärt werden. Das Niveau der totalen Energie bleibt über die Simulationsdauer konstant.

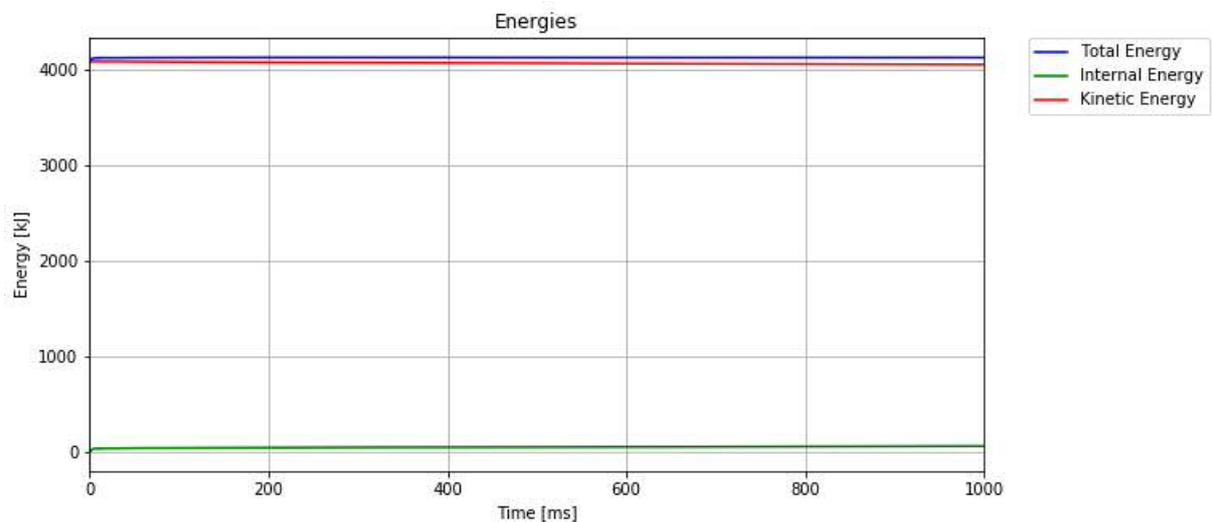


Abbildung 22: 3.1: Geradeausfahrt – Zeitlicher Verlauf des Energiegleichgewichts

#### 4.2.6 3.2: Kurvenfahrt

##### Vorgaben laut EN16303

##### Ziel:

- Überprüfung des kinematischen Verhaltens des Fahrzeuges (Lenkung und Federung) und die Fähigkeit zu lenken über die Rotation eines der Vorderräder. Nach aktiver Lenkung soll der Rückstelleffekt nachgewiesen werden
- Der Trajektorie soll für 1,5 Sekunden gefolgt werden

### Zu liefernde Ergebnisse:

- Fahrtrajektorie
- Zeitlicher Verlauf des Energiegleichgewichts

### Einzuhaltende Toleranzen:

- Nach Erreichen des Lenkwinkels von  $20^\circ$  soll die Kurvenfahrt für eine Sekunde mit weniger als  $\Delta\beta < \pm 5^\circ$  Abweichung erfolgen
- Nach der Lenkung soll das Rückstellmoment zu einer Geradeausfahrt führen

### Randbedingungen:

- Fahrgeschwindigkeit entspricht 30% der Testgeschwindigkeit laut EN 1317
- Lenkung eines Rades bis ein Lenkwinkel von  $20^\circ$  erreicht wird

### **Simulationsaufbau**

Das Fahrzeug wird auf einem starren Untergrund positioniert und mit der Gravitationskraft belastet. Die initiale Geschwindigkeit des Fahrzeugs beträgt 24 km/h und somit 30% jener Geschwindigkeit, wie sie für eine TB61 Anprallkonfiguration vorgegeben ist. Das rechte Rad wird über die Vorgabe einer Drehung der Felge um die Lenkachse gedreht. Über den Lenkmechanismus wird das linke Rad dementsprechend mit gedreht. Der Lenkwinkel der beiden Räder so wie die Position des Fahrzeugschwerpunktes wird wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, gemessen.

