

Technische Universität Berlin
Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme
Institut für Land- und Seeverkehr

Steffen Sohr
geboren am 22.10.1966 in Freiberg

**Passive Sicherheit von Schienenfahrzeugen des
Personenfernverkehrs – Methoden und Strategien zur
Verbesserung des Insassenschutzes**

Von der Fakultät V
Verkehrs- und Maschinensysteme
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. K. Knothe
Berichter: Prof. Dr.-Ing. M. Hecht
Prof. Dr.-Ing. E. Gärtner

Wissenschaftliche Aussprache am 19.03.2001

Berlin 2001
D 83

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter mit Lehraufgaben am Fachgebiet Schienenfahrzeuge des Institutes für Straßen- und Schienenverkehr der TU Berlin.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Hecht und Prof. Gärtner, die mich in der Motivation für das gewählte Dissertationsthema jederzeit bestärkt und unterstützt haben.

Nach jahrelanger Vakanz des Fachgebietes hat Prof. Hecht großen Anteil daran, dass ich die Arbeit trotz der parallel laufenden Forschungs- und Dienstleistungsprojekte und Lehrtätigkeit fertig stellen konnte. Er hat mich in den zurückliegenden vier Jahren fachlich betreut und mit seinem großartigen Engagement wesentlich zum Vorankommen der Arbeit beigetragen.

Prof. Gärtner danke ich besonders für die Bereitschaft, als Gutachter für meine Arbeit zur Verfügung zu stehen. Seine zahlreichen Anregungen und kritischen Kommentare waren mir stets eine wertvolle Hilfe beim Erstellen und Überarbeiten der Dissertation.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebietes Schienenfahrzeuge, wo ein hervorragendes Arbeitsklima zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Frau Schirmer danke ich besonders für ihre Unterstützung in administrativen Angelegenheiten und für die damit verbundene Entlastung. Jederzeit hilfsbereit und mit "goldenen Händen" standen mir Lutz-Michael Schmidt und Harald Jakatt zur Seite, wenn es notwendig war, auf die Werkstatt des Fachgebietes zurückzugreifen. Bei Dorothea Salz und Ileana Udriste möchte ich mich für das sorgfältige Korrekturlesen und kritische "Hinterfragen" bedanken. Marc Wiemers und Roland Jürgens bin ich besonders dankbar für die Unterstützung bei der Auswertung der Simulationsdaten und Behebung von Softwareproblemen. Jederzeit hilfs- und diskussionsbereit waren Alexander Mahr, Thomas Rieckenberg und Andreas Schirmer. Danken möchte ich auch den studentischen Mitarbeitern und StudentInnen des Fachgebietes für Anregungen, Hinweise und den regen Ideenaustausch.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern und vielen Freunden danken, die mir in kritischen Phasen "mit Rat und Tat" zur Seite standen sowie meinen beiden Kindern Franziska und Richard, die mir oft den seelischen Rückhalt gegeben haben und viel Geduld mit mir hatten, während der langen Zeit des "Schreibens".

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Motivation und Ziel der Arbeit.....	2
1.3	Methodik.....	4
1.4	Bestehende Vorschriften zum Nachweis der Kollisionssicherheit	5
1.5	Hohe Strukturfestigkeit oder gezielte Energieabsorption?	10
1.6	Ausgewählte Beispiele für Fahrzeugentwicklungen mit Komponenten und Strukturen zur gezielten Energieabsorption	14
2	Definitionen und Grundbegriffe der Verkehrssicherheit.....	15
3	Wie sicher ist die Bahn? - Vergleich zwischen Straßen- und Schienenverkehr	17
3.1	Unfallstatistik 1991-1995 der Deutschen Bahn AG	17
3.2	Unfallstatistiken des Statistischen Bundesamtes	18
3.3	Langfristige Entwicklung spezifischer Unfallzahlen von 1965 bis 1995 - Vergleich zwischen Straßen- und Schienenverkehr	19
3.3.1	<i>Getötete Personen im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung.....</i>	<i>19</i>
3.3.2	<i>Getötete Personen im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden.....</i>	<i>21</i>
3.3.3	<i>Getötete Personen im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf die Gesamtanzahl der Fahrzeuge.....</i>	<i>22</i>
3.4	Mittelfristige Entwicklung spezifischer Unfallzahlen von 1991 bis 1998 - Vergleich zwischen Straßen- und Schienenverkehr	23
3.4.1	<i>Getötete Personen im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung</i>	<i>23</i>
3.4.2	<i>Getötete Personen im Straßen- und Schienenverkehr (Schienenverkehr: nur Reisende) bezogen auf die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden.....</i>	<i>25</i>
3.4.3	<i>Getötete Personen im Straßen- und Schienenverkehr (Schienenverkehr: nur Reisende) bezogen auf die Gesamtzahl an Fahrzeugen</i>	<i>26</i>
3.5	Resümee der Unfallbilanz.....	27
4	Risikoanalyse der Unfälle im Schienenfernverkehr	28
4.1	Zielsetzung.....	28
4.2	Bahnbetriebsunfälle mit Personenschaden in der BRD von 1991 bis 1998	28

4.3	Schlußfolgerungen	32
4.4	Risikoklassifikation der Bahnbetriebsunfälle mit Hilfe einer modifizierten Form der DIN EN 50126	33
4.4.1	<i>Einführung</i>	33
4.4.2	<i>Schadensausmaßkategorien</i>	34
4.4.3	<i>Wahrscheinlichkeitsniveaus</i>	34
4.4.4	<i>Risikoklassifikationsmatrix</i>	36
4.4.5	<i>Risikoklassifikation für die Ereignisart "Entgleisung"</i>	38
4.4.6	<i>Risikoklassifikation für die Ereignisart "Zusammenstoß"</i>	39
4.4.7	<i>Risikoklassifikation für die Ereignisart "Aufprall auf Gegenstände"</i>	40
4.4.8	<i>Risikoklassifikation für die Ereignisart "Zusammenprall mit Wegbenutzern"</i>	41
5	Definitionen und Grundbegriffe zur Bewertung der Insassensicherheit	44
5.1	Einführung	44
5.2	Biomechanische Kriterien zur Bewertung der Verletzungsschwere	44
5.3	Biomechanische Belastungsgrenzwerte	45
5.4	Schutzkriterien in der Kraftfahrzeugtechnik	47
6	Passive Sicherheit im Straßen- und Schienenverkehr	51
6.1	Vergleich passiver Sicherheitsmaßnahmen	51
6.2	Passive Sicherheit von Kraftomnibussen	52
6.2.1	<i>Allgemeines</i>	52
6.2.1.1	<i>Sicherheit gegen Umkippen und Überschlag</i>	53
6.2.1.2	<i>Sicherheit gegen Frontalaufprall</i>	53
6.2.2	<i>Internationale Vorschriften</i>	54
6.2.3	<i>Anforderungen an Sitze in Kraftomnibussen</i>	55
6.2.4	<i>Dynamische Prüfung von Sitzen in Kraftomnibussen</i>	56
6.2.5	<i>Einfluss des Sitzteilermasses auf die Insassenbelastungen</i>	56
6.2.6	<i>Beispiele für realisierte Sicherheitskonzepte bei Reisebussen</i>	60
6.2.7	<i>Übertragbarkeit der Sicherheitsanforderungen auf Schienenfahrzeuge</i>	61
7	Verfahren zur Überprüfung der passiven Sicherheit	62
7.1	Allgemeines	62
7.2	Experimentelle Verfahren (Crashtests)	64
7.2.1	<i>Experimentelle Simulation zum Nachweis der Crashsicherheit von Kraftfahrzeugen</i>	65
7.2.2	<i>Anwendung experimenteller Verfahren in der Schienenfahrzeugtechnik</i>	67
7.2.2.1	<i>Allgemeines</i>	67

7.2.2.2	Die Versuche der ehemaligen Deutschen Reichsbahn zur Überprüfung der Festigkeit von Stahlwagenkästen in Leichtbauweise.....	67
7.2.2.3	ORE-Frage B 165: Dynamische Festigkeit der Führerstandskabine gegenüber Frontalstößen	72
7.2.2.4	Aufprallversuche mit modifizierten Reisezugwagen (British Rail Research).....	73
7.2.2.5	Experimentelle Simulation zum Nachweis der crashgerechten Gestaltung des Hochgeschwindigkeitszuges TGV 2N und des Dieseltriebfahrzeuges für den Regionalverkehr X73500 (SNCF)	76
7.2.2.6	Komponententests mit unterschiedlichen Energieabsorptionselementen (Fa. Bombardier Transportation)	80
7.2.2.7	Schlittentests mit konventionellen Fahrgastsitzen von Reisezugwagen (John A. Volpe National Transportation Systems Center)	82
7.2.2.8	Fullscale - Crashtests mit einem Reisezugwagen (TTCI, USA).....	84
7.3	Rechnerische Simulationsverfahren	85
7.3.1	<i>Finite-Element-Methode (FEM)</i>	85
7.3.2	<i>Mehrkörpersysteme (MKS)</i>	87
8	Grundsätzliche Zusammenhänge zur Verbesserung der passiven Sicherheit von Schienenfahrzeugen.....	90
8.1	Bahnspezifische Besonderheiten hinsichtlich der Insassenposition im Crashfall	90
8.2	Zusammenhang zwischen Fahrzeug- und Insassenverzögerung	91
8.3	Zusammenhang zwischen Fahrzeugstruktur- und Innenraumgestaltung	93
9	Randbedingungen für die rechnerische Simulation	96
9.1	Allgemeines	96
9.2	Beschleunigung-Zeit-Charakteristiken für den Fahrgastbereich	97
9.2.1	<i>Synthetische Beschleunigungsimpulse nach Richtlinien 96/37/EG bzw. ECE-R 80</i>	97
9.2.2	<i>Beschleunigungsimpuls aus einer Simulationsrechnung für den Aufprall eines Hochgeschwindigkeitszuges auf eine starre Wand</i>	98
9.3	Beschleunigung-Zeit-Charakteristiken für den Führerstand.....	99
9.4	Modelle für die Insassensimulation	100
9.4.1	<i>Allgemeines</i>	100
9.4.2	<i>Modellierung des Fahrgastes und des Triebfahrzeugführers</i>	102
9.4.3	<i>Systemparameter für die numerische Simulation</i>	102
9.4.4	<i>Modellierung des Fahrgastbereiches: Reihenbestuhlung</i>	106
9.4.4.1	Allgemeines	106
9.4.4.2	Modellvarianten A1, B1 und C1: Status - Analyse	107
9.4.4.3	Modellvarianten A2, B2 und C2: Verwendung einer zusätzlichen Polsterung	110
9.4.4.4	Modellvariante B3: Optimierung der Nachgiebigkeit der Sitzlehne	111

9.4.5	<i>Modellierung des Fahrgastbereiches: Abteilbestuhlung ohne Tisch</i>	112
9.4.5.1	Modellvarianten A1, B1 und C1: Status - Analyse	113
9.4.5.2	Modellvarianten A2, B2 und C2: Verwendung eines zusätzlichen Energieabsorptionselementes	115
9.4.6	<i>Modellierung des Fahrgastbereiches: Abteilbestuhlung mit Tisch</i>	117
9.4.6.1	Allgemeines	117
9.4.6.2	Modellvarianten A1, B1 und C1: Status - Analyse	118
9.4.6.3	Modellvariante B2: Optimiertes Energieabsorptionsvermögen des Tisches	119
9.4.6.4	Modellvariante B3: Vergrößerung der Tischbreite	119
9.4.7	<i>Modellierung des Führerstandsmoduls</i>	120
9.4.7.1	Allgemeines	120
9.4.7.2	Modellvariante 1: Status - Analyse	121
9.4.7.3	Modellvariante 2: Verwendung einer zusätzlichen Polsterung	121
9.4.7.4	Modellvariante 3: Verwendung eines Beckengurtes mit Gurtkraftbegrenzung	122
9.4.7.5	Modellvariante 4: Verwendung eines Dreipunktgurtes mit Gurtkraftbegrenzung ...	123
10	Rechnerische Simulation zur Ermittlung der Belastungen für den Fahrgast und den Triebfahrzeugführer	124
10.1	Ermittlung der Beschleunigung-Zeit-, Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Charakteristika	124
10.2	Ergebnisse für eine Reihenbestuhlung unter Verwendung der Beschleunigung-Zeit- Charakteristik für den Fahrgastbereich	127
10.2.1	<i>Ermittlung der HIC₃₆-Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen</i>	127
10.2.2	<i>Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Kopf (a_{3ms})</i>	128
10.2.3	<i>Ermittlung der SI-Werte aus den resultierenden Beschleunigungen für den Thorax...</i>	129
10.2.4	<i>Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Thorax (a_{3ms})</i>	130
10.2.5	<i>Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Pelvis (a_{3ms})</i>	131
10.2.6	<i>Ermittlung der maximalen Oberschenkel-Längsdruckkräfte</i>	132
10.3	Ergebnisse für eine Abteilbestuhlung ohne Tisch (vis-à-vis) unter Verwendung der Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Fahrgastbereich	133
10.3.1	<i>Ermittlung der HIC₃₆-Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen</i>	133
10.3.2	<i>Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Kopf (a_{3ms})</i>	134
10.3.3	<i>Ermittlung der SI-Werte aus den resultierenden Beschleunigungen für den Thorax...</i>	135
10.3.4	<i>Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Thorax (a_{3ms})</i>	137
10.3.5	<i>Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Pelvis (a_{3ms})</i>	138
10.3.6	<i>Ermittlung der maximalen Oberschenkel-Längsdruckkräfte</i>	139
10.4	Ergebnisse für eine Abteilbestuhlung mit Tisch unter Verwendung der Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Fahrgastbereich	140
10.4.1	<i>Ermittlung der HIC₃₆-Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen</i>	140
10.4.2	<i>Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Kopf (a_{3ms})</i>	141

10.4.3	<i>Ermittlung der SI-Werte aus den resultierenden Beschleunigungen für den Thorax...</i>	142
10.4.4	<i>Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Thorax (a_{3ms})</i>	143
10.4.5	<i>Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Pelvis (a_{3ms})</i>	144
10.4.6	<i>Ermittlung der resultierenden Maximalkräfte beim Anprall des Pelvis auf den Tisch</i>	145
10.5	Ergebnisse der Belastungen für den Triebfahrzeugführer unter Verwendung der Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für das Führerstandsmodul	146
10.5.1	<i>Ermittlung der HIC_{36}-Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen</i>	146
10.5.2	<i>Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Kopf (a_{3ms})</i>	147
10.5.3	<i>Ermittlung der SI-Werte aus den resultierenden Beschleunigungen für den Thorax...</i>	148
10.5.4	<i>Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Thorax (a_{3ms})</i>	149
10.5.5	<i>Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Pelvis (a_{3ms})</i>	150
10.5.6	<i>Ermittlung der resultierenden Maximalkräfte auf den Pelvis infolge des Anpralls auf den Führerstandstisch bzw. der wirkenden Gurtkräfte</i>	152
11	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der rechnerischen Simulation zur Bewertung der Insassenbelastungen	153
11.1	Ergebnisse aus den Insassensimulationsrechnungen für den Fahrgastbereich	153
11.1.1	<i>Reihenbestuhlung</i>	153
11.1.2	<i>Abteilbestuhlung (vis-à-vis - Sitzanordnung) ohne Tisch</i>	155
11.1.3	<i>Abteilbestuhlung (vis-à-vis - Sitzanordnung) mit Tisch</i>	156
11.2	Ergebnisse aus den Insassensimulationsrechnungen für das Führerstandsmodul	158
12	Zusammenfassung und Ausblick	161
13	Literaturverzeichnis	166
14	Abbildungsverzeichnis	173
15	Tabellenverzeichnis	184

Anhang

A	Erläuterung der spezifischen Kennzahlen zum Vergleich der Unfallstatistiken des Straßen- und Schienenverkehrs	186
B	Zuordnung der Bahnbetriebsunfälle zu Ereignisarten.....	188
C	Ergebnisse aus der rechnerischen Simulation mit ADAMS.....	190
C.1	Insassensimulationsrechnungen: Reihenbestuhlung.....	190
C.1.1	<i>Modellvariante A1</i>	190
C.1.2	<i>Modellvariante A2</i>	192
C.1.3	<i>Modellvariante B1</i>	194
C.1.4	<i>Modellvariante B2</i>	196
C.1.5	<i>Modellvariante B3</i>	199
C.1.6	<i>Modellvariante C1</i>	202
C.1.7	<i>Modellvariante C2</i>	204
C.2	Insassensimulationsrechnungen: Abteilbestuhlung ohne Tisch	206
C.2.1	<i>Modellvariante A1</i>	206
C.2.2	<i>Modellvariante A2</i>	208
C.2.3	<i>Modellvariante B1</i>	211
C.2.4	<i>Modellvariante B2</i>	213
C.2.5	<i>Modellvariante C1</i>	215
C.2.6	<i>Modellvariante C2</i>	217
C.3	Insassensimulationsrechnungen: Abteilbestuhlung mit Tisch.....	220
C.3.1	<i>Modellvariante A1</i>	220
C.3.2	<i>Modellvariante B1</i>	222
C.3.3	<i>Modellvariante B2</i>	225
C.3.4	<i>Modellvariante B3</i>	227
C.3.5	<i>Modellvariante C1</i>	230
C.4	Insassensimulationsrechnungen: Führerstandsmodule.....	232
C.4.1	<i>Modellvariante 1</i>	232
C.4.2	<i>Modellvariante 2</i>	234
C.4.3	<i>Modellvariante 3</i>	237
C.4.4	<i>Modellvariante 4</i>	239

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Zu den großen Systemvorteilen des Schienenverkehrs zählt seine nachweisbar hohe Sicherheit. Sie war und ist deshalb ein "Aushängeschild" dieses Verkehrsträgers. Schwere Unfälle im Schienenverkehr sind sehr selten, können jedoch nicht völlig vermieden werden. Da die Anzahl der Opfer bei schweren Unfällen häufig verhältnismäßig hoch ist, stehen diese Unfälle in erheblichem Maße im Blickpunkt des öffentlichen Interesses und werden von den Medien entsprechend ausführlich beschrieben. Dabei wird immer wieder die Sicherheit des Schienenverkehrs kritisch hinterfragt. Neben einem nicht zur Diskussion stehenden hohen Maß an aktiver Sicherheit ist deshalb, insbesondere innerhalb der letzten zehn Jahre, die Verbesserung der passiven Sicherheit von Schienenfahrzeugen in das Zentrum der Forschungsaktivitäten von Betreibern, Industrie und wissenschaftlichen Einrichtungen getreten. Ziel ist es, Methodik und Maßnahmen zu entwickeln, die zu einer Reduzierung der Unfallfolgen schwere und zur Minderung der Verletzungsschwere der Fahrzeuginsassen bei Schienenfahrzeugunfällen führen. Unter aktiver Sicherheit sind dabei unfallvermeidende Maßnahmen zur Reduzierung der Unfallhäufigkeit und unter passiver Sicherheit sind schadensbegrenzende Maßnahmen zur Minderung der Unfallfolgen zu verstehen¹.