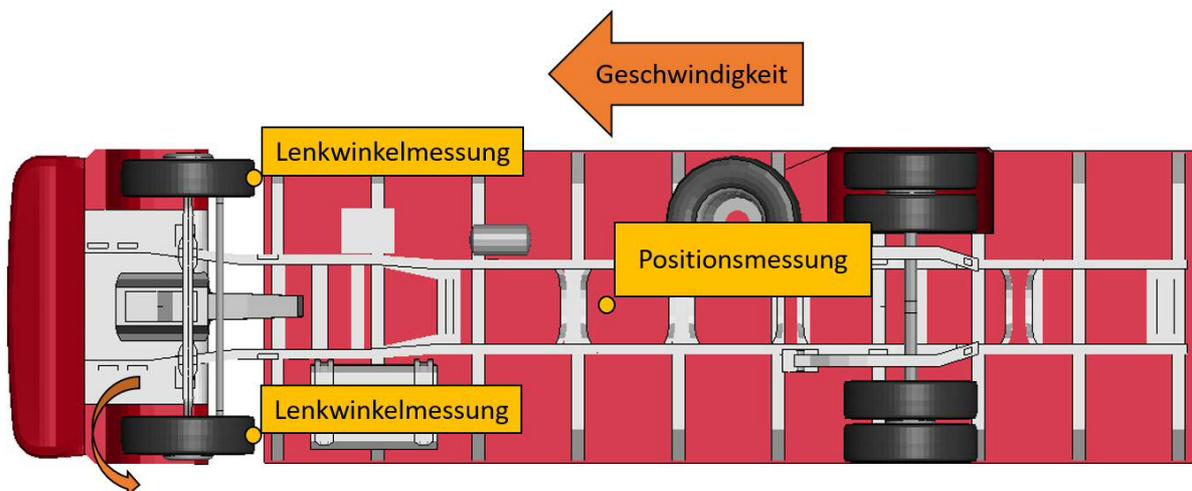


Abbildung 23: 3.2: Kurvenfahrt – Simulationsaufbau des Test Setups

### **Simulationsergebnisse**

Abbildung 24 zeigt die Trajektorie des Fahrzeugschwerpunktes und Abbildung 25 die dazugehörigen Lenkwinkel der Vorderräder.

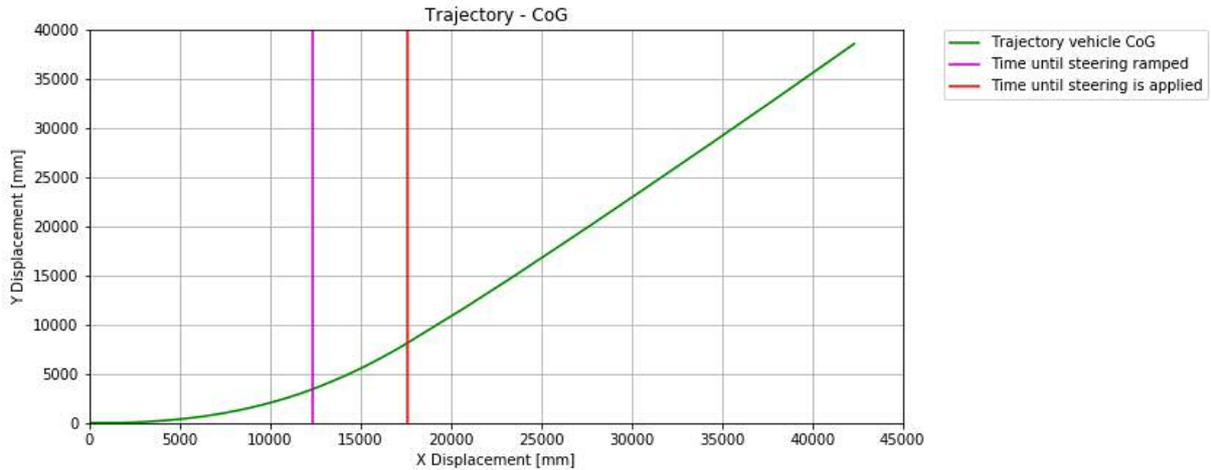


Abbildung 24: 3.2: Kurvenfahrt – Fahrtrajektorie

In den ersten zwei Sekunden wird der Lenkwinkel von 20° erreicht. Anschließend erfolgt eine konstante Kurvenfahrt mit einem Lenkwinkel mit weniger als 5° Abweichung gegenüber den angestrebten 20°. Wird die, auf das linke Rad aktiv aufgebrachte Drehung gelöst, erfolgt eine automatische Rückstellung beider gelenkter Räder und führt zu einer Gradeausfahrt (Lenkwinkel reduziert sich auf 0°). Der stationäre Lenkwinkel von 20° liegt innerhalb der Toleranz von ± 5° und erfüllt somit die Vorgaben laut EN 16303.

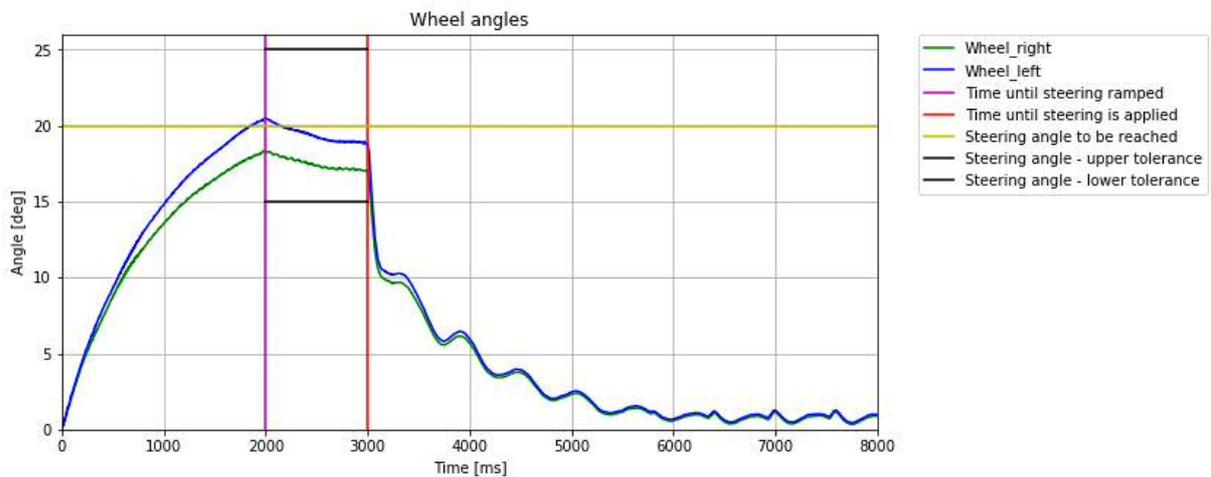


Abbildung 25: 3.2: Kurvenfahrt – Lenkwinkel

In Abbildung 26 sind die zeitlichen Verläufe der totalen, internen und kinetischen Energie dargestellt. Der initiale Anstieg der internen Energie und dadurch auch der totalen Energie ist auf die Füllung der Reifen zurückzuführen, siehe dazu die Erklärung in Kapitel 4.2.1. Über den weiteren Simulationsverlauf steigt die interne Energie durch die Verformung der Reifen beim Rollen an. Der Abfall der kinetischen Energie kann anhand von Reibungsverlusten durch das Rollen der Reifen auf dem reibungsbehafteten Untergrund erklärt werden. Das Niveau der totalen Energie bleibt über die Simulationsdauer konstant.

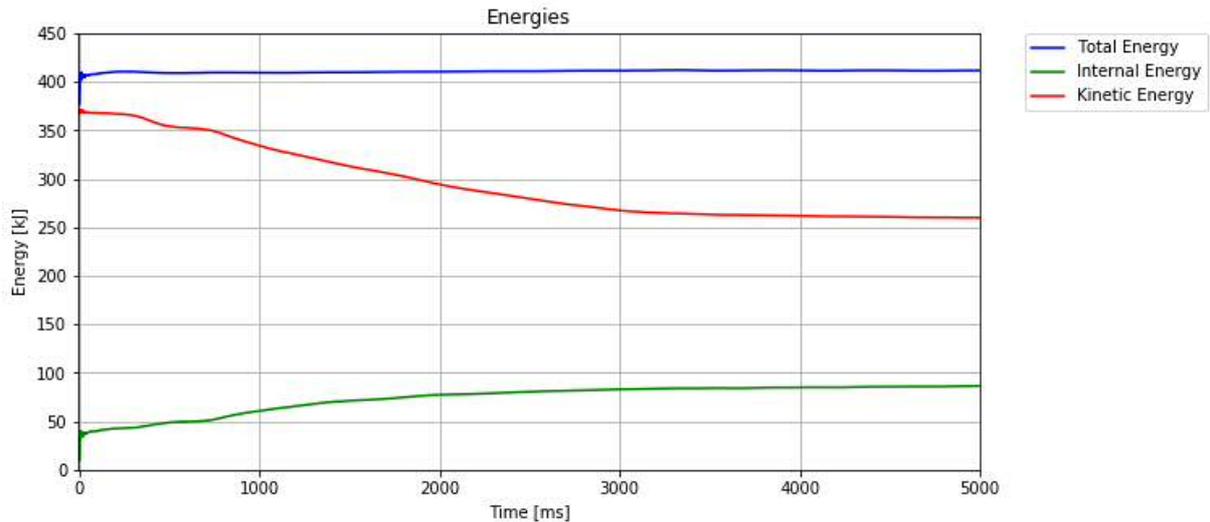


Abbildung 26: 3.2: Kurvenfahrt – - Zeitlicher Verlauf des Energiegleichgewichts

#### 4.2.7 3.3: Stufenfahrt

##### **Vorgaben laut EN 16303**

###### Ziel:

- Überprüfung des dynamischen Verhaltens der Federung und Dämpfung sowie Robustheit des Modells

###### Zu liefernde Ergebnisse:

- Zeitlicher Verlauf des Federwegs
- Zeitlicher Verlauf der kinetischen und totalen Energie

###### Einzuhaltende Toleranzen:

- Zeitlicher Federweg soll innerhalb von zwei vollständigen Schwingungen auf 50% des ersten Maximums gedämpft werden

###### Randbedingungen:

- Überfahren einer Stufe mit 80 mm Höhe
- Fahrgeschwindigkeit mit 25 km/h

##### **Simulationsaufbau**

Die Norm EN 16303 gibt das Stufenprofil vor, welches vom Fahrzeug überfahren werden soll, siehe Abbildung 27.

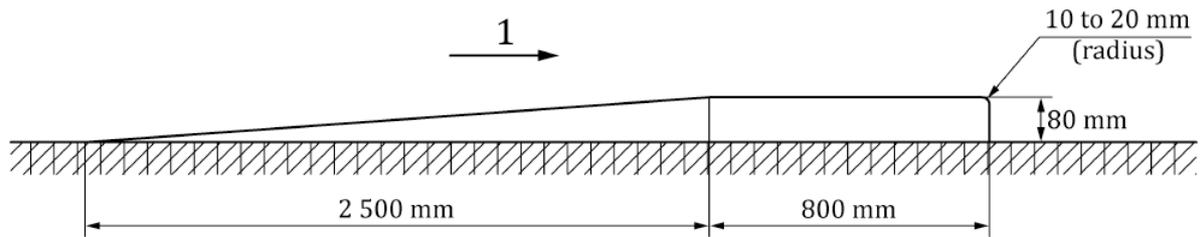


Abbildung 27: 3.3: Stufenfahrt – Profil der Stufe laut EN 16303

Das Stufenprofil wurde modelliert und in das FE-Modell zur Simulation der Stufenfahrt integriert, siehe Abbildung 28. Das Fahrzeug überfährt diese Stufe mit einer Geschwindigkeit von 25 km/h unter Wirken der Gravitationskraft. Dabei werden die Federwege in der vorderen und hinteren Radaufhängung aufgezeichnet.