Die Frage der Fahrgastsicherheit in Schienenfahrzeugen und die Sicherheit des "Eisenbahnumfeldes" ist dabei fast so alt wie der Schienenverkehr selbst.

Bereits im 19. Jahrhundert hat man sich mit dem verbesserten Insassenschutz sowie einer Minderung der Folgen für den Unfallpartner befasst: "Diese Schutzvorrichtungen bezwecken ... in erster Linie einer Verletzung nahe dem Gleis Gehender vorzubeugen, in zweiter, - die Sicherheit der Fahrgäste zu erhöhen, da letztere durch einen plötzlichen Anstoß des Wagens an ein Hindernis Gefahr laufen, infolge unsanften Rüttelns verletzt zu werden. ... Die Vorrichtungen, welche das erfüllen sollen, dürfen daher weder besonders vorstehende Bestandteile,

¹ Definitionen und Grundbegriffe der Verkehrssicherheit werden in Abschnitt 2 erläutert

noch scharfe Ecken und Kanten aufweisen, - ein Grundsatz, der bisher nicht stets genügend beachtet wurde" [1].

Diese Erkenntnisse aus den Anfängen der passiven Sicherheit von Schienenfahrzeugen lassen sich auch auf Anforderungen an moderne Schienenfahrzeuge übertragen.

1.2 Motivation und Ziel der Arbeit

Im Gegensatz zum Straßenverkehr, haben Schienenfahrzeugindustrie und Betreiber aufgrund des hohen Stellenwertes der aktiven Sicherheit erst vor wenigen Jahren begonnen, sich dem Problem der Verbesserung des Insassenschutzes im Kollisionsfall anzunehmen. Im internationalen Vergleich wurden diese Anstrengungen mit unterschiedlicher Intensität durchgeführt, bedingt durch differierende Sicherheitsphilosophien und in Abhängigkeit des Unfallgeschehens im nationalen Schienenverkehr.

Aufgrund der zum Teil stark national orientierten Fahrzeugindustrie und einer großen Unsicherheit dieser Thematik gegenüber wurden Anforderungen an neue Schienenfahrzeuge hinsichtlich der Kollisionssicherheit - wenn überhaupt - unterschiedlich definiert. Das bereits in Abschnitt 1.4 erwähnte EU-Forschungsprojekt SAFETRAIN soll zu einer international einheitlichen Vorgehensweise bei der Zulassung und Validierung von Schienenfahrzeugen in Bezug auf die Kollisionssicherheit beitragen und das Fundament für die hierfür notwendigen Normen und Richtlinien bilden.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit sollen grundlegende Erkenntnisse dargestellt werden, die bei der Entwicklung von Methoden und Strategien zur Verbesserung der Insassensicherheit im Kollisionsfall zu beachten sind. Ziel ist es, Möglichkeiten und Grenzen eines im Kollisionsfall verbesserten Insassenschutzes in Schienenfahrzeugen des Personenfernverkehrs unter Berücksichtigung der im Kraftfahrzeugbereich angewandten Schutzkriterien aufzuzeigen. Es wird qualitativ und quantitativ der Zusammenhang untersucht, welchen Einfluss die Beschleunigung-Zeit-Charakteristik des Fahrzeuges (Fahrzeugverzögerung), unterschiedliche Sitzkonfigurationen und gezielt einzusetzende Schutz- und Rückhaltesysteme auf die Insassenbelastung haben.

Ausgehend von einer möglichst ganzheitlichen Betrachtung der mit dem Thema "Passive Sicherheit von Schienenfahrzeugen für den Fernverkehr" in Zusammenhang stehenden Probleme, werden Maßnahmen entwickelt, die dem Fahrgast und dem Triebfahrzeugführer im Crashfall einen höheren Schutz bieten. Im Vordergrund steht die Überlegung, dass durch ein integriertes Sicherheitskonzept, das neben dem fahrzeugstrukturseitigen Schutzpotential auch Sicherheitskomponenten im Innenbereich einbezieht, eine weitere Reduzierung der Verletzungsschwere der Fahrzeuginsassen zu erzielen ist.

Grundlage für die hier vorgestellten Untersuchungen sind die für den Schienenverkehr relevanten Kollisionsszenarien und repräsentative Fahrzeugverzögerungen, die auch Erfahrungen aus dem Kraftfahrzeugbereich, insbesondere von Kraftomnibussen, berücksichtigen. In engem Zusammenhang mit den unterschiedlichen Sitzkonfigurationen im Fahrgastbereich und der Gestaltung des Führerstandsmoduls werden Lösungen erarbeitet, die sich auf das Interieur von Schienenfahrzeugen beschränken. Untersuchungen hinsichtlich einer crashoptimierten Fahrzeugstruktur und geeigneten Elementen zur Energieabsorption sind nicht Gegenstand der Arbeit.

Bezogen auf den Fahrgastbereich liegt der Schwerpunkt auf einer Machbarkeitsstudie hinsichtlich der sicherheitsorientierten Gestaltung vorhandener Inneneinrichtungskomponenten (Sitze, Tische) und deren sinnvollen Ergänzung mit energieabsorbierenden Teilstrukturen, so dass sie in ihrer erweiterten Funktion als Schutzsysteme zu keiner Komforteinschränkung für den Fahrgast führen.

In die Untersuchungen zur Verbesserung der Sicherheit des Triebfahrzeugführers im Kollisionsfall werden Rückhaltesysteme einbezogen, die in der Kraftfahrzeugtechnik dem Stand der Technik entsprechen (Beckengurt, Dreipunktgurt ohne und mit Kraftbegrenzung).

1.3 Methodik

Auf der Grundlage einer Definition der Begriffe „aktive“ und „passive“ Sicherheit erfolgt eine Zuordnung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit im Schienenverkehr, die konsequent zur Entwicklung eines integrierten Sicherheitskonzeptes führt. Mit Hilfe einer Gegenüberstellung von ausgewählten Maßnahmen zur Verbesserung des Insassenschutzes im Crashfall soll die Anwendbarkeit von Maßnahmen aus dem Bereich der Kraftfahrzeugtechnik auf Schienenfahrzeuge kritisch diskutiert werden.

Anhand eines Vergleiches von Unfallstatistiken des Straßen- und Schienenverkehrs wird eine differenzierte Betrachtung der Entwicklung der Sicherheit bei beiden Verkehrsträgern durchgeführt. Die Analyse von Bahnbetriebsunfällen dient als Grundlage für Ansätze einer Risikobewertung von Kollisionsszenarien im Schienenverkehr, von der Wirksamkeitsüberlegungen hinsichtlich passiver Sicherheitsmaßnahmen abgeleitet werden können.

Für die Bewertung der Insassensicherheit werden in der Kraftfahrzeugtechnik spezifische Sicherheitskriterien (sog. Verletzungs- und Schutzkriterien) verwendet. Für einen quantitativen Vergleich der auftretenden Insassenbelastungen bei unterschiedlichen Kollisionsszenarien, ist es sinnvoll, diese Kriterien auf Schienenfahrzeuge zu übertragen. Dabei ist zu klären, welche kraftfahrzeugspezifischen Kriterien für die Insassen von Schienenfahrzeugen relevant sind.

Unter Verwendung ausgewählter Sitzkonfigurationen werden Untersuchungen der Insassenkinematik für unterschiedliche Szenarien mit Hilfe von Starrkörper-Simulationsrechnungen durchgeführt. In Abhängigkeit der vorgegebenen Beschleunigung-Zeit-Charakteristiken können die dabei auftretenden Insassenbelastungen unter Berücksichtigung der in der Kraftfahrzeugtechnik verwendeten Schutzkriterien für unterschiedliche Gestaltungsvarianten ermittelt und miteinander verglichen werden. Im Ergebnis sollen Maßnahmen hinsichtlich einer sicherheitsoptimierten Gestaltung von Komponenten der Inneneinrichtung ggf. unter Verwendung von zusätzlichen Rückhalte- und Schutzsystemen zur gezielten Energieabsorption dargestellt werden.

1.4 Bestehende Vorschriften zum Nachweis der Kollisionssicherheit

Wie in den Abschnitten 1.1 und 1.2 erwähnt, wurden die Untersuchungen hinsichtlich einer verbesserten "Crashsicherheit" erst in jüngster Zeit intensiviert. Deshalb ist es auch nicht verwunderlich, dass es zwar Vorschriften und Richtlinien für Lastannahmen und für den Nachweis der statischen und dynamischen Festigkeit von Schienenfahrzeugen gibt, aber keine Normen oder Vorschriften, die detaillierte Aussagen zum Nachweis der Kollisionssicherheit enthalten. Im folgenden soll eine Übersicht der für die Strukturfestigkeit relevanten Normen und Vorschriften gegeben und der derzeitige Entwicklungsstand auf dem Gebiet der Crashsicherheit von Schienenfahrzeugen dargestellt werden.

Die heute zum Teil noch gültigen Normen und Vorschriften, die sich mit der Strukturfestigkeit der Wagenkästen von Schienenfahrzeugen befassen, dürften ihren Ursprung in **Untersuchungen der Deutschen Reichsbahn** in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts haben. Damals wurden sehr umfangreiche Festigkeits- und Zerstörungsversuche an Wagenkästen durchgeführt, um den Nachweis zu erbringen, dass die in Stahlleichtbauweise geschweißten Wagenkästen die im Betrieb vorkommenden Beanspruchungen ohne bleibende Verformung aufnehmen können. Im Zuge dieser Untersuchungen sind auch statische Druckversuche mit einer Belastung von 2000 kN in Längsrichtung durchgeführt worden, um die Festigkeit der neuen Rohbauwagenkästen zu ermitteln. Außerdem wurden die Fahrzeuge Auflaufversuchen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Absturzversuchen unterzogen, die Aufschluss über das plastische Verformungsverhalten der Wagenkästen geben sollten. Auch Innenausrüstungskomponenten, wie Sitzgestelle und Zwischenwände sowie deren Befestigung, wurden in die Versuchsauswertung einbezogen. Die Versuchsdurchführung und -auswertung sowie die Ergebnisse der Versuche sind in [2] detailliert beschrieben². Der Umfang dieser Versuche und die Aussagekraft der Ergebnisse ist unter Berücksichtigung der damals vorhandenen Möglichkeiten außerordentlich bemerkenswert.

² Ausführungen zur Versuchsdurchführung und zu den Ergebnissen sind in Abschnitt 7.2.2.2 der vorliegenden Arbeit zu finden

Die Ergebnisse der Versuche der Deutschen Reichsbahn wurden im Merkblatt "**Lastannahmen und Sicherheiten für Schienenfahrzeugen**" aufgegriffen. In dieser Vorschrift sind Beanspruchungen infolge von Aufstoßvorgängen als Zusatzkräfte, die während der Fahrt nur zeitweise auftreten, erfasst. Für die maximalen Aufstoßkräfte, die zu keiner bleibenden Verformung führen dürfen, sind für Reisezugwagen 200 Mp festgelegt³. Für die Berechnung der Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte in Längsrichtung, die von den am Fahrzeug befestigten Bauteilen und Komponenten bei Auflaufstößen aufzunehmen sind, werden für Lokomotiven $-50,0 \text{ m/s}^2$, für "in Eisenbahnzüge einstellbare Wagen" $-35,0 \text{ m/s}^2$ und für Trieb-, Steuer- und Beiwagen $-30,0 \text{ m/s}^2$ angegeben [3].

Die UIC⁴-Richtlinie 566 "**Beanspruchungen von Reisezugwagenkästen und deren Anbauteile**" legt als Prüfkraft für den Wagenkasten eine statische Druckbeanspruchung von mindestens 2000 kN in Höhe der Puffer fest. Als Auslegungskriterium für Befestigungen sind für die Beschleunigung in Längsrichtung 5 g ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) angegeben [4].

In der DIN EN 12663 "Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen" [5] als europäische Norm sind die Nachweise der Festigkeitsanforderungen und die Beanspruchungsfälle festgelegt. Relevant für die passive Sicherheit der Fahrzeuge sind insbesondere die unter Abschnitt 4.2 festgelegten statischen Beanspruchungen des Wagenkastens in Längsrichtung, die als Mindestanforderungen zu verstehen sind und von der Wagenkastenstruktur ohne plastische Verformungen ertragen werden müssen. Zusätzlich sind unter Abschnitt 4.5 die statischen Beanspruchungsfälle für Ausrüstungsbefestigungen beschrieben, wobei vor allem die festgelegten Beschleunigungen in Längsrichtung als Auslegungskriterien in Bezug auf die Kollisionssicherheit von Interesse sind.

In der VDV-Vorschrift "**Empfehlungen für die Festigkeitsauslegung von Personenzugfahrzeugen nach BO Strab**"⁵ [6] sind Lastannahmen für Nahverkehrsfahrzeuge (Straßen-, Stadt- und U-Bahn-Fahrzeuge) definiert. Diese Vorschrift basiert auf Arbeiten von *Bugarcic* und

³ 1 Mp = 9,81 kN, 200 Mp entsprechen also ca. 2000 kN

⁴ Union Internationale des Chemins de Fer

⁵ BOStrab - Verordnung über den Bau- und Betrieb der Straßenbahnen, Ausgabe Dezember 1987

Schneider ([7], [8], [9] und [10]) die zu einer Überarbeitung der Lastannahmen und Festigkeitsauslegung von BO Strab - Fahrzeugen geführt haben.

In der VDV-Vorschrift 152 wird zur Berücksichtigung der Beanspruchungen des Wagenkastens bei Aufstoßvorgängen die Wagenkasten-Abnahmeprüfkraft aus einer berechneten Aufstoßkraft der vorgeschalteten Energieabsorptionselemente bestimmt. Dabei gehen erstmals unterschiedliche **Kollisionsszenarien**, die zu absorbierende Energie in Abhängigkeit von der Gesamtmasse der Fahrzeuge und der Aufstoßgeschwindigkeit und die Charakteristiken der Energieabsorptionseinrichtungen in die Berechnung ein. Die Verteilung der Energie auf die Fahrzeuge im Zugverband durch entsprechende Charakteristiken der Arbeitsglieder an der Frontpartie und in den Gelenk- oder Kuppelsektionen wird ebenfalls berücksichtigt. Zur Ermittlung der Wagenkasten-Abnahmeprüfkraft werden zwei Szenarien betrachtet: Die Auffahrt auf eine stehende, festgebremste Zugeinheit gleicher Gattung und die Auffahrt gegen einen starren, unelastischen Prellbock. Fahrzeuge, die frei tauschbar im Zugverband eingesetzt werden, sollen Massenträgheitskräfte resultierend aus einer Verzögerung von 30 m/s^2 aufnehmen können. Für Fahrzeuge, die nicht im Zugverband eingesetzt werden, sind Verzögerungen von 20 m/s^2 (ohne Energieabsorptionseinrichtungen) bzw. 15 m/s^2 (mit Energieabsorptionseinrichtungen) aufgeführt.

Die Ergebnisse der genannten Untersuchungen von BUGARCIC et al. fanden erstmals im Konzept einer gestuften Energieabsorption in drei Phasen bei der Berliner S-Bahn Baureihe 480 ihre Anwendung [11].

Das im August 1997 begonnene EU-Forschungsprojekt SAFETRAIN hat zum Ziel, Verfahren für die Zulassung und Validierung von Schienenfahrzeugen unter dem Aspekt der Kollisionssicherheit zu entwickeln. Als Basis für die transparente Prüfung der Fahrzeuge hinsichtlich gezielter Energieabsorption und einzuhaltender Belastungsgrenzen soll ein validiertes Simula-

tionstool dienen. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes werden in **neue europäische Normen** des CEN⁶ einfließen.

Die im SAFETRAIN-Projekt entwickelte Philosophie zur Crashesicherheit hat als Grundlage ein **dreistufiges Konzept der kontrollierten Energieabsorption**. Die Kollisionsenergie soll von der Kupplung, von Komponenten außerhalb der Wagenkastenstruktur und von in die Struktur integrierten Energieabsorptionselementen an den Fahrzeugenden aufgenommen werden.

Für die Entwicklung von Konzepten bezüglich des Energieabsorptionsmanagements werden im SAFETRAIN-Projekt drei unterschiedliche Zugtypen untersucht:

- Hochgeschwindigkeitszug mit Triebköpfen (TGV; ICE1)
- Hochgeschwindigkeitszug mit Triebwagen (ICE3)
- Dreiteiliger Regionaltriebzug mit einer Gesamtmasse von 129 t

Als Kollisionsszenarien werden

- die Frontalkollision zweier gleichartiger Zugtypen bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $v_{\text{Kol}} = 55 \text{ km/h}$ und
- der Aufprall eines Zugverbandes auf eine starre Masse von $m = 16,5 \text{ t}$ als Äquivalent für den Zusammenprall mit einem 40 t - LKW auf einem Bahnübergang bei $v_{\text{Kol}} = 98 \text{ km/h}$ betrachtet.

Das Energieabsorptionsmanagement des dreiteiligen Regionaltriebzuges besteht aus sogenannten "high-energy-ends" an den Enden des Triebzuges mit einem Energieabsorptionsvermögen von 4,6 MJ und "low-energy-ends" zwischen den Triebzug-Einheiten mit einem Energieabsorptionsvermögen von 1,4 MJ (0,7 MJ je Fahrzeug).