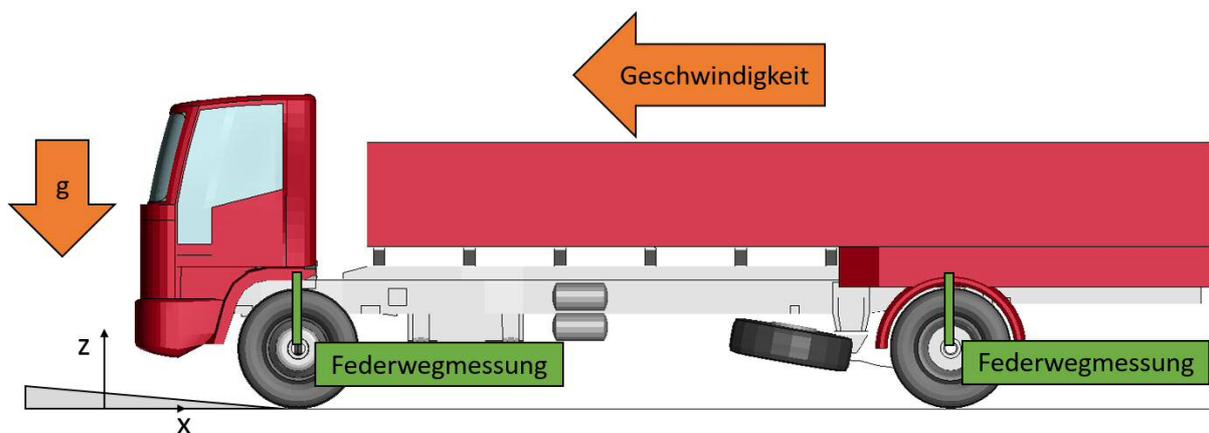


Abbildung 28: 3.3: Stufenfahrt – Simulationsaufbau des Test Setups

Um Einflüsse durch Schwingungen in der jeweiligen anderen Radaufhängung beim Überfahren der Stufenkante zu verhindern, wurden die beiden Szenarien simulativ entkoppelt. Es wurden zwei Simulationen aufgesetzt, wobei in der ersten Simulation die Vorderachse und in der zweiten Simulation die Hinterachse die Stufe überfährt. Dazu wurde der Kontakt zwischen der Stufe und des jeweils nicht betrachteten Rades ausgeschaltet.

### Simulationsergebnisse

Der zeitliche Verlauf des Federweges der vorderen Radaufhängung ist in Abbildung 29 und jener der Hinteren in Abbildung 30 dargestellt. Der Zeitpunkt des Überfahrens der Kante ist mit Gelb und die erste und dritte Schwingung der Federung mit Violett markiert. Die Toleranzen, welche sich über 50% des Maximalwertes der ersten Schwingung berechnen lassen, sind in Rot eingezeichnet. Die Schwingungen der vorderen und hinteren Radaufhängung wurden innerhalb von zwei Schwingungen folgend auf das Maximum auf unter 50% des Wertes der ersten Schwingung gedämpft und erfüllt somit die Vorgaben laut EN 16303.

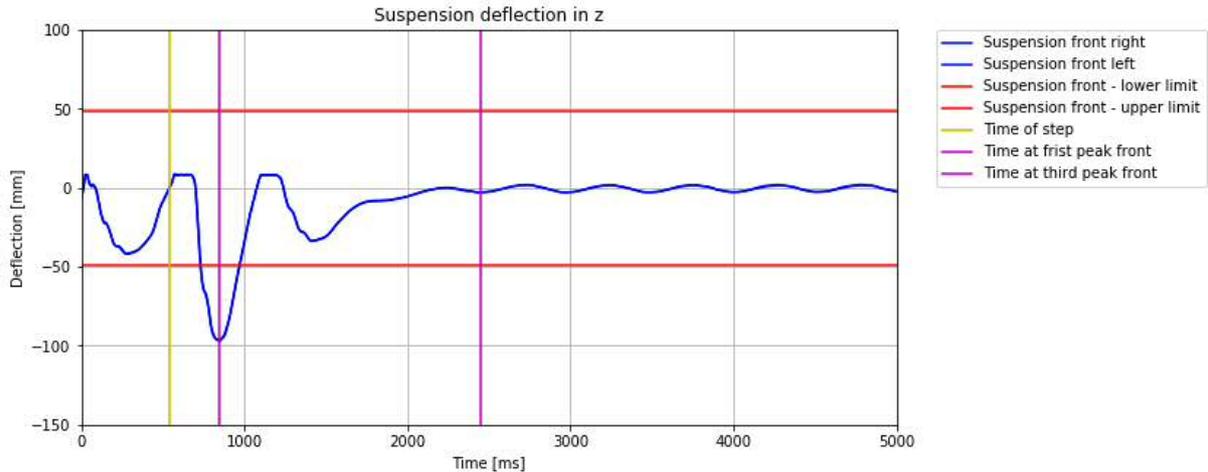


Abbildung 29: 3.3: Stufenfahrt – Federweg der vorderen Radaufhängung

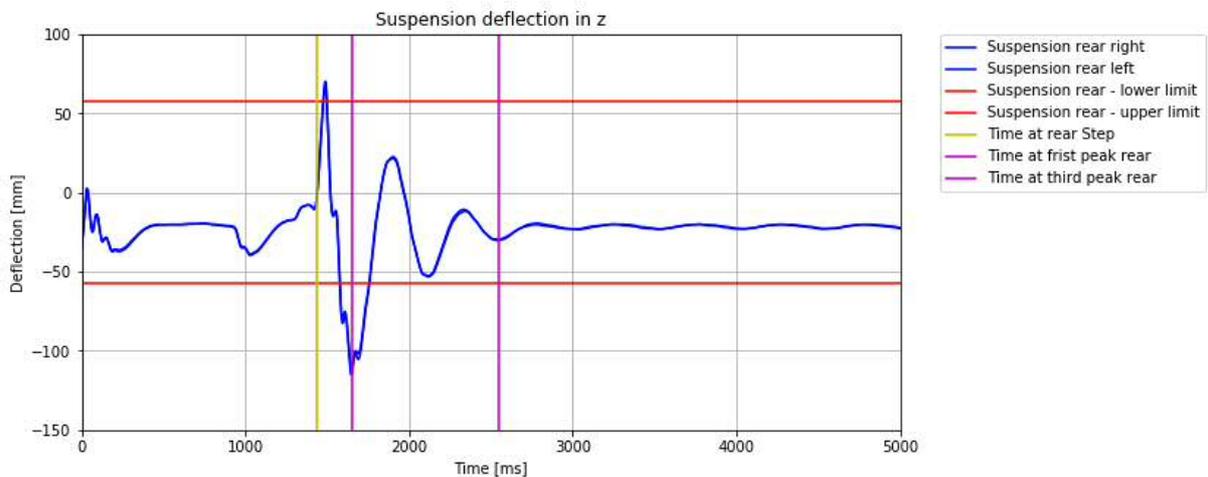


Abbildung 30: 3.3: Stufenfahrt – Federweg der hinteren Radaufhängung

In Abbildung 31 und Abbildung 32 sind die Verläufe für totale und interne Energie für die Simulation der Stufenfahrt für die vordere und hintere Radaufhängung aufgetragen. Der initiale Anstieg der internen Energie und dadurch auch der totalen Energie ist auf die Füllung der Reifen zurückzuführen, siehe dazu die Erklärung in Kapitel 4.2.1. Der erste Anstieg der totalen Energie (markiert in blau) ist auf die erste Einfederung des Fahrwerkes beim Anfahren auf die Rampe und der zweite Anstieg (markiert in grün) auf das Einfedern durch das Aufsetzen am Grund nach dem Überfahren der Stufenkante zurückzuführen. Durch das Einfedern des Fahrwerkes wird kurzzeitig Energie in der Federung gespeichert und beim Ausfedern wieder abgegeben. Der kurze Anstieg der kinetischen Energie (markiert in rot) erfolgt zum Zeitpunkt des freien Falls der Vorderachse, dadurch wird durch die Gravitation das Fahrzeug in vertikaler Richtung beschleunigt.

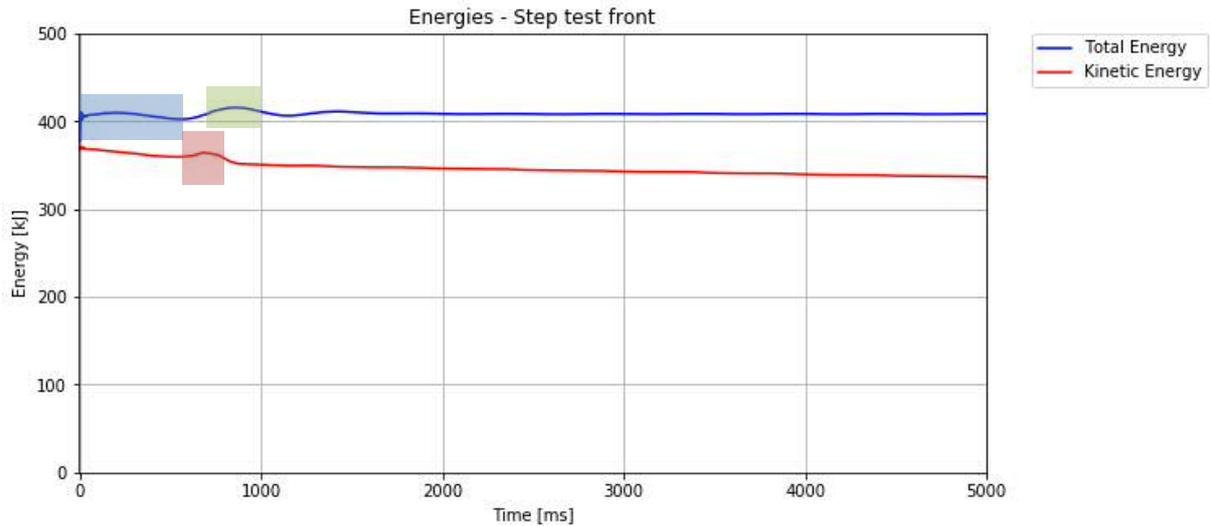


Abbildung 31: 3.3: Stufenfahrt – Zeitlicher Verlauf der kinetischen und totalen Energie