In der **Richtlinie 96/48/EG** des Rates der Europäischen Gemeinschaften über die Interoperabilität des Transeuropäischen Hochgeschwindigkeitssystems sind drei Szenarien zum Nachweis einer ausreichenden Sicherheit im Kollisionsfall festgelegt (Tabelle 1.1). Die Energieab-

⁶ CEN: European Committee for Standardization

sorption soll dabei überwiegend durch eine crashfähige Struktur in Stahlbauweise erfolgen, die in den Wagenkasten an den Fahrzeugenden integriert wird.

Tabelle 1.1: Szenarien zum Nachweis einer ausreichenden Sicherheit im Kollisionsfall nach Richtlinie 96/48/EG [12]

Szenario	Fahrzeug- bzw. Zugkonfiguration	$v_{rel.}$ [km/h]	Nachweiskriterien
I	Gleichartige Hochgeschwindigkeitszüge	36	keine bleibenden Verformungen an der Führerstandskabine
II	Hochgeschwindigkeitszug - konventionelles Fahrzeug mit Seiteneuffern (Güterwagen mit einer Masse von 80 t)	36	Fluchtweg muss frei bleiben, Länge des Überlebensraumes soll mindestens 0,75 m betragen; während der plastischen Verformung soll die mittlere Verzögerung des Fahrzeugs einen Wert von 5 g nicht überschreiten; 75 % der Kollisionsenergie soll im Bugbereich absorbiert werden
III	Hochgeschwindigkeitszug - Hindernis im Gleis (LKW mit einer Masse von 40 t; für Simulationsrechnungen und Versuche wird als Äquivalent eine starre Masse von 15 t verwendet)	110	wie Szenario II; zusätzlich soll die absorbierte Kollisionsenergie ca. 6 MJ betragen

Die in der Richtlinie 96/48/EG aufgeführten Technischen Spezifikationen der Interoperabilität des Transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsnetzes (TSI) sind maßgebend für die Europäische Normung (CEN).

1.5 Hohe Strukturfestigkeit oder gezielte Energieabsorption?

Die ursprüngliche Philosophie einer möglichst hohen passiven Sicherheit - sowohl in den USA als auch in Europa - hat weniger die Belastungen berücksichtigt, die auf die Fahrzeuginsassen im Kollisionsfall wirken. Vielmehr stand die Fahrgastzelle, also die Wagenkastenstruktur im Vordergrund der Betrachtungen. Um die Reparaturschäden bzw. -kosten und den Verlust an sogenannten "Überlebensraum" für Fahrgäste und Personal möglichst gering zu halten, wurden in den einschlägigen Spezifikationen und Festigkeitsnormen hohe Belastungsanforderungen für die Abnahmeprüfungen am Wagenkasten festgelegt.

Insbesondere die Anforderungen hinsichtlich der ohne plastische Verformung aufzunehmenden Längsdruckkräfte sollen sicherstellen, dass die Integrität der Wagenkastenstruktur im Kollisionsfall weitestgehend gewahrt bleibt. Zum anderen lässt sich die Stabilität der Fahrzeugstruktur mit einem statischen "Pufferdruckversuch" gegenüber den aufwendigen dynamischen Tests verhältnismäßig einfach nachweisen.

Bei der Auslegung der Strukturfestigkeit existieren dabei wesentliche Unterschiede zwischen Europa und Nordamerika. Gegenüber Europa werden in den USA z.B. in Form von Lastfällen für Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge, die die Kollisionssicherheit betreffen, wesentlich höhere Belastungsanforderungen spezifiziert. Hintergrund dieser Überlegungen ist eine massenproportionale Festigkeitsauslegung, die zu deutlich steiferen und damit auch schwereren Wagenkastenstrukturen führt.

Durch diese hohen Anforderungen an die Strukturfestigkeit wird nicht nur die Entwicklung leichter und damit kostengünstiger Fahrzeugkonzepte gebremst oder gar verhindert, sondern es ist dabei zu beachten, dass

- die Insassen deutlich höheren Verzögerungen unterliegen, die ihre bisherige "Bewegungsfreiheit" in Schienenfahrzeugen durch damit notwendige Rückhaltesysteme einschränkt oder gar ausschließt und
- die Befestigung der Ausrüstungskomponenten am und im Fahrzeug auch für diese hohen Verzögerungen ausgelegt werden müssen.

Leichtere Fahrzeuge bedeuten für den Betreiber unter anderem, Investitions- und Energiekosten als wichtige Bestandteile der Lebenszykluskosten (Life-Cycle-Costs - LCC) zu reduzieren. Durch geringere Beanspruchung des Oberbaus ergeben sich zusätzliche positive Effekte. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, neue Wege auf dem Gebiet der Insassensicherheit zu beschreiten. Die neue Philosophie einer verbesserten Insassensicherheit im Kollisionsfall muss neben einer ausreichenden Strukturfestigkeit sowohl die gezielte Energieabsorption durch Deformationselemente und definierte Fahrzeugbereiche einbeziehen als auch den Einfluss der Fahrzeugverzögerung und der Innenraumgestaltung auf die Insassenverzögerung und daraus resultierende Belastungen der Insassen berücksichtigen.

Das Konzept zur Verbesserung der Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen, das letztendlich zu leichteren Fahrzeugen mit geringerer Strukturfestigkeit bei mindestens gleicher Insassensicherheit gegenüber konventionellen Fahrzeugen führt, sollte die folgenden Schwerpunkte beinhalten:

- die Kombination von reversiblen Energieabsorptionseinrichtungen, Struktursteifigkeit und -festigkeit sowie Energieabsorption durch Inneneinrichtungskomponenten (z. B. Sitze),
- eine adaptive Struktursteifigkeit/-festigkeit im Führerstands- und Fahrgastbereich (größtmöglicher Schutz der Fahrzeuginsassen vor Verlust an "Überlebensraum") sowie in den zu definierenden Energieabsorptionsbereichen,
- das Ausschöpfen der Grenzen einer größtmöglichen, kontrollierten Energieabsorption (Aufteilen der Kollisionsenergie auf die Fahrzeuge innerhalb des Zugverbandes),
- die Berücksichtigung des Zusammenhanges zwischen Fahrzeug- und Insassenverzögerung (Einhaltung der aus den gemessenen biomechanischen Belastungsgrößen zu ermittelnden Verletzungskriterien) und
- Kompatibilitätsanforderungen, die sich aus unterschiedlichen Kollisionsszenarien und Strukturkraftniveaus ergeben.

Die Anforderungen an crashfähige Fahrzeugkonzepte können auf der Grundlage einer Risikoanalyse, die auf der Basis von Unfallstatistiken erstellt wird, und daraus abgeleiteten Kollisionsszenarien und -geschwindigkeiten definiert werden.

Es ist aber auch denkbar, die Grenzen der Energieabsorption und Insassensicherheit bei vorgegebenen Fahrzeugkonzepten und Zugkonfigurationen zu untersuchen. Mit anderen Worten: Wie viel Energie kann im Kollisionsfall durch einzelne Fahrzeuge/den Zugverband bei realistischer Betrachtung unter Einhaltung der für die Insassensicherheit relevanten Verletzungskriterien absorbiert werden?

Eine derartige Grenzbetrachtung ist in Abbildung 1.1 dargestellt, die als Zielgröße die Verbesserung des Insassenschutzes zeigt [13].

Diese Vorgehensweise mit dem Ziel, realistische Grenzen für eine optimierte Insassensicherheit im Kollisionsfall zu bestimmen, lässt sich durch folgende Schritte beschreiben:

- Festlegen der maximal möglichen Deformationswege bezogen auf die Gesamtzuglänge, die für die Energieabsorption zur Verfügung stehen,
- Festlegen des maximal möglichen Energiebetrages, unter Berücksichtigung der Kraft-Weg-Kennung der Energieabsorptionseinrichtungen und deren Wirkungsgrade,
- Bestimmen der für die Untersuchung der Insassensicherheit relevanten Fahrzeugverzögerung ("Crash - Puls"),
- Ermittlung der relevanten Insassenbelastungen und Überprüfung hinsichtlich Einhaltung der Grenzwerte von Schutzkriterien,
- quantitative Aussagen über den Zusammenhang von Fahrzeugverzögerung und Insassenbelastung mit oder ohne Rückhaltesysteme,
- gezieltes Einbeziehen der Inneneinrichtung (Sitze, Kopfstützen, Tische etc.) als Rückhaltesysteme,
- Aussagen über zusätzliche Maßnahmen im Fahrgastbereich (keine freie Über-Kopf-Unterbringung von Gepäckstücken) und
- Aussagen über zusätzliche Maßnahmen für das Personal (Becken- oder Dreipunkt - Gurt, Airbag für Triebfahrzeugführer).

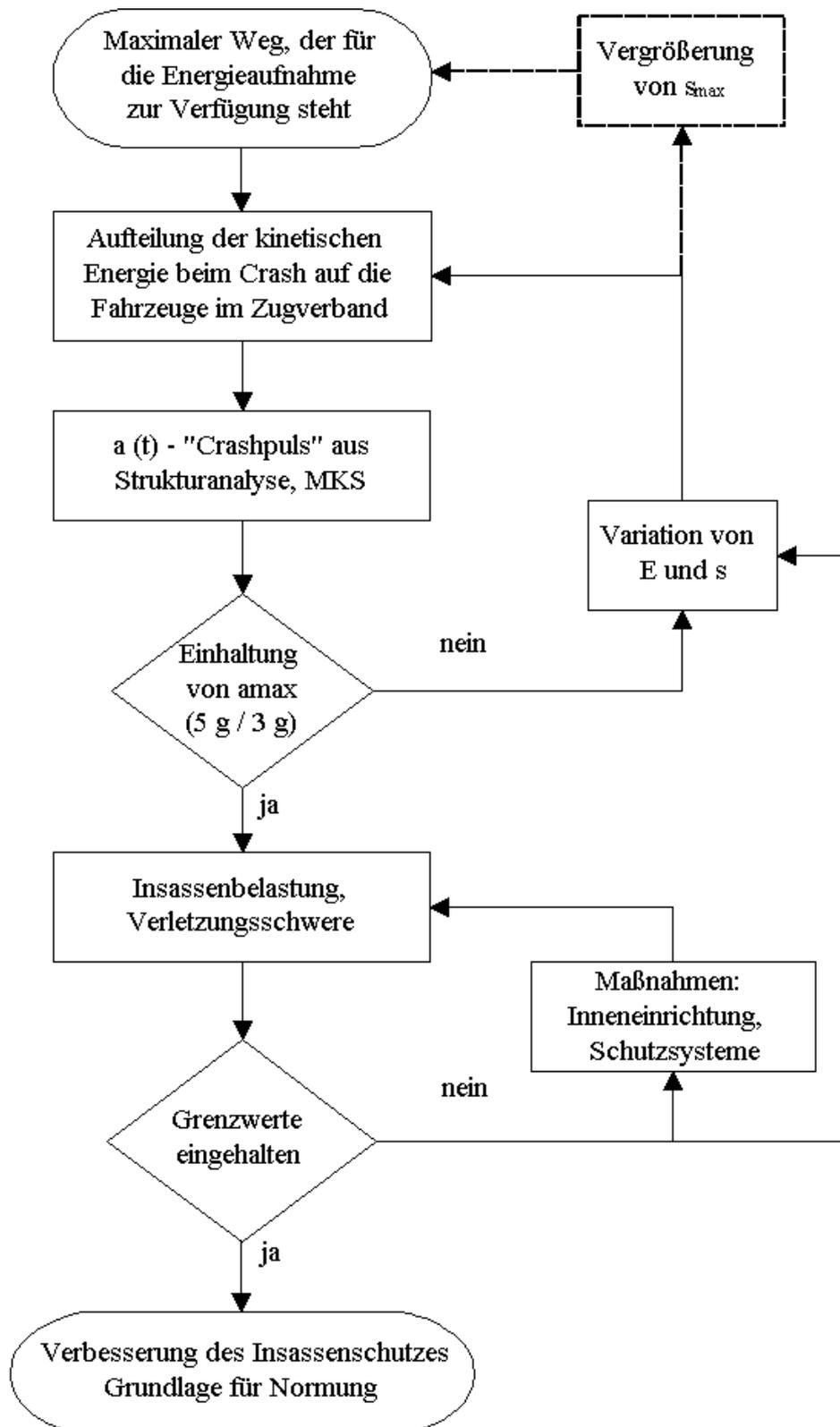


Abbildung 1.1: Entwicklung crashfähiger Fahrzeugkonzepte auf der Grundlage einer Grenzbetrachtung

1.6 Ausgewählte Beispiele für Fahrzeugentwicklungen mit Komponenten und Strukturen zur gezielten Energieabsorption

Die Bemühungen der letzten Jahre, Komponenten und Fahrzeugkonzepte mit der Möglichkeit einer gezielten Energieabsorption zu entwickeln, haben im europäischen Schienenpersonen-nah- und -fernverkehr zu konkreten Ergebnissen geführt. Im Folgenden werden hierzu einige Beispiele aufgeführt:

Fahrzeuge der Berliner S-Bahn Baureihe 480 [14] und 481/482 [15]

- Dreistufiges Energieabsorptionskonzept (reversible Absorptionselemente in der Mittelpufferkupplung, Abreißelemente und irreversible Deformationselemente hinter seitlichen Aufkletterschutzeinrichtungen)

Elektrische Nahverkehrstriebzüge SM 90 (NS) [16]

- Verwendung von Elementen mit hohem Energieabsorptionsvermögen in der Kupplung
- Stabile Querwand an den Fahrzeugenden, um eine möglichst gleichmäßige Kräfteinleitung in die Wagenkastenstruktur zu ermöglichen
- Gezielte Energieabsorption durch die Struktur im Einstiegsbereich ("Knautschzone")
- Homogene Gestaltung des Fahrgastbereiches durch Angleichen der Materialquerschnitte im Untergestell- und Dachbereich, Spantenbauweise (Einbeziehen der Seitenwandbleche) und Einbau von Schottwänden

Hochgeschwindigkeitszug TGV 2N (SNCF) [17], [18]

- Gestufte Energieabsorption und Verteilung der zu absorbierenden Kollisionsenergie auf den Zugverband (Energieabsorption durch Triebköpfe, End- und Mittelwagen)
- Gezieltes Einbeziehen verschiedener Bereiche der Wagenkastenstruktur in die Energieabsorption; zu absorbierender Energiebetrag durch den Triebkopf: ca. 5 MJ, Endwagen: ca. 3,5 MJ
- Ausbildung des Führerstands- und Fahrgastbereiches als "steife Zellen" mit hoher Strukturfestigkeit

Hochgeschwindigkeitstriebzüge ICE-T und ICE3 (DB Reise & Touristik AG) [19]

- Energieabsorptionselemente an den Enden der Triebzüge in Form zylindrischer Verformungselemente aus Faserverstärkten Verbundkunststoffen (FVK)

ÖBB-Hochleistungs-Universal-Lokomotive Rh 1016/1116 [20]

- Einsatz eines kombinierten Puffer- und Deformationselementes mit einem Energieabsorptionsvermögen von ca. 1 MJ pro Pufferpaar

Hochgeschwindigkeitszug Pendolino Britannico [21]

- Energieabsorption durch eine deformierbare Aluminium-Vorbaustruktur; bei einer Deformationslänge von ca. 1000 mm wird ein Energiebetrag von ca. 3,5 MJ absorbiert

2 Definitionen und Grundbegriffe der Verkehrssicherheit

Will man sich mit dem Problem der Verkehrssicherheit auseinandersetzen, so müssen zuerst die Begriffe aktive und passive Sicherheit definiert werden. Grundsätzlich sind Maßnahmen, die unfallvermeidend wirken, zur aktiven Sicherheit zu zählen, während Maßnahmen, welche die Unfallfolgen verhindern bzw. abschwächen, zur passiven Sicherheit gehören.

Durch APPEL [22] werden die einzelnen Maßnahmen der aktiven und passiven Sicherheit verschiedenen Bereichen zugeordnet. Diese Einteilung ist ohne weiteres auf den Schienenverkehr übertragbar, wie Tabelle 2.1 zeigt.

Für eine effektive Verbesserung der Sicherheit im Schienenverkehr ist eine ganzheitliche Betrachtung unter Einbeziehung sowohl aktiver als auch passiver Elemente notwendig.

Tabelle 2.1: Komponenten der aktiven und passiven Sicherheit im Schienenverkehr

Aktive Sicherheit	Passive Sicherheit
Fahrsicherheit <ul style="list-style-type: none"> - spurgeführter Fahrweg (eindimensional) - Spurführungstechnik - Profilmfreiheit - Antrieb/Bremsen 	Struktursicherheit <ul style="list-style-type: none"> - Fahrzeugfrontgestaltung - Energieabsorptionseinrichtungen - Knautsch- bzw. Deformationszonen - steife Fahrgastzelle
Sicherungseinrichtungen <ul style="list-style-type: none"> - streckenseitige Zugbeeinflussungseinrichtungen - Stellwerkstechnik - Zugsicherungsanlagen - Signaltechnik 	Äußere Sicherheit <ul style="list-style-type: none"> - Fahrzeugfrontgestaltung - möglichst wenig vorstehende Teile, (Partnerschutz!) - Abweisereffekte wie Unterfahrerschutz, Verformbarkeit der Frontpartieelemente
Wahrnehmungssicherheit <ul style="list-style-type: none"> - Sichtbereich - Wischerfeld - Beleuchtung - Farbe 	Innere Sicherheit⁷ <ul style="list-style-type: none"> - <i>Innenraumgestaltung (Sitze, Tische, Trennwände, Gepäckablagen usw.)</i> - <i>Rückhaltesysteme ohne Komfortminderung</i> - Haltestangen und -griffe - Brandverhalten
Bedienungssicherheit <ul style="list-style-type: none"> - Anordnung der Instrumente - Anordnung der Schalter - Kraftschlussregelung, Gleitschutz 	Evakuierungskonzepte <ul style="list-style-type: none"> - Fluchtwege - Evakuierung im Tunnel - Rettungswesen
Konditionssicherheit des Triebfahrzeugführers <ul style="list-style-type: none"> - Geräuschpegel, Raumklima - Sitzkomfort, Fahrkomfort 	Havarie-/Notfallmanagement <ul style="list-style-type: none"> - Training des Personals (Betätigen von Sicherheitseinrichtungen im Zug)

Neben unfallvermeidenden Maßnahmen der aktiven Sicherheit, die im Schienenverkehr aufgrund des vorhandenen großen Potentials erste Priorität besitzen, sind in ein integriertes Sicherheitskonzept auch Maßnahmen einzubeziehen, die im Kollisionsfall zu einer Minderung der Verletzungsschwere und zur Reduzierung der Unfallfolgen führen.