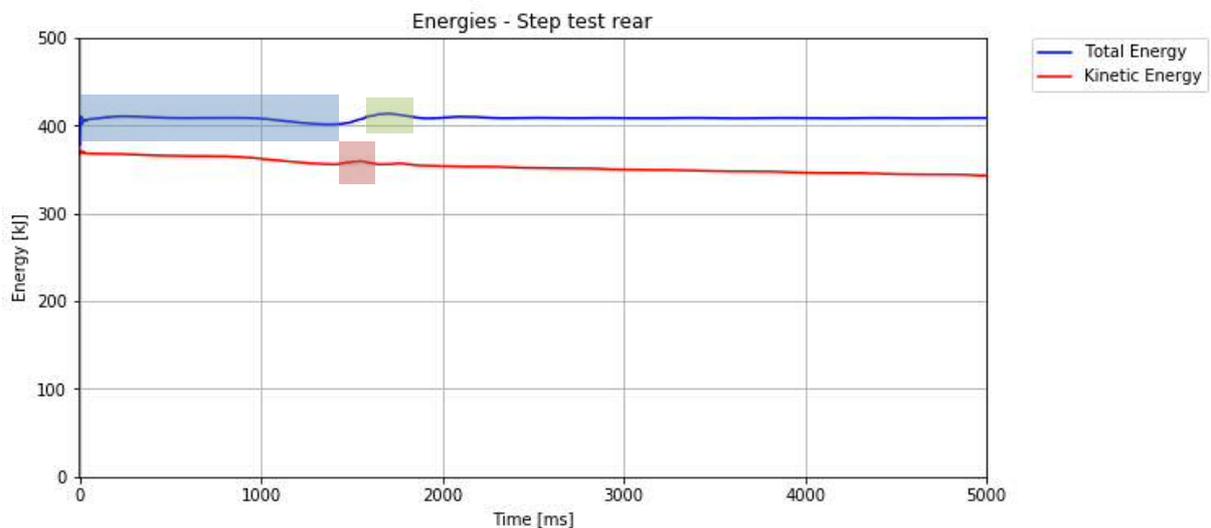


Abbildung 32: 3.3: Stufenfahrt – Zeitlicher Verlauf der kinetischen und totalen Energie

#### 4.2.8 4.1: Anprall an starre Wand

##### **Vorgaben laut EN 16303**

##### Ziel:

- Überprüfung der Stabilität bei starken Deformationen
- Kontrolle der Kontaktdefinitionen

##### Zu liefernde Ergebnisse:

- Kriterien der Anprallheftigkeit gemäß EN 1317 (nur für PKW anwendbar)
- Zeitlicher Verlauf der kinetischen und totalen Energie

##### Einzuhaltende Toleranzen:

- Kriterien der Anprallheftigkeit gemäß EN 1317 (nur für PKW anwendbar)
- Verringerung der totalen Energie < 10%

### Randbedingungen:

- Anprall an starre Wand
- Anprallbedingungen bzgl. Geschwindigkeit und Anprallwinkel wie in real Tests laut EN 1317

### **Simulationsaufbau**

Abbildung 33 zeigt den Simulationsaufbau für den Anprall an die starre Wand. Da dieses Fahrzeug für die Anprallkonfiguration TB61 verwendet wird, wird ein Anprall mit 80 km/h unter einem Winkel von 20° simuliert. Das Fahrzeug wurde auf einem starren Untergrund, bei Wirken einer Gravitationskraft, positioniert.

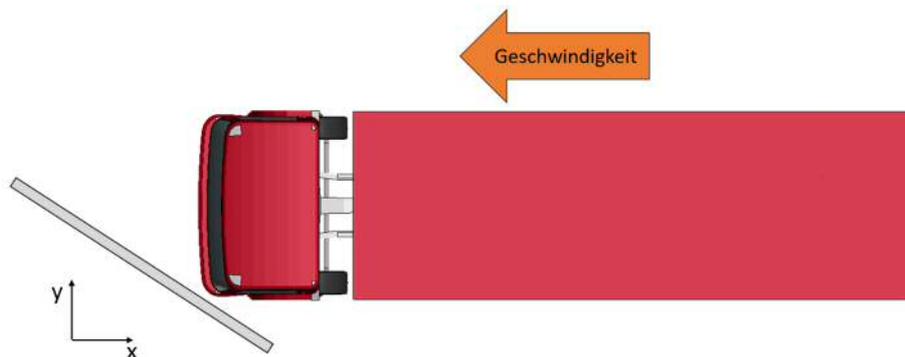


Abbildung 33: 4.1: Anprall an starre Wand – Simulationsaufbau des Test Setups

### **Simulationsergebnisse**

Der zeitliche Verlauf der totalen Energie ist in Abbildung 34 dargestellt. Die Toleranz laut EN 16303 ist mit Rot eingezeichnet, welche eine maximale Reduktion der totalen Energie von 10% repräsentiert. Der Energieverlauf liegt überhalb dieser Toleranz, womit die Vorgaben laut EN 16303 erfüllt sind.

Die Norm EN 1317 sieht keine Analyse der Anprallheftigkeit bei TB61 Anprallkonfiguration vor, weshalb auf die diesbezügliche Vorgabe der EN 16303 nicht eingegangen wird.

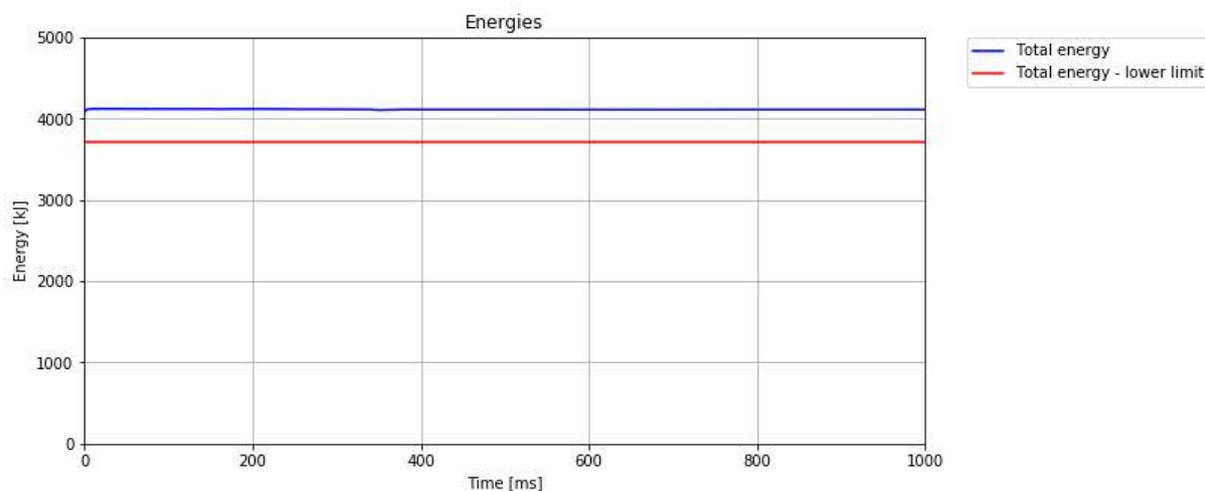


Abbildung 34: 4.1: Anprall an starre Wand – Totale Energie

### 4.3 Zusammenfassung

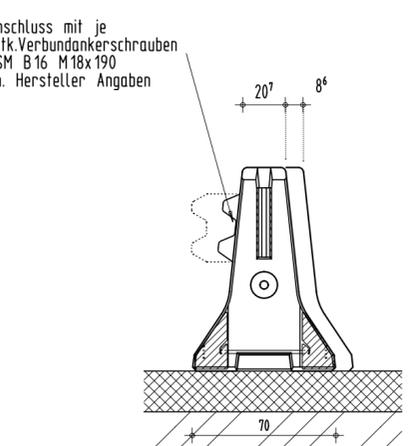
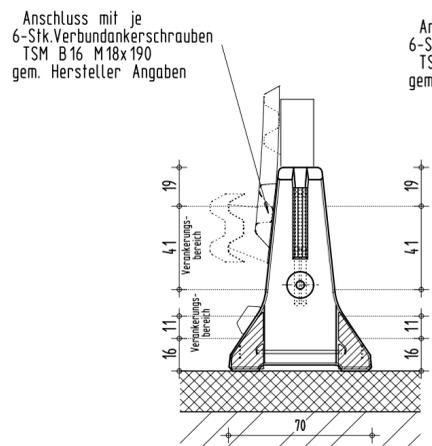
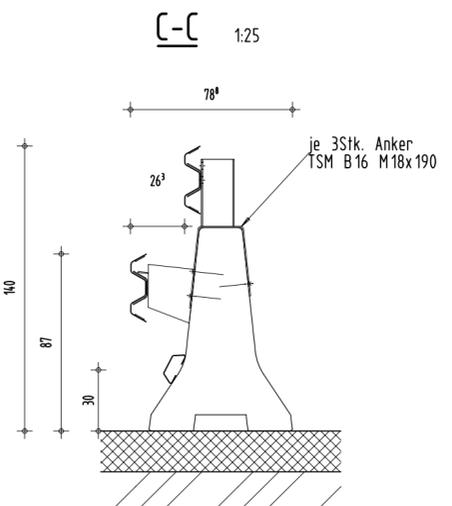
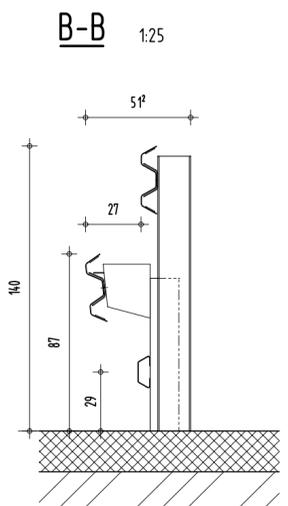
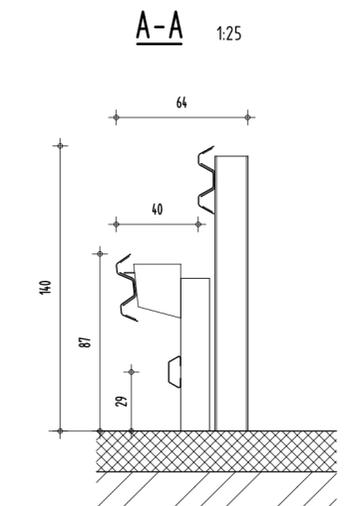
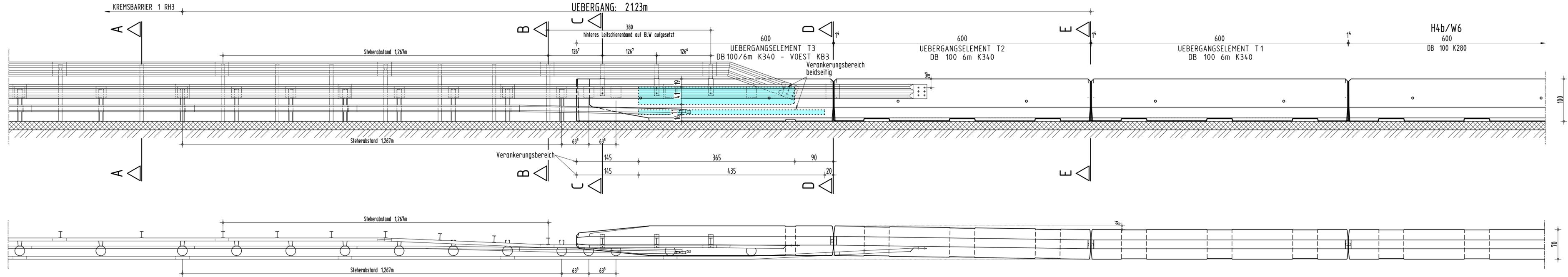
Eine Übersicht der durchgeführten Validierungssimulationen mit den jeweils einzuhaltenden Toleranzen ist in Tabelle 4 zusammengefasst. Alle Tests wurden simuliert und erfüllen die Vorgaben der EN 16303, wodurch das Fahrzeugmodell des 16t LKWs für den angeführten Geltungsbereich (Kapitel 2) als valide angesehen wird.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