⁷ Kursiv dargestellte Inhalte sind Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

3 Wie sicher ist die Bahn? - Vergleich zwischen Straßen- und Schienenverkehr

3.1 Unfallstatistik 1991-1995 der Deutschen Bahn AG

Nicht nur bei besonders schweren Unfällen wird das Verkehrssystem "Schiene" seitens der Öffentlichkeit immer wieder mit der Frage konfrontiert: Wie sicher ist "*die Bahn*"? Um den Nachweis einer hohen Sicherheit im Schienenverkehr zu erbringen, werden hierfür oft die einschlägigen Unfallstatistiken des Straßen- und Eisenbahnverkehrs bemüht.

Im Gegensatz zu den Unfallstatistiken des Straßenverkehrs, die ausführliche Angaben zu Alter, Geschlecht und Verletzungen von Verunglückten enthalten sowie u. a. eine Aufteilung der Verunglückten nach Art der Verkehrsbeteiligung (Fußgänger, Radfahrer, Motorräder, Personenkraftwagen) vornehmen, gibt es diese detaillierten Angaben zu Verunglückten (Art der Verletzung, Verletzungsursache, Geschlecht etc.) im Schienenverkehr nicht. Allgemein sind nur pauschale Angaben hinsichtlich des Verletzungsgrades, wie "getötete Personen" bzw. "verletzte Personen", zu finden.

Im Auftrag der Deutschen Bahn AG (DB AG) wurden von der TU Dresden Eisenbahnunfälle von 1991 bis 1995 auf der Grundlage der Bahnbetriebsunfallstatistik der Deutschen Reichsbahn (DR), Deutschen Bundesbahn (DB) und der DB AG analysiert [23]. In dieser Analyse wurden Personenschäden unterteilt nach "Personal" und "Reisende" sowie nach Schwere der Verletzung, "tot", "schwer verletzt" oder "verletzt". Demnach wurde in dem o. g. Zeitraum bei Unfällen von Reisezügen mit Personenschaden die in Tabelle 3.1 genannte Anzahl von Menschen verletzt oder getötet.

Tabelle 3.1: Verunglückte bei Eisenbahnunfällen von 1991 bis 1995 nach Unfallstatistiken der DR, DB und DB AG

	Getötete	Schwer Verletzte	Leicht Verletzte
Personal	5	17	53
Reisende	16	58	594
Gesamt	21	75	647

3.2 Unfallstatistiken des Statistischen Bundesamtes

Es liegt nahe, den Schienenverkehr mit anderen Verkehrsträgern anhand von absoluten und spezifischen Unfallkennzahlen zu vergleichen, z. B. Anzahl der getöteten und verletzten Personen insgesamt und bezogen auf das Verkehrsaufkommen oder die Verkehrsleistung. Es stellt sich dabei die Frage, welche Zahlen aus den Unfallstatistiken zu verwenden sind. Bei statistischen Vergleichen der Sicherheit im Straßen- und Schienenverkehr wird z.B. oft nur die Anzahl der getöteten und/oder verletzten Reisenden auf EBO - Strecken⁸ (Statistisches Jahrbuch: "Eisenbahnverkehr") der Zahl aller Verkehrstoten im Straßenverkehr (Fußgänger, Radfahrer, Verunglückte innerhalb und außerhalb von Ortschaften etc.) gegenübergestellt [24]. Daraus lässt sich dann recht schnell die vergleichsweise hohe Sicherheit des Verkehrssystems "Schiene" ableiten.

Dem Schienenverkehr werden zudem Unfälle an Bahnübergängen einschließlich getöteter und verletzter Straßenverkehrsteilnehmer zugeordnet, obwohl die primäre Unfallursache in der Regel auf Fehlverhalten von Straßenverkehrsteilnehmern zurückzuführen ist.

Im folgenden soll die Entwicklung der Verkehrssicherheit im Schienenverkehr etwas differenzierter betrachtet und mit dem Trend im Straßenverkehr verglichen werden.

Anhand von Unfallstatistiken des Straßen- und Schienenverkehrs in der Bundesrepublik Deutschland werden die langfristige Entwicklung des Unfallgeschehens der beiden Verkehrsträger durch einen Vergleich der Jahre 1965, 1975, 1985 und 1995 und die mittelfristige Entwicklung im Zeitraum von 1990 bis 1998 aufgezeigt und bewertet. Zur Analyse der Unfallstatistiken anhand spezifischer Unfallkennzahlen dienen verschiedene Kennzahlen der beiden Verkehrsträger "Straße" und "Schiene", die im Anhang A erläutert werden:

⁸ EBO (Eisenbahn- Bau- und Betriebsordnung): Nationale Verordnung in der Bundesrepublik Deutschland, die für regelspurige Eisenbahnen (Haupt- und Nebenbahnen) des öffentlichen Verkehrs gilt (§1 EBO). Spurgebundene Nahverkehrssysteme (Straßen-, Stadtbahn und U-Bahnssysteme) werden in der BRD dagegen nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BO Strab) gebaut und betrieben.

3.3 Langfristige Entwicklung spezifischer Unfallzahlen von 1965 bis 1995 - Vergleich zwischen Straßen- und Schienenverkehr

[25], [26], [27], [28], [29] und [39]

3.3.1 Getötete Personen im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung

Es ist bekannt, dass der Schienenpersonenverkehr am Wachstum des Verkehrsaufkommens und der Verkehrsleistung in Deutschland nur marginal partizipieren konnte. Werden die im Straßen- und Schienenverkehr getöteten Personen auf die Zahl der beförderten Personen (Verkehrsaufkommen) bezogen (Abbildung 3.1), so ist zu erkennen, dass die Zahl der Verkehrstoten im Straßenverkehr trotz des starken Wachstums des Verkehrsaufkommens deutlich reduziert werden konnte. Gegenüber 1965 konnte im Jahr 1995 die Zahl der tödlich Verunglückten im Straßenverkehr bezogen auf das Verkehrsaufkommen auf ca. ein Viertel verringert werden. Damit hat sich diese spezifische Unfallgröße nahezu an den Wert des Schienenverkehrs angeglichen.

Abbildung 3.2 zeigt die im Straßen- und Schienenverkehr getöteten Personen bezogen auf die Personenkilometer (Verkehrsleistung) im Zeitraum von 1965 bis 1995. Es ist eine ähnliche Entwicklung wie bei der Zahl der Verkehrstoten bezogen auf das Verkehrsaufkommen zu erkennen: In Relation zu den gefahrenen Personenkilometern, sterben heute ca. 80% weniger Menschen im Straßenverkehr als noch vor 30 Jahren!

Auch der Schienenverkehr weist heute gegenüber 1965 eine verbesserte Sicherheitsbilanz auf. Die Zahl der Verkehrstoten bezogen auf die beförderten Personen konnte innerhalb von 30 Jahren auf ca. die Hälfte reduziert werden. In Relation zur Verkehrsleistung hat sich die Zahl der tödlich Verunglückten sogar auf ca. ein Drittel reduziert. Das ist vor allem auf eine deutliche Zunahme der Reiseweite, also der gefahrenen Personenkilometer, zurückzuführen, während sich die Zahl der beförderten Personen nicht in diesem Maße vergrößert hat.

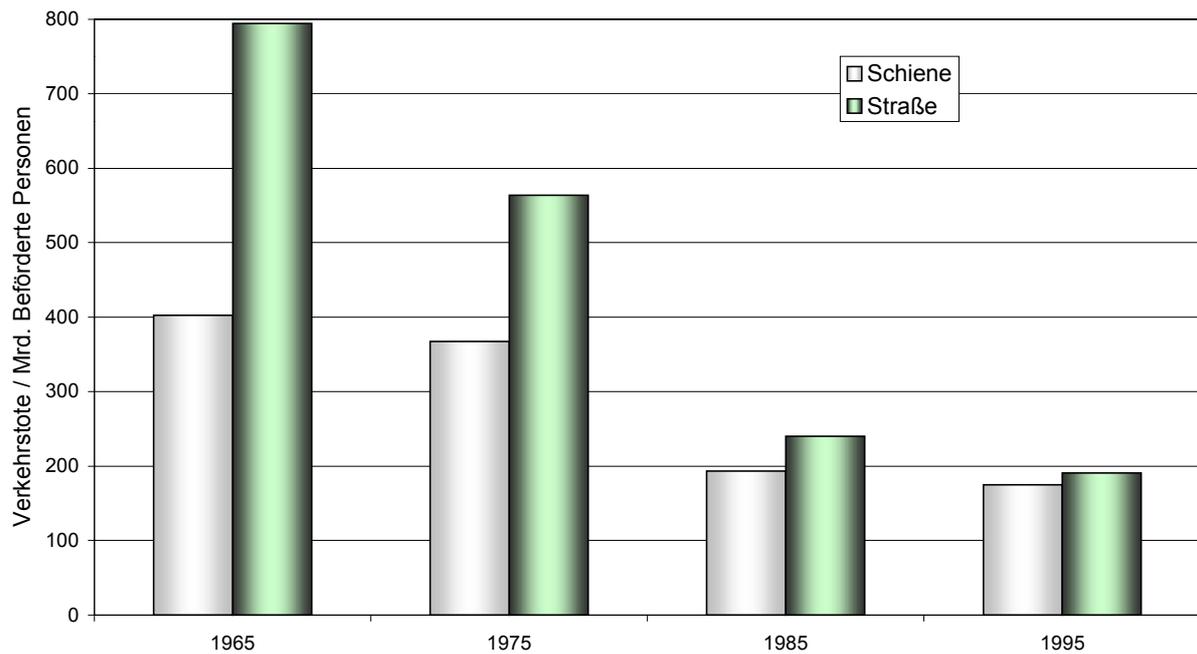


Abbildung 3.1: Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf das Verkehrsaufkommen (Mrd. Beförderte Personen) [25] S. 172; [26] S. 209; [27] S. 366; [28] S. 286; [29] S. 314; [30] S. 325

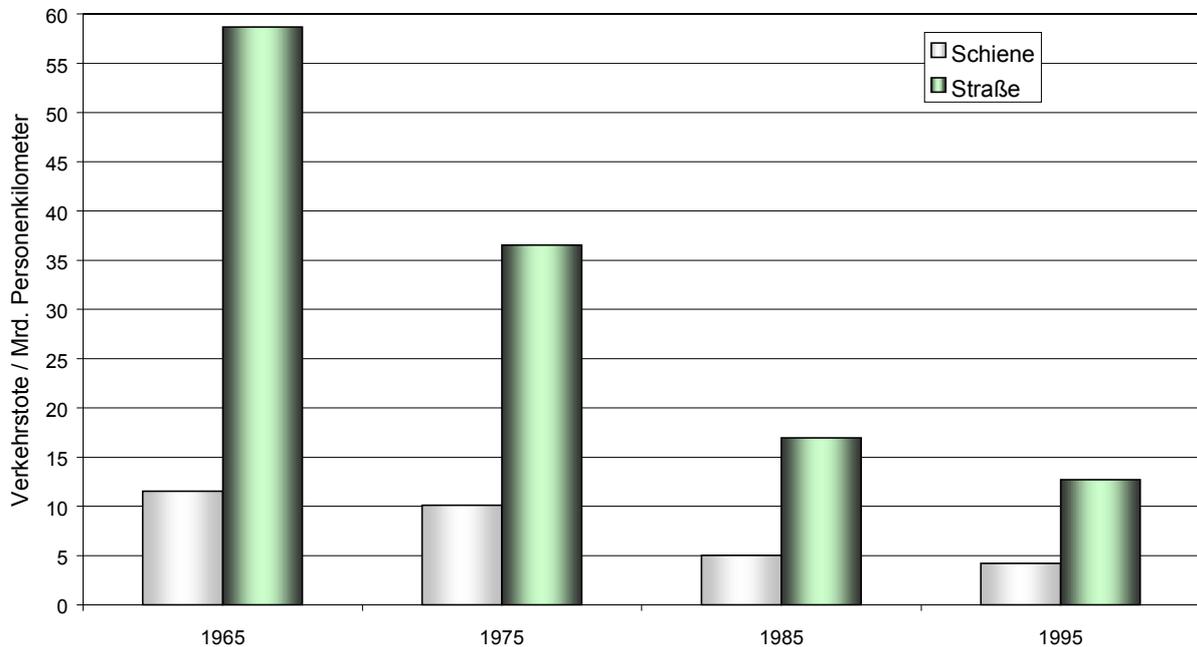


Abbildung 3.2: Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf die Verkehrsleistung (Mrd. Personenkilometer) [25] S. 174; [26] S. 211; [27] S. 366; [28] S. 286; [29] S. 314; [30] S. 325

3.3.2 Getötete Personen im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden

Werden die tödlich Verunglückten beider Verkehrsträger auf die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden bezogen (Abbildung 3.3), so ist für den Straßenverkehr ein eindeutiger Trend hinsichtlich einer verringerten Zahl von getöteten Personen bei Straßenverkehrsunfällen zu erkennen. Dagegen zeichnet sich für den Schienenverkehr ein uneinheitliches Bild, wobei die Werte deutlich über denen des Straßenverkehrs liegen. Bei einem Schienenverkehrsunfall mit Personenschaden ist also die Wahrscheinlichkeit, dass dabei Personen tödlich verletzt werden, gegenüber dem Straßenverkehr signifikant größer. Dies liegt nicht nur an der größeren Anzahl von Reisenden im Zug gegenüber der Zahl der PKW-Insassen, sondern ist auch auf die erst ansatzweise erkennbaren passiven Sicherheitsmaßnahmen im Schienenverkehr zurückzuführen.

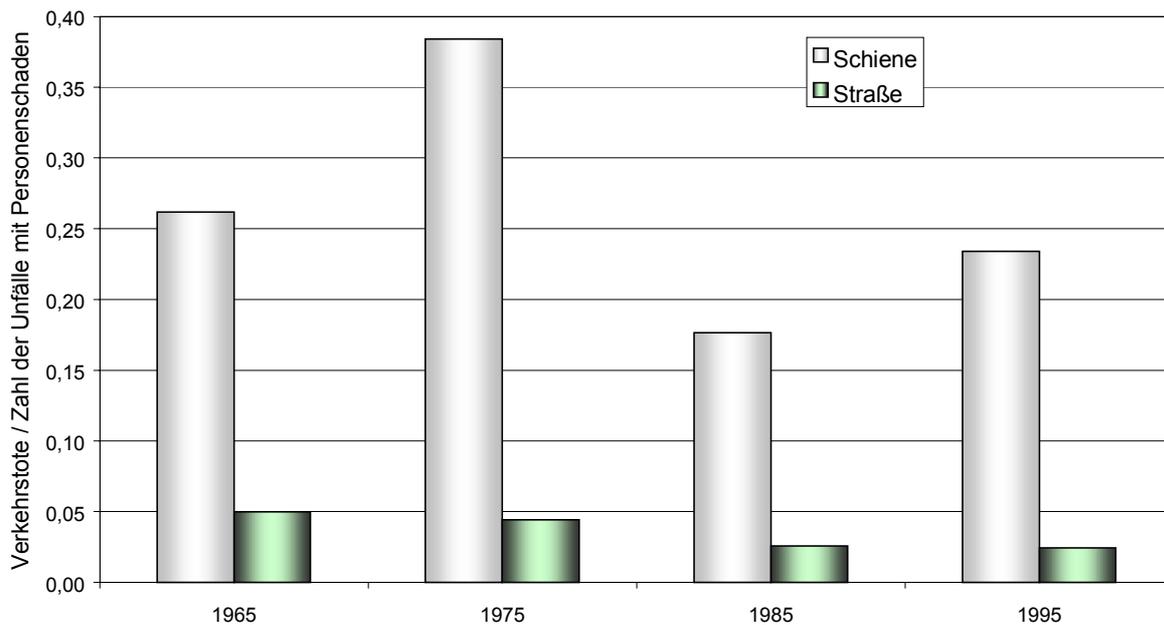


Abbildung 3.3: Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf die Zahl der Unfälle mit Personenschaden [27] S. 366; [28] S. 286; [29] S. 314; [30] S. 325

3.3.3 Getötete Personen im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf die Gesamtanzahl der Fahrzeuge

In Abbildung 3.4 ist die Zahl der im Straßen- und Schienenverkehr im Zeitraum von 1965 bis 1995 getöteten Personen in Relation zur Anzahl der Fahrzeuge beider Verkehrsträger dargestellt. Auch hier ist ein deutlicher Trend im Straßenverkehr zu erkennen: Gegenüber 1965 hat sich die Zahl der getöteten Personen mit Bezug auf die Gesamtzahl der Fahrzeuge im Jahr 1995 um ca. 85% reduziert, wobei sich die Zahl der Unfalltoten um ca. 40% verringert hat, bei gleichzeitiger Vervierfachung des Fahrzeugbestandes.

Im Schienenverkehr hat sich diese positive Entwicklung nicht in gleicher Form vollzogen. Zwar ist auch hier die Zahl der Verkehrstoten zwischen 1965 und 1995 auf ca. 60% reduziert worden. Aufgrund einer Verringerung des Fahrzeugbestandes im gleichen Zeitraum um ca. 20% hat sich die Zahl der Verkehrstoten im Schienenverkehr bezogen auf die Anzahl der Fahrzeuge nur um ca. 20% reduziert.

Daraus lässt sich für 1995 ableiten, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Schienenfahrzeug während seiner Lebensdauer mit tödlich Verunglückten in Zusammenhang zu bringen ist, gegenüber einem Kraftfahrzeug etwa fünfmal größer ist. Es ist also durchaus sinnvoll, fahrzeugseitige Maßnahmen der passiven Sicherheit zu entwickeln, um ein höheres Sicherheitsniveau zu erzielen.

Die hohe Effizienz von passiven Sicherheitsmaßnahmen bei Schienenfahrzeugen des Personenfernverkehrs lässt sich auch anhand vergleichbarer Kenndaten von PKW und Schienenfahrzeug ableiten [26]:

Laufleistung (Schienenfahrzeug – PKW):	ca. 8 : 1
Anzahl der Sitzplätze (Schienenfahrzeug – PKW):	ca. 10: 1
Lebensdauer (Schienenfahrzeug – PKW):	ca. 3 : 1

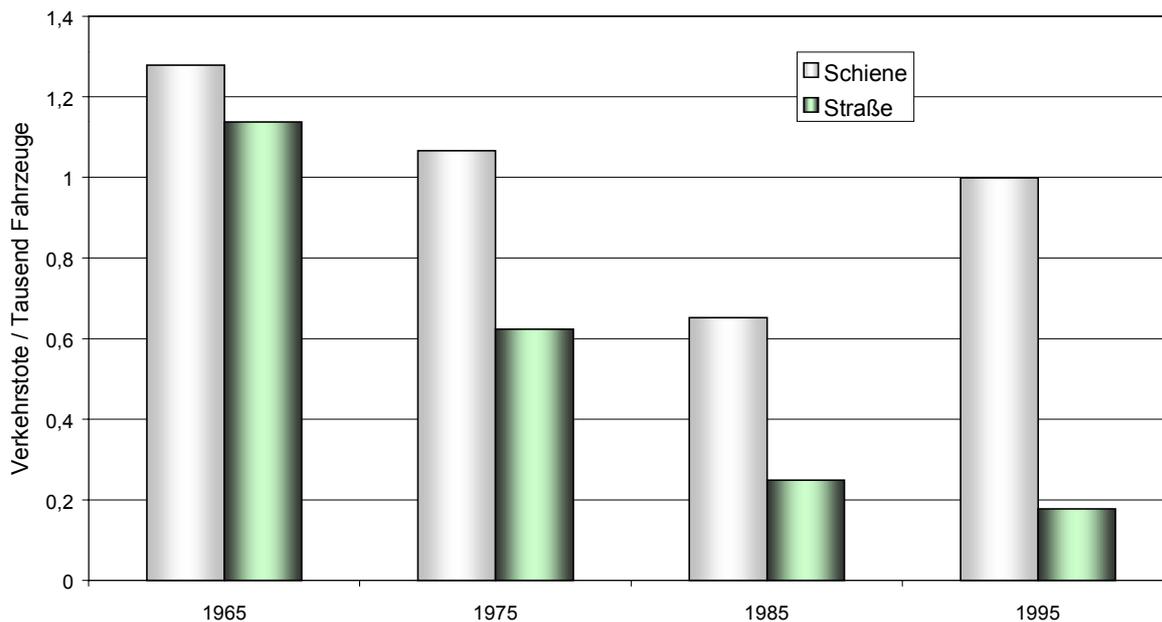


Abbildung 3.4: Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf die Gesamtanzahl an Fahrzeugen (Tausend Fahrzeuge) [27] S. 366; [28] S. 286; [29] S. 314; [30] S. 325; [31]

3.4 Mittelfristige Entwicklung spezifischer Unfallzahlen von 1991 bis 1998 - Vergleich zwischen Straßen- und Schienenverkehr

3.4.1 Getötete Personen im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung

In [Abbildung 3.5](#) und [Abbildung 3.6](#) ist die mittelfristige Entwicklung der Zahl der tödlich Verunglückten im Straßen- und Schienenverkehr in Relation zum Verkehrsaufkommen und zur Verkehrsleistung im Zeitraum von 1991 bis 1998 dargestellt. Es ergibt sich hier ein ähnliches Bild wie bei langfristiger Betrachtung (siehe Abschnitt 3.3.1). Insbesondere in Relation zur Anzahl der beförderten Personen nähert sich der spezifische Wert der tödlich Verunglückten im Straßenverkehr immer mehr dem des Schienenverkehrs an. Im Jahr 1998 war im Schienenverkehr die Zahl der getöteten Personen bezogen auf das Verkehrsaufkommen gegenüber dem Straßenverkehr aufgrund des ICE - Unfalls bei Eschede erstmals größer.

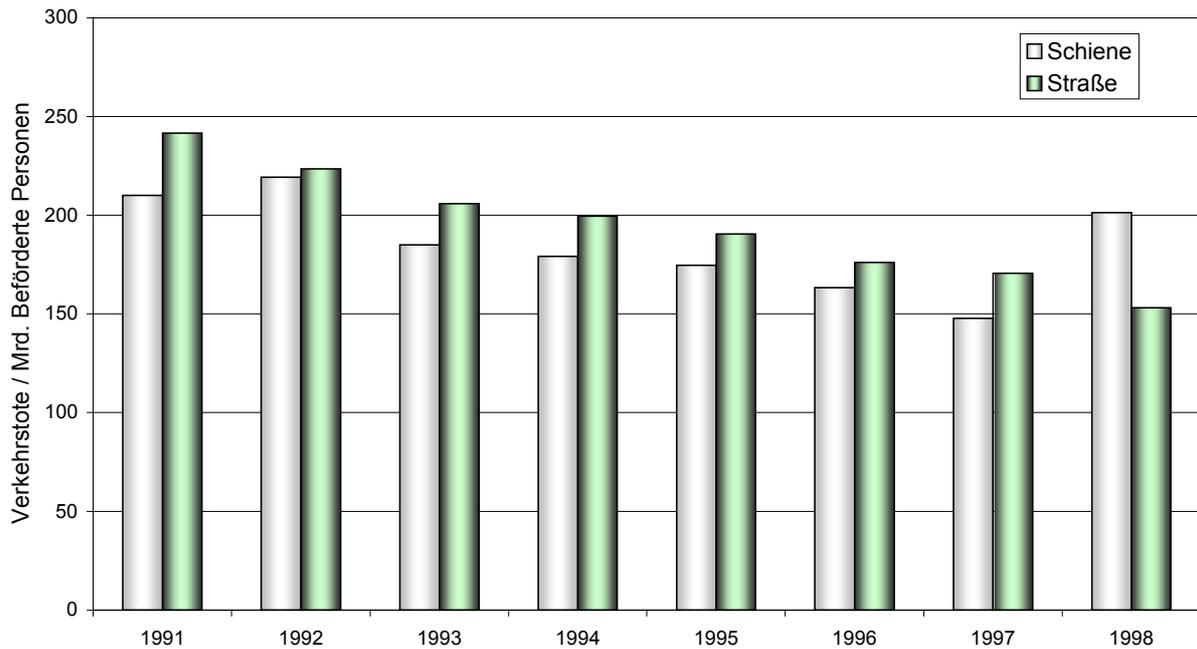


Abbildung 3.5: Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf das Verkehrsaufkommen (Mrd. Beförderte Personen) [26] S.209; [30] S. 325; [31]

Bezogen auf die Verkehrsleistung verunglücken im Schienenverkehr aufgrund der größeren Reiseweite gegenüber dem Straßenverkehr nach wie vor deutlich weniger Personen tödlich. Auf jeden gefahrenen Personenkilometer kommen im Straßenverkehr im Vergleich zum Schienenverkehr ca. 2 bis 3 mal mehr Verkehrstote.

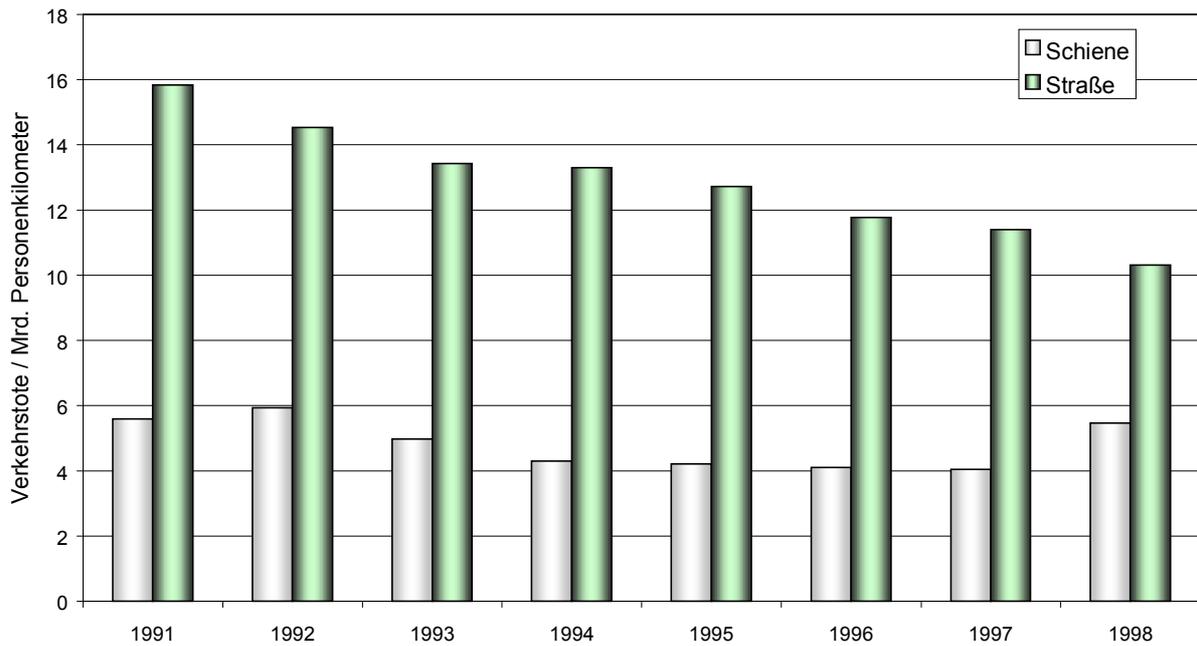


Abbildung 3.6: Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf die Verkehrsleistung (Mrd. Personenkilometer) [26] S.211; [30] S. 325; [31]

3.4.2 Getötete Personen im Straßen- und Schienenverkehr (Schienenverkehr: nur Reisende) bezogen auf die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden

In Abbildung 3.7 werden die im Schienenverkehr getöteten Reisenden den Verkehrstoten im Straßenverkehr in Relation zur Anzahl der Unfälle mit Personenschaden gegenübergestellt. Für den Schienenverkehr lässt sich im Zeitraum von 1991 bis 1998 eher ein negativer Trend ablesen. Dagegen reduziert sich die Zahl der tödlich Verunglückten im Straßenverkehr bezogen auf die Anzahl der Fahrzeuge kontinuierlich. In den Jahren 1997 und 1998 kann sogar von einer deutlichen Differenz zwischen beiden Verkehrsträgern zuungunsten des Schienenverkehrs gesprochen werden – im Jahr 1998 ist der signifikante Unterschied insbesondere auf den bereits erwähnten ICE - Unfall bei Eschede zurückzuführen. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Schienenfahrzeugunfall mit Personenschaden ein Reisender tödlich verletzt wird deutlich höher im Vergleich zur Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Straßenverkehrsunfall mit Personenschaden eine Person tödlich verunglückt.

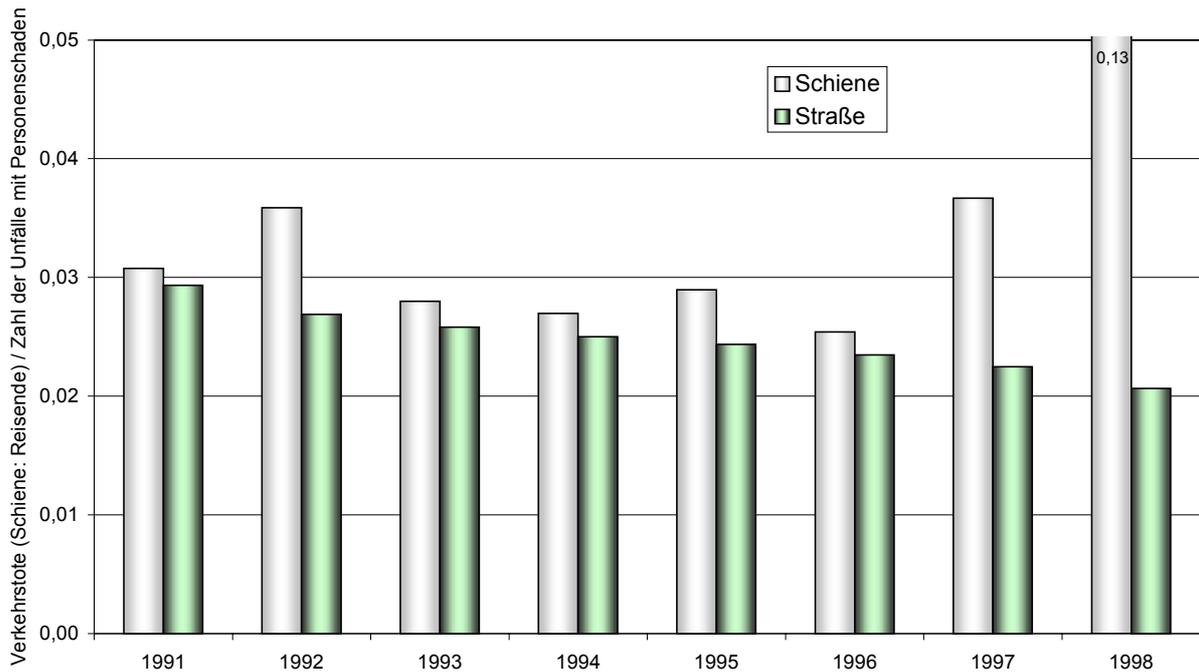


Abbildung 3.7: Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr (Schienenverkehr: nur Reisende!) bezogen auf die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden [30] S. 325; [31]

3.4.3 Getötete Personen im Straßen- und Schienenverkehr (Schienenverkehr: nur Reisende) bezogen auf die Gesamtzahl an Fahrzeugen

Werden die im Schienenverkehr getöteten Reisenden den Verkehrstoten im Straßenverkehr in Relation zur Gesamtanzahl an Fahrzeugen gegenübergestellt ([Abbildung 3.8](#)), bietet sich ein ähnliches Bild wie in Abschnitt 3.4.2: Während die Zahl der im Straßenverkehr in Bezug auf die Fahrzeuganzahl tödlich Verunglückten im Zeitraum von 1991 bis 1998 monoton abnimmt, ist auch hier ein eher negativer Trend für den Schienenverkehr zu erkennen. In den Jahren 1997 und 1998 ist die Zahl der im Schienenverkehr tödlich verunglückten Reisenden bezogen auf die Fahrzeuganzahl im Vergleich zu den im Straßenverkehr Getöteten sogar erstmals größer. Daraus lässt sich die Aussage ableiten, dass die Wahrscheinlichkeit größer ist, dass durch ein Schienenfahrzeug ein Reisender tödlich verletzt wird, als dass eine Person durch ein Kraftfahrzeug getötet wird. Wenn dabei noch die Lebensdauer von Schienenfahrzeugen berücksichtigt wird, die um den Faktor 3 bis 4 höher liegt als bei einem Kraftfahrzeug, so verschlechtert sich das Verhältnis zuungunsten des Schienenverkehrs zusätzlich.

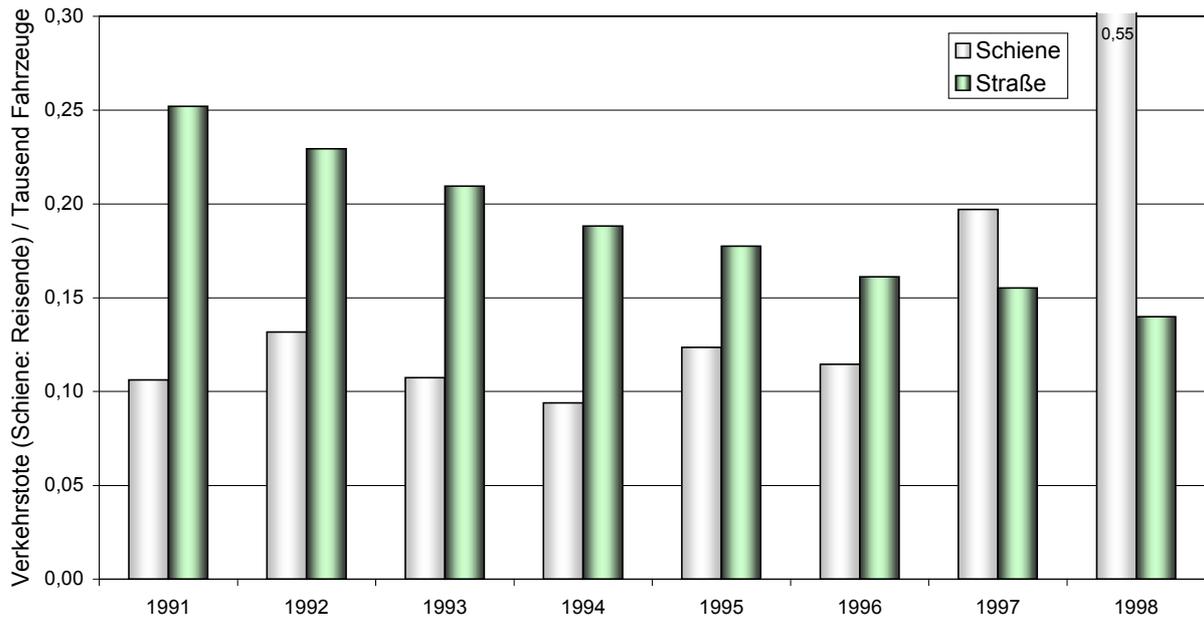


Abbildung 3.8: Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr (Schienenverkehr: nur Reisende!) bezogen auf die Gesamtanzahl an Fahrzeugen (Tausend Fahrzeuge) [30] S. 325; [31]

3.5 Resümee der Unfallbilanz

Der lang- und mittelfristige Vergleich spezifischer Unfallzahlen des Straßen- und Schienenverkehrs zeigt, dass der Straßenverkehr die Unfallsicherheit in den zurückliegenden Jahren deutlich verbessern konnte. Der systemimmanente Vorteil der Bahn einer insbesondere gegenüber dem Straßenverkehr vergleichsweise hohen Sicherheit ist heute nahezu aufgebraucht bzw. hat sich sogar ins Gegenteil verkehrt, wenn die absoluten Unfallzahlen in Relation zu der Zahl der Unfälle mit Personenschaden und Fahrzeuganzahl gesetzt werden.