ID	Test	Einzuhaltende Toleranzen	Erfüllt
1.1	Statischer Test	Maximale Beschleunigungen: $< \pm 3,0 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$	Ja
		Maximaler Federweg: $\Delta s <  20  \text{ mm}$	Ja
2.1	Fahrwerk: Einfederung	Abweichung zwischen vorgegebener und gemessener Federkennlinie: $\Delta F <  0,05  \cdot F_0$ wobei $F_0$ die Federkraft im stationärem Zustand ist	Ja
2.2	Fahrwerk: Ausfederung	Abweichung zwischen vorgegebener und gemessener Federkennlinie: $\Delta F <  0,05  \cdot F_0$ wobei $F_0$ die Federkraft im stationärem Zustand ist	Ja
2.3	Lenkung	Nachweis des Ackermann Prinzips	Ja
3.1	Geradeausfahrt	Die Fahrtrajektorie muss für eine Sekunde beibehalten werden	Ja
		Maximale Abweichung von der linearen Trajektorie mit der Länge $L_t$ : $\Delta s_0 = 0,1 \cdot L_t$	Ja
3.2	Kurvenfahrt	Nach Erreichen des Lenkwinkels von $20^\circ$ soll die Kurvenfahrt für eine Sekunde mit weniger als $\Delta \beta < \pm 5^\circ$ Abweichung erfolgen	Ja
		Nach der Lenkung soll das Rückstellmoment zu einer Geradeausfahrt führen	Ja
3.3	Stufenfahrt	Zeitlicher Federweg soll innerhalb von zwei Schwingungen auf 50% des ersten Maximums gedämpft werden	Ja
4.1	Anprall an starre Wand	Kriterien der Anprallheftigkeit	n.a.
		Verringerung der totalen Energie $< 10\%$	Ja

## 5. MITGELTENDE DOKUMENTE

- Europäische Norm EN 16303:2020-10-01
- Europäische Norm EN 1317:2010



MONTAGEZUBEHOER WANDANFANG-/ENDE SAFELINK KB1 RH3 - DB 100/6M:

- 2x DB 100/6M K340 (T1 & T2)
- 1x DB 100/6M K340 AUF VOEST KB3 (T3)
- 2x KUPPLUNGSELEMENT K340
- 4x STOSSFUGENKEIL
- 2x ELASTOMERBAND FUER STOSSFUGENKEILE

- TIEFBAU
- STRASSE
- BAHN
- HOCH- & INDUSTRIEBAU
- TUNNEL

**VORABZUG**

				SAP-NR.: -
REV.: -	MASSTAB: 1:50	BENENNUNG: LEITEINRICHTUNG DB SAFELINK KB1 RH3 - DB 100 / 6m K280		DAT./GEZ.: 19.12.2023 / LCH
REV.-DAT./GEZ.:	-	GEWICHT: - KG	MATERIAL: -	DAT./GEPR.: -
<small>DIESE UNTERLAGE IST EIGENTUM DER KIRCHDORFER FERTIGSTELLUNG GMBH UND URHEBERRECHTLICH GESCHUETZT. JEDE VERVIELFAELTIGUNG UND VORFUEHRUNG DARF NUR MIT AUSDRUECKLICHER ZUSTIMMUNG DER EIGENTUMER ERFOLGEN.</small>				PROJEKTR./AUFTRAGS NR.: ST 14 ZEICHNUNGS NR./BLATT: V784387T/1