Nicht vergessen werden sollte jedoch, dass nach wie vor im Straßenverkehr ca. 30 mal mehr Personen getötet werden als im Schienenverkehr. Doch gerade bei der im Vergleich zum Straßenverkehr geringen Anzahl von Schienenfahrzeugen für den Personenverkehr ist es sinnvoll, Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit im Schienenverkehr zu entwickeln und umzusetzen.

4 Risikoanalyse der Unfälle im Schienenfernverkehr

4.1 Zielsetzung

Zur Spezifikation von Maßnahmen zur Verbesserung der passiven Sicherheit von Schienenfahrzeugen im Personenfernverkehr ist es notwendig, die hier auftretenden Unfälle mit Personenschaden hinsichtlich Unfallhäufigkeit und Schadenausmaß zu analysieren. Dies soll anhand einer Risikoklassifikation mit Hilfe einer modifizierten Form der Norm DIN EN 50126 "Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (RAMS)" [32] erfolgen. Da für den Schienenverkehr eine dem Straßenverkehr vergleichbare Unfalldatenbank nicht vorhanden ist, werden hierfür Unfalldaten der Statistik über Bahnbetriebsunfälle des Statistischen Bundesamtes in Wiesbaden [33] und eine Analyse von Bahnbetriebsunfällen der TU Dresden [23] für die Risikoanalyse aufbereitet.

4.2 Bahnbetriebsunfälle mit Personenschaden in der BRD von 1991 bis 1998

Vom Statistischen Bundesamt in Wiesbaden werden jährlich die Bahnbetriebsunfälle mit Personenschaden einschließlich Rangierunfälle erfasst. Das Statistische Bundesamt führt hierzu aus: „Zu erfassen und zu melden sind alle Verkehrsunfälle mit Personenschaden, bei denen mindestens ein bewegtes – beim Zusammenprall auch haltendes – Eisenbahnfahrzeug im Fahr- und Rangierbetrieb auf den gewidmeten Strecken und Anlagen der Eisenbahnen beteiligt ist.“ Es erfolgt eine Zuordnung der Anzahl der Unfälle und der Zahl der dabei verunglückten Personen (Reisende, Bahnbedienstete und Bahnfremde) nach sog. **Ereignisarten**: Entgleisungen, Zusammenstoß, Aufprall auf Gegenstände, Zusammenprall mit Wegbenutzern, persönliche Unfälle einschl. Rottenunfälle und sonstige Bahnbetriebsunfälle.

In Anhang B sind die Definitionen der betrachteten **Ereignisarten**, gemäß der Zuordnung durch das Statistische Bundesamt, aufgeführt.

Abbildung 4.1 stellt die prozentualen Anteile der einzelnen Ereignisarten an der Gesamtzahl der erfassten Bahnbetriebsunfälle in den Zeiträumen 1991 bis 1997 und 1991 bis 1998 dar. Es werden absichtlich beide Zeiträume gegenübergestellt, um den Einfluss des ICE-Unfalls 1998 bei Eschede auf die Statistik zu berücksichtigen. Es ist zu erkennen, dass zwischen beiden Abbildungen keine nennenswerten Unterschiede bestehen. Über die Hälfte der erfassten Bahnbetriebsunfälle müssen der Ereignisart "Persönliche Unfälle" zugeordnet werden. Etwa ein Viertel der Bahnbetriebsunfälle sind der Ereignisart "Zusammenprall mit Wegbenutzern" zuzuordnen. Die Ereignisarten "Entgleisungen", "Zusammenstoß" und "Aufprall auf Gegenstände" machen 14 % der Bahnbetriebsunfälle aus⁹.

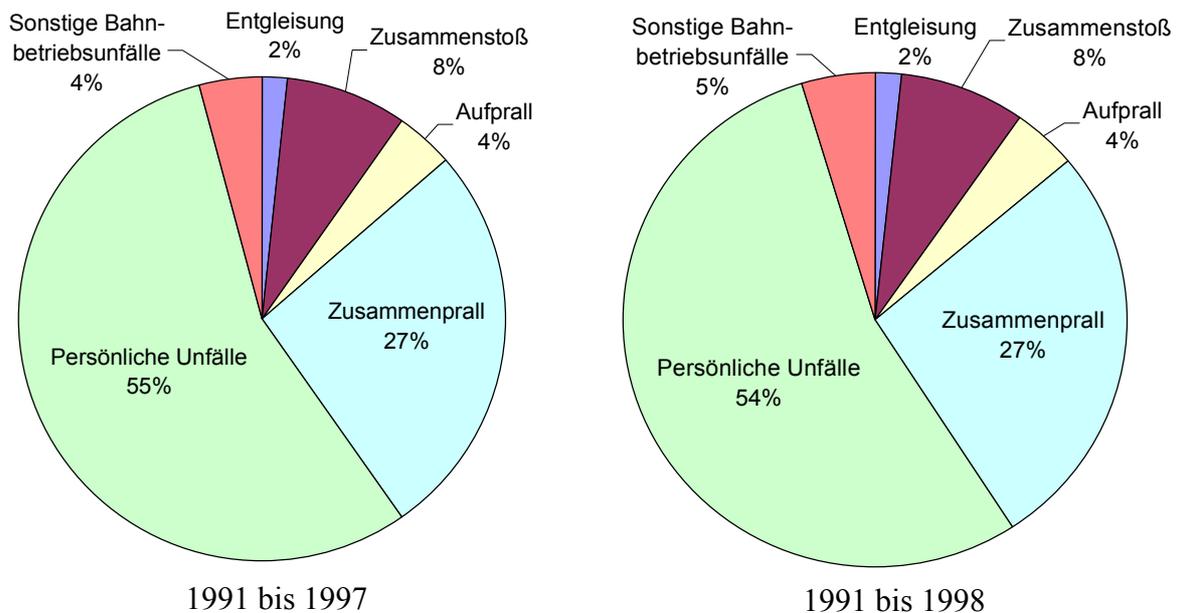


Abbildung 4.1: Unfälle mit Personenschaden im Schienenverkehr nach Ereignisarten

⁹ Anmerkung: Bei der Ereignisart „Zusammenprall“ (Kollisionen von Schienenfahrzeugen mit Straßenverkehrsteilnehmern an Bahnübergängen) ist in der Regel der Straßenverkehrsteilnehmer der Unfallverursacher.

In Abbildung 4.2 ist der relative Anteil der bei Bahnbetriebsunfällen in den Zeiträumen 1991 bis 1997 und 1991 bis 1998 getöteten Reisenden und Bahnbediensteten, zugeordnet den einzelnen Ereignisarten, dargestellt. Da der Unfall bei Eschede mit 101 getöteten Reisenden und Bahnbediensteten und der primären Unfallursache einer Entgleisung unter der Ereignisart "Entgleisungen" in der Statistik der Bahnbetriebsunfälle erfasst ist, sind deutliche Unterschiede im Vergleich beider Grafiken festzustellen. Eine alleinige Betrachtung des Zeitraumes 1991-1998 würde also zu Fehlinterpretationen führen. Grundsätzliche Aussagen sind aber bei beiden Abbildungen zu entnehmen: Der weitaus überwiegende Anteil der bei Bahnbetriebsunfällen getöteten Reisenden und Bahnbediensteten ist auf die Ereignisart "Persönliche Unfälle" zurückzuführen (81% bzw. 66%). Der Anteil der getöteten Reisenden und Bahnbediensteten, der den Ereignisarten "Entgleisungen", "Zusammenstoß", "Aufprall auf Gegenstände" und "Zusammenprall mit Wegbenutzern" zuzuordnen ist, beträgt dagegen nur 15% bzw. 28%. Lässt man den ICE - Unfall bei Eschede unberücksichtigt, ist der größte Teil der in diesen Ereignisarten getöteten Reisenden und Bahnbediensteten auf die Ereignisart "Zusammenstoß" zurückzuführen.

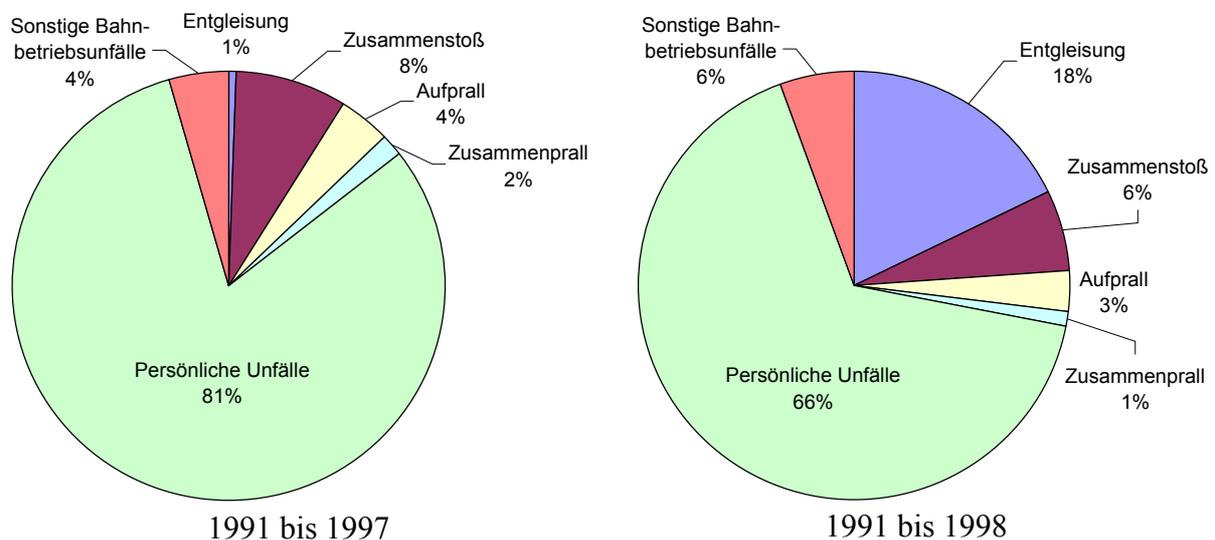


Abbildung 4.2: Getötete Reisende und Bahnbedienstete im Schienenverkehr nach Ereignisarten

Abbildung 4.3 zeigt die den einzelnen Ereignisarten zugeordneten relativen Anteile der bei Bahnbetriebsunfällen in den Zeiträumen 1991 bis 1997 und 1991 bis 1998 verletzten Reisenden und Bahnbediensteten. Bemerkenswert ist, dass beim Vergleich der beiden Grafiken keine nennenswerten Unterschiede festzustellen sind, der Einfluss des Eschede-Unfalls also vernachlässigt werden kann. Etwa die Hälfte der bei Bahnbetriebsunfällen verletzten Reisenden und Bahnbediensteten ist auch hier der Ereignisart "Persönliche Unfälle" zuzuordnen (49% bzw. 48%). Die Ereignisarten "Entgleisungen", "Zusammenstoß", "Aufprall auf Gegenstände" und "Zusammenprall mit Wegbenutzern" entsprechen der Summe von 46% der verletzten Reisenden und Bahnbediensteten. Nahezu ein Drittel (30% bzw. 29%) der Verletzungen sind auf die Ereignisart "Zusammenstoß" zurückzuführen.

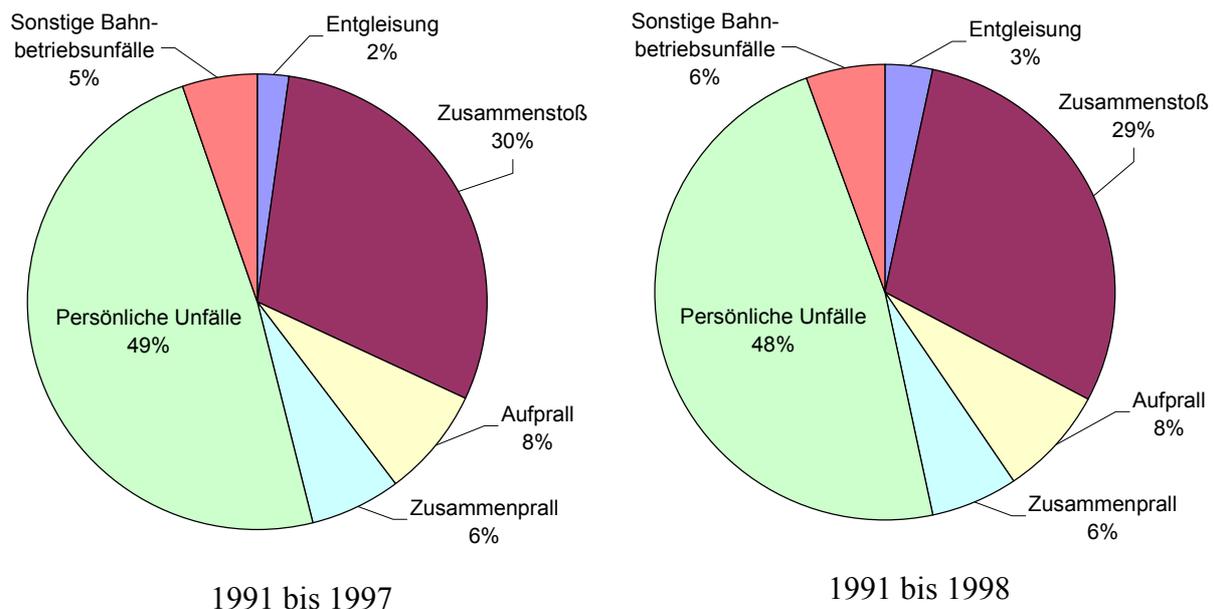


Abbildung 4.3: Verletzte Reisende und Bahnbedienstete im Schienenverkehr nach Ereignisarten

4.3 Schlußfolgerungen

Aus dem Vergleich der den einzelnen Ereignisarten zuzuordnenden Bahnbetriebsunfälle und der dabei getöteten bzw. verletzten Reisenden und Bahnbediensteten in den Zeiträumen 1991 bis 1997 und 1991 bis 1998 lassen sich zusammenfassend folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Über die Hälfte der Bahnbetriebsunfälle sind der Ereignisart "Persönliche Unfälle" zuzuordnen; der Anteil der bei "Persönlichen Unfällen" getöteten Reisenden und Bahnbediensteten ist aber wesentlich höher, als es die Relation zur Anzahl der Bahnbetriebsunfälle vermuten lässt.
- Etwa ein Viertel der Bahnbetriebsunfälle stehen im Zusammenhang mit der Ereignisart "Zusammenprall mit Wegbenutzern"; diese Ereignisart besitzt aber in Bezug auf die getöteten bzw. verletzten Reisenden und Bahnbediensteten eine untergeordnete Bedeutung.
- Die beiden anderen typischen Kollisionsszenarien "Zusammenstoß" und "Aufprall auf Gegenstände" sind nur mit 12% der Bahnbetriebsunfälle in Zusammenhang zu bringen; ihr Anteil an der Zahl der getöteten Reisenden und Bahnbediensteten ist gleichermaßen gering; dagegen ist über ein Drittel der verletzten Reisenden und Bahnbediensteten diesen beiden Ereignisarten zuzuordnen.
- Bei Nichtberücksichtigung des Eschede - Unfalls kann die Ereignisart "Entgleisungen" sowohl in Bezug auf die Zahl der Bahnbetriebsunfälle, als auch auf die dabei getöteten bzw. verletzten Reisenden und Bahnbediensteten vernachlässigt werden.
- Etwa die Hälfte der bei Bahnbetriebsunfällen verletzten Reisenden und Bahnbediensteten ist den Kollisionsszenarien "Zusammenstoß", "Aufprall auf Gegenstände" und "Zusammenprall mit Wegbenutzern" sowie der Ereignisart "Entgleisungen" zuzuordnen.

Für die Analyse der Bahnbetriebsunfälle werden nur die Ereignisarten Entgleisungen, Zusammenstoß, Aufprall auf Gegenstände und Zusammenprall mit Wegbenutzern betrachtet. Die Ereignisart „Persönliche Unfälle“, die u. a. auch Unfälle mit Personenschaden infolge von Gefahren- bzw. Notbremsungen erfasst, wäre für eine Auswertung hinsichtlich passiver Sicherheit ebenfalls von Interesse. Da hier die Unfallstatistik keine Differenzierung zwischen dieser Unfallursache und z.B. Unfällen beim Ein-/Aussteigen oder Unfällen unter Alkohol-

bzw. Drogeneinfluss zulässt, wird diese Ereignisart nicht berücksichtigt.¹⁰ Ebenfalls nicht berücksichtigt wird die Ereignisart „Sonstige Bahnbetriebsunfälle“, die eher unter dem Aspekt aktiver Sicherheitsmaßnahmen zu betrachten ist.

4.4 Risikoklassifikation der Bahnbetriebsunfälle mit Hilfe einer modifizierten Form der DIN EN 50126

4.4.1 Einführung

Die Norm DIN EN 50126 "...erfasst die Grundaspekte der Sicherheit für Bahneinsätze, ihre Systeme, Untersysteme und Betriebsvorgänge ..." [32].

Wichtigster Bestandteil dieser Norm ist ein Sicherheitsprozess, der den Ablauf der Sicherheitsaktivitäten definiert und die Sicherheit für ein Bahnsystem sowie deren Nachweis spezifiziert. Er basiert auf dem Begriff des Risikos, seiner Schätzung und Kontrolle. Die DIN EN 50126 kann damit die Grundlage für eine Risikobeurteilung des Bahnbetriebs bilden.

Die mit dieser Norm durchzuführende Risikoschätzung beruht auf einer Gefahrenerkennung und -analyse, in der jede erkannte Gefahr einer Schadensausmaßkategorie zugeordnet werden muss, sowie einer verbalen Beschreibung der Eintrittswahrscheinlichkeit für diese Gefahr. Unter Verwendung des Schadensausmaßes und der Wahrscheinlichkeit des Ereignisses wird eine Risikoklassifikationsmatrix erzeugt, die das Risiko eines abzuwickelnden Sicherheitsprozesses in vier verbale Klassen einteilt.

¹⁰ Die Ereignisart „Persönliche Unfälle“ stellt im betrachteten Zeitraum jeweils den größten Anteil an getöteten und verletzten Personen. Bezogen auf die dabei getöteten Personen ist vor allem die Personengruppe „Bahnfremde“ betroffen, was darauf schließen lässt, daß es sich hier vor allem um Personen handelt, die ohne Selbsttötungsabsicht z.B. unter Alkohol- bzw. Drogeneinfluss in den Gleisbereich geraten und dabei tödlich verletzt werden. Bezogen auf die in dieser Ereignisart verletzten Personen ist vor allem die Personengruppe „Reisende“ betroffen, so daß davon auszugehen ist, daß es sich hierbei vor allem um Reisende handelt, die sich beim Ein-/ Aussteigen und bei Not- bzw. Gefahrenbremsungen verletzt.

4.4.2 Schadensausmaßkategorien

In den Schadensausmaßkategorien werden die Folgen von Unfällen, die von einer Gefahr oder einer Folge von Gefahren herrühren könnten, mit Hilfe mehrerer Kategorien in qualitativer Form beschrieben. Für die Analyse der Bahnbetriebsunfälle wurden die in der Norm DIN EN 50126 beschriebenen vier Schadensausmaßkategorien unter Berücksichtigung der zugänglichen Unfalldaten modifiziert (Tabelle 4.1). Insbesondere werden bei der Begriffsdefinition nur die Folgen in Bezug auf **Reisende und Bahnbedienstete**, nicht aber bahnfremde Personen berücksichtigt.

In der Norm werden auch die Folgen für die Dienstleistung erfasst, die hier der Vollständigkeit halber mit aufgeführt sind. Aufgrund der hierfür fehlenden Daten kann eine diesbezügliche Analyse der Bahnbetriebsunfälle nicht vorgenommen werden.

Tabelle 4.1: Modifizierte Schadensausmaßkategorien in Anlehnung an DIN EN 50126

Kategorie	Verbale Beschreibung	Definition	
		Folgen für Reisende und Bahnbedienstete	Folgen für Dienstleistungen
4	katastrophal	mehrere Unfalltote und/oder zahlreiche Schwerverletzte	- ¹¹
3	kritisch	einzelner Unfalltoter oder einzelner Schwerverletzter	Verlust eines Hauptsystems
2	marginal	mehrere Leichtverletzte	schwerer Schaden an einem System (an Systemen)
1	unbedeutend	einzelner Leichtverletzter	Schaden am System

4.4.3 Wahrscheinlichkeitsniveaus

Zur Durchführung der Analyse muss mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsniveaus die Eintrittsrate einer Gefahr oder einer Gefahrenfolge vergleichend beschrieben werden. Dabei wird das unerwünschte Ereignis einem Wahrscheinlichkeitsniveau zugeordnet, wobei je nach Anwen-

¹¹ Anmerkung: Hinsichtlich der Kategorie 4 (katastrophal) werden die Folgen für Dienstleistungen in der DIN EN 50126 nicht explizit definiert.

dung auch eine quantitative Zuordnung der einzelnen Niveaus in Übereinstimmung mit dem Sicherheitsniveau des Gesamtzieles erfolgen kann.

In der DIN EN 50126 wird die quantitative Zuordnung der Wahrscheinlichkeitsniveaus in Relation zu den zu leistenden Betriebsstunden in Form der Eintrittswahrscheinlichkeit pro Betriebsstunde vorgenommen. Die vorliegenden statistischen Angaben lassen eine derartige Quantifizierung nicht zu, so dass bei der Analyse der Bahnbetriebsunfälle davon abgewichen wird. Die verbale Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsniveaus erfolgt auf der Basis des Bestandes an Fahrzeugen für die Personenbeförderung. Unter Berücksichtigung des **Lebenszyklus von Schienenfahrzeugen von 30 Jahren** wird die Eintrittswahrscheinlichkeit pro Fahrzeug für die Personenbeförderung zum Quantifizieren der Wahrscheinlichkeitsniveaus in Form einer absoluten Unfallhäufigkeit (ausschließlich Unfälle mit Folgen für Reisende und Bahnbedienstete) verwendet. Eine ermittelte durchschnittliche Zahl von **22.000 Fahrzeugen für den Personenverkehr** (siehe Anhang A) nach [31] innerhalb des Zeitraumes von 1991 bis 1995 wird dabei über den Lebenszyklus als konstant angenommen.

Die einzelnen Wahrscheinlichkeitsstufen mit der entsprechenden quantifizierten Zuordnung der absoluten Unfallhäufigkeiten sind in Tabelle 4.2 beschrieben.

Tabelle 4.2: Modifizierte Wahrscheinlichkeitsniveaus in Anlehnung an DIN EN 50126

Niveau	Beschreibung	Begriffe	Definition der absoluten Unfallhäufigkeit
A	häufig	vermutlich häufig eintretend; die Gefahr wird ständig vorhanden sein	mehr als 50 Ereignisse in 30 Jahren
B	wahrscheinlich	wird mehrmals eintreten; es ist zu erwarten, dass die Gefahr häufig eintritt	5 bis 50 Ereignisse in 30 Jahren
C	manchmal	kann mehrmals eintreten; es ist zu erwarten, dass die Gefahr mehrere Male eintritt	0,5 bis 5 Ereignisse in 30 Jahren
D	kaum	vermutlich irgendwann während des Lebenszyklus des Systems eintretend; Eintreten kann sinnvollerweise erwartet werden	$5 \cdot 10^{-3}$ bis 0,5 Ereignisse in 30 Jahren
E	unwahrscheinlich	unwahrscheinlich, aber möglicherweise eintretend; es darf angenommen werden, dass die Gefahr ausnahmsweise eintritt	$5 \cdot 10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-3}$ Ereignisse in 30 Jahren

4.4.4 Risikoklassifikationsmatrix

Mit Hilfe der Risikoklassifikationsmatrix kann jeder Gefahr eine Risikoklasse zugeordnet werden. Dabei werden das Schadensausmaß einer Gefahr, das nach Schadensausmaßkategorien klassifiziert ist, und die Eintrittswahrscheinlichkeit der Gefahr, die nach den Wahrscheinlichkeitsniveaus klassifiziert ist, miteinander kombiniert. Innerhalb der Risikoklassifikationsmatrix können nach DIN EN 50126 vier Bereiche definiert werden, die einer verbalen Risikoklassifikation zuzuordnen sind (Tabelle 4.3). Anhand dieser Kriterien können die erforderlichen Maßnahmen für jede Gefahr spezifiziert werden.

Tabelle 4.3: Risikoklassifikationsmatrix nach DIN EN 50126

Wahrscheinlichkeitsniveau	Risikoklassifikationsmatrix			
Häufig	nicht akzeptabel			
Wahrscheinlich				
Manchmal	unerwünscht			
Kaum				
Unwahrscheinlich	akzeptabel			
Äußerst unwahrscheinlich				
	vernachlässigbar			
	katastrophal (4)	kritisch (3)	marginal (2)	unbedeutend (1)
	Schadensausmaßkategorie			

Für jedes betrachtete Ereignis wird eine eigene Risikoklassifikationsmatrix erstellt, in der das Risiko als Punkt dargestellt wird. In Abhängigkeit von der Position des Punktes kann dem Ereignis eine Risikoklasse in verbaler Form zugeordnet werden. Die Definition der vier Risikoklassen ist in Tabelle 4.4 aufgeführt.

Tabelle 4.4: Verbale Risikoklassifikation nach DIN EN 50126

Beschreibung	Definition
nicht akzeptabel	muss ausgeschlossen werden
unerwünscht	darf nur akzeptiert werden, wenn eine Risikominderung praktisch nicht durchführbar ist und die Zustimmung der Sicherheitsleitstelle vorliegt
akzeptabel	kann bei entsprechender Überwachung und Zustimmung der Sicherheitsleitstelle akzeptiert werden
vernachlässigbar	kann bei Zustimmung der Sicherheitsleitstelle akzeptiert werden

Mit den beschriebenen Definitionen für die Schadensausmaßkategorien und Wahrscheinlichkeitsniveaus werden im Folgenden Risikoklassifikationsmatrizen für die Ereignisarten "Entgleisung", "Zusammenstoß", "Aufprall auf Gegenstände" und "Zusammenprall mit Wegbenutzern" erstellt. Abweichend von der Norm DIN EN 50126 wird das Risiko für die jeweilige Ereignisart nicht durch einen Punkt innerhalb der Matrix, sondern als prozentualer Anteil der einzelnen Schadensausmaßkategorien in Relation zur Summe der in dieser Ereignisart erfassten Unfälle mit Folgen für Reisende und Bahnbedienstete dargestellt.

Die den einzelnen Risikoklassifikationsmatrizen zugrunde liegenden statistischen Daten (Unfallhäufigkeit, Schadensausmaß) zu den erfassten Bahnbetriebsunfällen mit getöteten und/oder verletzten Reisenden und Bahnbediensteten im Zeitraum von 1991 bis 1995 sind nach Ereignissen geordnet in Tabelle 4.5 aufgeführt.

Tabelle 4.5: Erfasste Bahnbetriebsunfälle mit getöteten und/oder verletzten Reisenden und Bahnbediensteten im Zeitraum von 1991 bis 1995

Ereignis	Zahl der Unfälle	Unfälle in 30 Jahren/Personenfahrzeug	Zahl der Getöteten	Zahl der Verletzten	Schadensausmaß (Absolut und in Prozent)							
					katastrophal (4)		kritisch (3)		marginal (2)		unbedeutend (1)	
Entgleisung	11	0,003	0	25	0	0%	0	0%	8	73%	3	27%
Zusammenstoß	66	0,0018	16	733	13	20%	13	20%	28	42%	12	18%
Aufprall	70	0,0019	10	266	3	4%	8	11%	20	29%	39	56%
Zusammenprall	81	0,0022	5	213	2	2%	15	19%	25	31%	39	48%
Gesamt:	228	---	31	1237	18	8%	36	16%	81	36%	93	41%

4.4.5 Risikoklassifikation für die Ereignisart "Entgleisung"

Für das Ereignis "Entgleisung", das in Bezug auf die Unfallhäufigkeit als "unwahrscheinlich" einzustufen ist, gibt es im betrachteten Zeitraum keine Unfälle, die den Schadensausmaßkategorien "katastrophal" bzw. "kritisch" zuzuordnen sind. Über 70 % der Entgleisungen hatten minder schwere Konsequenzen für die Fahrgäste und das Personal, etwa ein Viertel der Unfälle sind hinsichtlich ihres Schadensausmaßes zu vernachlässigen. Aus der Risikoklassifikationsmatrix lässt sich für das Ereignis "Entgleisung" ableiten, dass das daraus resultierende Risiko für Fahrgäste und Personal zu vernachlässigen ist (Tabelle 4.6).

An dieser Stelle wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Unfälle bei Eschede (1998) und Brühl (2000), die der Schadensausmaßkategorie "katastrophal" zugeordnet werden müssen, in der Risikoklassifikation nicht berücksichtigt werden. Obwohl das katastrophale Schadensausmaß für Fahrgäste und Personal nicht mit dem Primärereignis "Entgleisung", sondern mit dem sekundären Aufprall auf Hindernisse (Eschede: Brückenpfeiler, Brühl: Bahnhofsbauten) im Zusammenhang steht, werden beide Unfälle in der Statistik der Bahnbetriebsunfälle dem primären Ereignis "Entgleisung" zugeordnet. Bei Berücksichtigung dieser schweren Unfälle ist das Risiko des Ereignisses "Entgleisung" aufgrund der Zuordnung zum Wahrscheinlichkeitsniveau "unwahrscheinlich" verbal als "akzeptabel" zu klassifizieren.

Tabelle 4.6: Risikoklassifikationsmatrix für das Ereignis "Entgleisung" (1991 bis 1995)

Wahrscheinlichkeitsniveaus	Risikoklassifikationsmatrix für das Ereignis Entgleisung			
Häufig	nicht akzeptabel			
Wahrscheinlich				
Manchmal		unerwünscht		
Kaum			akzeptabel	
Unwahrscheinlich	0 %	0 %	73 %	27 %
Äußerst unwahrscheinlich				vernachlässigbar
	katastrophal (4)	kritisch (3)	marginal (2)	unbedeutend (1)
	Schadensausmaßkategorie			

Hinsichtlich der zu erwartenden Konsequenzen des möglichen Unfalls "Entgleisung" muss die Unfallwahrscheinlichkeit durch aktive Sicherheitsmaßnahmen dahingehend reduziert werden, dass die Klassifikation des Risikos für Fahrgäste und Personal entsprechend der verbalen Beschreibung "vernachlässigbar" bzw. "akzeptabel" erfüllt wird. Da das der Entgleisung nachfolgende mögliche Unfallereignis (z.B. Aufprall auf Hindernisse) nicht hinreichend genug spezifiziert werden kann, müssen Maßnahmen zur Verbesserung des Insassenschutzes berücksichtigt werden, die ohnehin für die typischen Kollisionsszenarien "Zusammenstoß", "Aufprall" und "Zusammenprall" geeignet sind. Maßnahmen an der Fahrzeugstruktur (z.B. Schutz der Insassen vor Verlust an Überlebensraum beim Überrollvorgang) sind unter Nutzung funktionaler Anforderungen und unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit zu entwickeln. Es ist außerdem anzustreben, dass der Zugverband nach der Entgleisung gestreckt bleibt, um bei einer Sekundärkollision die Energieabsorption möglichst auf die gesamte Länge des Zugverbandes zu verteilen.

4.4.6 Risikoklassifikation für die Ereignisart "Zusammenstoß"

Das Ereignis "Zusammenstoß" ist hinsichtlich der Unfallhäufigkeit dem Wahrscheinlichkeitsniveau "kaum" zuzuordnen. Jeweils ca. 20 % der Unfälle im betrachteten Zeitraum sind in Bezug auf das Schadenausmaß als "katastrophal", "kritisch" bzw. "unbedeutend" einzustufen. Das Schadenausmaß der Kategorie "marginal" trifft auf ca. 40 % der Unfälle zu (Tabelle 4.7).-

Tabelle 4.7: Risikoklassifikationsmatrix für das Ereignis "Zusammenstoß" (1991 bis 1995)

Wahrscheinlichkeitsniveaus	Risikoklassifikationsmatrix für das Ereignis Zusammenstoß			
Häufig	nicht akzeptabel			
Wahrscheinlich				
Manchmal		unerwünscht		akzeptabel
Kaum	20 %	20 %	42 %	18 %
Unwahrscheinlich				
Äußerst unwahrscheinlich				vernachlässigbar
	katastrophal (4)	kritisch (3)	marginal (2)	unbedeutend (1)
	Schadenausmaßkategorie			

Aufgrund der Wahrscheinlichkeit des Ereignisses "Zusammenstoß", bezogen auf die Anzahl der Personenfahrzeuge, müssen 40 % der Kollisionen Schienenfahrzeug - Schienenfahrzeug verbal als "unerwünschtes" Risiko klassifiziert werden. Der hohe Anteil der Personenschäden, die in die Kategorien "katastrophal" bzw. "kritisch" einzuordnen sind, rechtfertigt Maßnahmen der passiven Sicherheit zur Minderung des Schadenrisikos. Dringendster Bedarf ist darin zu sehen, die Unfallhäufigkeit durch Maßnahmen der aktiven Sicherheit (Signaltechnik, innovative Sicherungssysteme) zu reduzieren. Ergänzend ist der Anteil der Personenschäden, die als "katastrophal" oder "kritisch" einzustufen sind, durch Verbesserung des Insassenschutzes im Kollisionsfall zu verringern.

4.4.7 Risikoklassifikation für die Ereignisart "Aufprall auf Gegenstände"

Ca. 15 % der Unfallart "Aufprall auf Gegenstände" sind aufgrund der Unfallwahrscheinlichkeit "kaum" und der Schadensausmaßkategorie "katastrophal" bzw. "kritisch" als unerwünschtes Risiko zu klassifizieren. Etwa 85 % dieser Unfälle sind als vernachlässigbares bzw. akzeptables Risiko einzustufen. Maßnahmen der passiven Sicherheit sind hierbei nur schwer zu spezifizieren, da es insbesondere für diesen Kollisionstyp notwendig ist, eine sehr genaue Analyse der Unfälle vorzunehmen. Die vorliegenden Daten der Unfallstatistiken lassen aber keine derartigen Aussagen über die Randbedingungen (Masse, Energie, Geometrie, Krafteinleitung etc.) zu (Tabelle 4.8).

Tabelle 4.8: Risikoklassifikationsmatrix für das Ereignis "Aufprall auf Gegenstände" (1991 bis 1995)

Wahrscheinlichkeitsniveaus	Risikoklassifikationsmatrix für das Ereignis Aufprall			
Häufig	nicht akzeptabel			
Wahrscheinlich				
Manchmal		unerwünscht		akzeptabel
Kaum	4 %	11 %	29 %	56 %
Unwahrscheinlich				
Äußerst unwahrscheinlich	vernachlässigbar			
	katastrophal (4)	kritisch (3)	marginal (2)	unbedeutend (1)
	Schadensausmaßkategorie			

Betrachtet man zurückliegende Bahnbetriebsunfälle in Deutschland, die primär oder sekundär der Unfallart "Aufprall auf Gegenstände" und der Schadensausmaßkategorie "katastrophal" zuzuordnen sind (Northeim, Neustadt, Eschede, Brühl¹²), wird deutlich, dass die Schwere der Personenschäden im wesentlichen auf die teilweise vollständige Zerstörung der Struktur der betroffenen Fahrzeuge, insbesondere der Wagenkastenaufbauten und damit mit dem Verlust an Überlebensraum für die Fahrgäste und das Personal zurückzuführen ist. Die hierbei auftretenden Belastungen der Fahrzeugstruktur infolge der wirkenden äußeren Kräfte und der Ort der Energieaufnahme beim Aufprall können nicht oder nur unzureichend definiert werden. Deshalb ist es für diesen Kollisionstyp außerordentlich schwierig, aber nicht unmöglich, Maßnahmen hinsichtlich eines verbesserten Kollisionsschutzes der Wagenkastenaufbauten und die für die Normung notwendigen Lastannahmen zum Nachweis einer höheren passiven Sicherheit zu entwickeln. Ähnlich der Problemstellung bei der Unfallart „Entgleisung“ kann die Entwicklung neuer Fahrzeugkonzepte und Zugkonfigurationen genutzt werden, um das Potential der Energieaufnahme durch den Fahrzeugverband besser auszuschöpfen. Voraussetzung hierfür ist eine auf den Kollisionsfall abgestimmte Gestaltung der Verbindung der Fahrzeugeinheiten, die ein „Gestrecktbleiben“ des Fahrzeugverbandes als Grundlage für ein kontrollierbares Energieabsorptionsmanagement sicherstellen muss.

4.4.8 Risikoklassifikation für die Ereignisart "Zusammenprall mit Wegbenutzern"

Die Unfallart "Zusammenprall mit Wegbenutzern" ist hinsichtlich der Unfallhäufigkeit dem Wahrscheinlichkeitsniveau "kaum" zuzuordnen. Im betrachteten Zeitraum sind ca. 20 % der Unfälle in Bezug auf das Schadensausmaß als "katastrophal" und "kritisch" einzustufen. Das Schadensausmaß der Kategorien "marginal" und "unbedeutend" trifft auf ca. 80 % der Unfälle zu.

¹² Northeim (1992): Kollision eines Reisezuges mit einem Güterzug, der aufgrund einer Entgleisung den Regellichraum des Nachbargleises verletzt hat, 11 Tote

Neustadt, Hessen (1997): Nicht ausreichend gesicherte Ladung eines Güterzuges kollidiert mit Regionalexpreß, 6 Tote

Eschede (1998): Mittelwagen eines entgleisten ICE1 prallen auf Brückenpfeiler: 101 Tote

Brühl (2000): Reisezugwagen eines entgleisten EN prallen auf Bahnhofsaufbauten: 9 Tote

Unter Berücksichtigung der Unfallwahrscheinlichkeit sind 20 % der Unfälle als "unerwünschtes" Risiko zu klassifizieren (Tabelle 4.9).

Tabelle 4.9: Risikoklassifikationsmatrix für das Ereignis "Zusammenprall mit Wegbenutzern" (1991 bis 1995)

Wahrscheinlichkeitsniveaus	Risikoklassifikationsmatrix für das Ereignis Zusammenprall			
Häufig	nicht akzeptabel			
Wahrscheinlich				
Manchmal		unerwünscht		akzeptabel
Kaum	2 %	19 %	31 %	48 %
Unwahrscheinlich				
Äußerst unwahrscheinlich				vernachlässigbar
	katastrophal (4)	kritisch (3)	marginal (2)	unbedeutend (1)
	Schadensausmaßkategorie			

Maßnahmen der aktiven Sicherheit (z.B. Eliminieren der niveaugleichen Kreuzungen von Straßen und Schienenfahrwegen) können die Unfallwahrscheinlichkeit und damit auch das Unfallrisiko deutlich reduzieren. In Hinblick auf den enormen Kostendruck, dem der Schienenverkehr unterliegt, und angesichts der Bestrebungen, Schienenfahrwege für den Regionalverkehr zu revitalisieren, ist nicht zu erwarten, dass eine Minderung des Risikos allein durch diese Maßnahmen erzielt werden kann.¹³

¹³ Anmerkung: Das Ereignis „Zusammenprall mit Wegbenutzern“ ist in der Regel auf das Fehlverhalten von Straßenverkehrsteilnehmern zurückzuführen, die an Bahnübergängen den Vorrang des Schienenverkehrs mißachten und hierbei einem wesentlich höheren Schadensausmaß ausgesetzt sind, als die mit ihnen kollidierenden Schienenfahrzeuge und deren Insassen. Untersuchungen hinsichtlich Unfallursachen und Gefährdung der Insassen in Straßenfahrzeugen sind aber nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Insbesondere die Entwicklung neuer, leichter Fahrzeugkonzepte mit niedrigen LifeCycleCosts (Lebenszykluskosten) für den Regionalverkehr hat neue Fragestellungen hinsichtlich Einhaltung der Sicherheitsanforderungen aufgeworfen. Untersuchungen hinsichtlich einer verbesserten Kollisionssicherheit von Fahrzeugen mit verminderter Strukturfestigkeit unter Berücksichtigung aktiver Sicherheitsmaßnahmen (verbesserte Bremsfähigkeit) wurden von *Voß* [34] und *Füser* [35] durchgeführt. Ausgehend von der Überlegung, den Eigenschutz von Fahrzeugen mit verminderter Festigkeit durch verbessertes Bremsvermögen und größeres plastisches Deformationsvermögen zu erhöhen, wird eine nachweisbare und immanente Sicherheit gegenüber Fahrzeugdeformationen vorgeschlagen.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht u. a. hinsichtlich der Kompatibilitätsanforderungen, um den Schutz kleinerer (leichterer) Fahrzeuge bei Kollisionen mit größeren (schwereren) Fahrzeugen zu verbessern, insbesondere was negative Effekte betrifft (z.B. Aufklettern¹⁴ von Fahrzeugen mit Seitenpuffern). In diesem Zusammenhang sollte auch der Ort der Kräfteinleitung und Energieabsorption in Hinblick auf Kollisionen mit Straßenfahrzeugen unterschiedlicher Massenschwerpunktshöhe (schwerer LKW, Sattelauflieger, Zugmaschine) Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein, um den Schutz des Triebfahrzeugführers zu verbessern.

¹⁴ Vorgang des „Aufkletterns“: Vertikale Relativbewegungen benachbarter Fahrzeuge aufgrund vertikaler dynamischer Kräfte im Kollisionsfall, in deren Folge Fahrzeuge mit ihren Untergestellen „aufklettern“ und die Wagenkastenaufbauten benachbarter Fahrzeuge zerstören können.

5 Definitionen und Grundbegriffe zur Bewertung der Insassensicherheit

5.1 Einführung

Für das Verständnis der zur Bewertung der Insassensicherheit im Kollisionsfall verwendeten Kriterien ist es notwendig, grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge hinsichtlich der Biomechanik des Menschen voranzustellen. Das Wissen über die Entstehung und den Grad der Verletzungen bei einem Unfall basiert auf Erfahrungen und Ergebnissen von Untersuchungen, die physikalische und biologische Gesetzmäßigkeiten berücksichtigen.

In der Kraftfahrzeugindustrie hat man bereits in den 40er Jahren begonnen, das Verhalten von Kraftfahrzeugstrukturen mittels Aufprallversuchen zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Tests wurden für die Entwicklung sicherer Fahrzeuge genutzt. Um den Unfallschutz der Insassen zu verbessern, war es aber ebenso notwendig, Erkenntnisse über die Verletzungsmechanik und die biomechanischen Belastungsgrenzen des Menschen zu erhalten.

5.2 Biomechanische Kriterien zur Bewertung der Verletzungsschwere

Für die Beurteilung der Verletzungsschwere und zur Bewertung der Crashesicherheit von Kraftfahrzeugen dienen biomechanische Kriterien, mit denen die auf den Menschen wirkenden Belastungen beschrieben und deren Grenzen quantifiziert werden können:

- *Belastungsgrenzwerte* (physikalische Größen zur quantifizierten Beschreibung reversibler und irreversibler Verletzungen anhand von Untersuchungen an Leichen und Tieren),
- *Verletzungskriterien bzw. -grenzen* (physikalische Größen zur Definition vertretbarer Verletzungsrisiken für den lebenden Menschen) und
- *Schutzkriterien* (Transformation physikalisch messbarer Größen auf das mathematische Modell bzw. den Dummy: Festlegen von Grenzwerten, die bei experimentellen Versuchen mit anthropometrischen Messpuppen nicht überschritten werden dürfen).

Der Zusammenhang zwischen Belastungsgrenzwert, Verletzungskriterium und Schutzkriterium ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

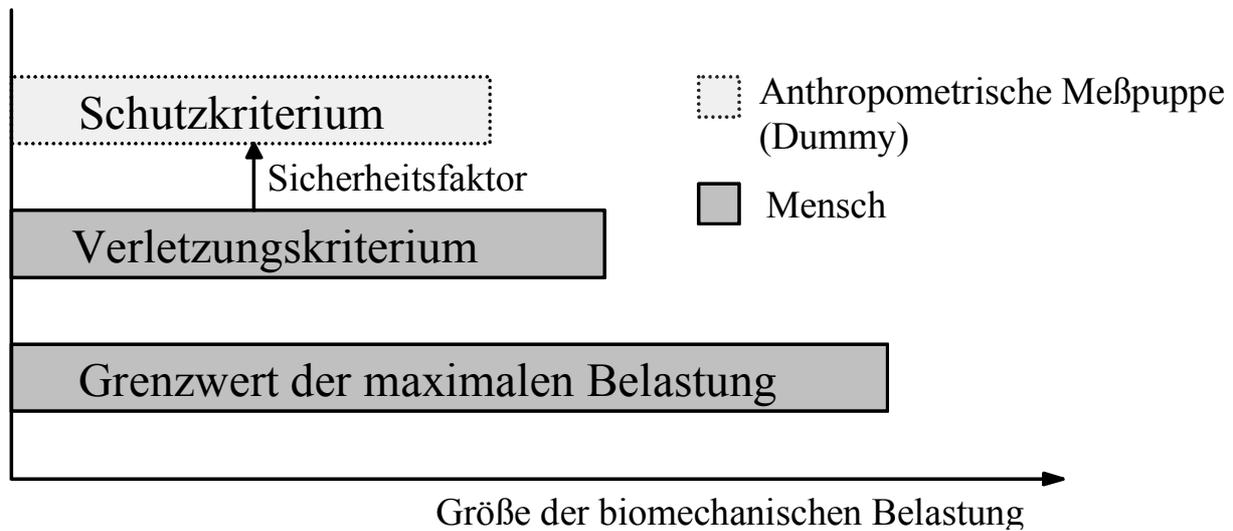


Abbildung 5.1: Zusammenhang zwischen biomechanischer Belastungsgrenze, Verletzungskriterium und Schutzkriterium

5.3 Biomechanische Belastungsgrenzwerte

Es gibt verschiedene Untersuchungsmethoden, die Belastungsgrenzen des Menschen zu ermitteln. Dabei greift man im allgemeinen auf vereinfachte Modellbildungen des realen Unfallgeschehens zurück, um die Anzahl der Variablen, die Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben können, möglichst klein zu halten.

Zu den Untersuchungsmethoden gehören:

- Untersuchungen an Menschen, die durch ihren Beruf extremen Belastungen ausgesetzt sind (Sportler, Artisten, Tänzer),
- Auswertung von realen Unfällen (Unfallbeteiligte),
- Versuche mit menschlichen Leichen und Leichenteilen und
- Versuche mit Tieren, die in bestimmten Körperregionen dem Menschen ähnlich sind (Affen, Schweine).

Um Grenzwerte der biomechanischen Belastung des Menschen zu definieren, werden physikalische Größen (Beschleunigungen, Momente und Kräfte), die aus der "Festigkeitslehre" des Menschen resultieren, sowie deren Einwirkungsdauer herangezogen.

In Tabelle 5.1 sind einige biomechanische Belastungsgrenzwerte des Menschen für ausgewählte Körperteile bzw. -regionen dargestellt.

Tabelle 5.1: Ausgewählte biomechanische Belastungsgrenzwerte des Menschen nach [22] und [36] S. 120-132

Körperteil, Körperregion	Physikalische Größe	Belastungsgrenzwerte
Gehirn	a_{\max}	100 bis 300 g
	$a_{\max} = f(\Delta t)$	60 g (für $\Delta t > 45$ ms nach WSU - Toleranzkurve ¹⁵)
	$\dot{\varphi}_{\max}$	1800 bis 25000 rad/s ² (Winkelbeschleunigung, abhängig von der gleichzeitig wirkenden translatorischen Beschleunigung)
Knöcherner Schädel	a_{\max}	80 bis 300 g je nach Größe der Stoßfläche
Halswirbelsäule	a_{\max}	30 bis 40 g / 15 bis 18 g bei von vorn / von hinten in den Thorax eingeleitetem Stoß
	F_{Scher}	1800 bis 2600 N bei Scherbelastung
	$\alpha_{\max, \text{vorwärts}}$	80 bis 100° (Biegewinkel bei Vorwärtsbewegung des Kopfes)
	$\alpha_{\max, \text{rückwärts}}$	80 bis 90° (Biegewinkel bei Rückwärtsbewegung des Kopfes)
Thorax	a_{\max}	40 bis 60 g für $t > 3$ ms, über 60 g für $t < 3$ ms
	F_{\max}	5000 bis 9080 N bei sagittaler ¹⁶ Stoßbelastung
	s_{\max}	45 bis 88 mm (Eindrückung des Brustkorbes)
Abdominalbereich ¹⁷	F_{\max}	500 bis 1700 N (Belastung der inneren Organe)
	p_{\max}	35 N/cm ² (Flächenpressung)
Becken (Pelvis)	a_{\max}	60 bis 80 g
Oberschenkel, Hüfte	F_{\max}	6400 bis 12500 N (Krafteinleitung am Knie, stark abhängig von der Belastungsdauer)
Schienbein	F_{\max}	2500 bis 5000 N (Beanspruchung auf Biegung infolge Querkraft)

¹⁵WSU - Wayne State University Cerebral Concussion Tolerance Curve

¹⁶ sagittal: parallel zur Mittelachse liegend

¹⁷ Abdominalbereich: Unterleib, Bauch

Bei Verwendung der Grenzwerte für die Bewertung der im Crashfall auftretenden Belastungen auf den Insassen ist zu beachten, dass nicht nur der Wert der Verzögerung, sondern vor allem auch ihre Dauer dabei einen Einfluss auf die Verletzungsschwere haben. Einzelne Belastungsgrenzwerte sind also nur eine bestimmte Zeit für den Menschen ertragbar.

5.4 Schutzkriterien in der Kraftfahrzeugtechnik

Tabelle 5.2 zeigt eine Auswahl der in der Kraftfahrzeugtechnik für die Bewertung der Insassensicherheit bei einem Frontalaufprall vorgeschriebenen Schutzkriterien: [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43] und [44]

Tabelle 5.2: Auswahl gesetzlich vorgeschriebener Grenzwerte für den Frontalaufprall

Körperteil	Gesetzliche Vorschriften	Grenzwerte nach geltenden Vorschriften
Kopf	FMVSS 201, 208 ¹⁸ EWG 74/60, 78/932 ¹⁹ ECE-R 80, ECE-R 94 ²⁰	$a_{3ms} = 80 \text{ g}^{21}$ HIC = 1.000, 500 ²² , HIC ₃₆ = 1000
Thorax (Brustkorb)	FMVSS 203, 208 EWG 74/297	$a_{3ms} = 60 \text{ g}$ SI = 1.000 ²³ $F_x = 11.100 \text{ N}$ (Brustkorb des Körperblocks)
Oberschenkel	FMVSS 208	$F_x = 10.000 \text{ N}$ (Längskraft; Kraftmessglieder im Dummy-Oberschenkel)

Das Verletzungskriterium für den Kopf HIC (Head Injury Criterion) ist die mathematische Beschreibung einer Toleranzkurve, die als Grenzkurve zur Unterscheidung von lebensgefährlichen und nicht lebensgefährlichen Hirnverletzungen infolge stoßartiger Belastung anzusehen

ist. Sie ist repräsentativ für die komplexen Beschleunigung - Zeit - Charakteristiken, die beim realen Unfall auftreten. Der HIC berücksichtigt dabei besser den Einfluss der Wirkdauer der Beschleunigung auf die Verletzungsschwere.

Zur Ermittlung des HIC wird das berechnete oder gemessene Signal über das Zeitintervall der resultierenden Beschleunigung integriert. In der Kraftfahrzeugtechnik wurde außerdem das **Kriterium HIC₃₆** eingeführt, für dessen Berechnung nur das Zeitintervall von $t_2 - t_1 = 36$ ms berücksichtigt wird.

$$HIC = \max \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1) \right\}, \text{ mit } a \text{ in g, } t_2 \text{ und } t_1 \text{ in s}$$

Für die Berechnung des Schutzkriteriums für den Brustkorb SI (Severity Index) wird die berechnete oder gemessene resultierende Beschleunigung im Schwerpunkt des Thorax über das gesamte Zeitintervall integriert.

$$SI = \int_0^t [a(t)]^{2,5} dt, \text{ mit } a \text{ in g und } t \text{ in s}$$

In den Sicherheitsstandards für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen sind hinsichtlich des Insassenschutzes bei einem Frontalaufprall bisher keine Grenzwerte für die resultierende, translatorische Beckenbeschleunigung festgelegt. Nach KRAMER [45] S. 32-34 und [36] S. 127-130 befinden sich jedoch Grenzwerte der Belastungs- und Schutzkriterien für den Abdominalbereich und das Becken im Diskussionsstadium. Aufgrund analysierter Unfalldaten und

¹⁸ FMVSS: Federal Motor Vehicle Safety Standards

¹⁹ EWG: Europäische Wirtschaftsgemeinschaft

²⁰ ECE: Economic Commission for Europe; ECE-Regulation (ECE-R): Verordnung der ECE

²¹ a_{3ms} : Die als Schutzkriterien definierten Beschleunigungsmaxima mit einer Dauer von ≥ 3 ms berücksichtigen die Abhängigkeit der Belastungsgrenzwerte von der Belastungsdauer. Beschleunigungsmaxima über einen kürzeren Zeitbereich dürfen größer sein.

²² HIC = Head Injury Criterion (Kopf): Nach FMVSS 208 ist der Grenzwert auf 1.000 festgelegt. Im Unterschied dazu ist in der Richtlinie ECE - R80 für das Kopf - Bewertungskriterium ein Grenzwert von 500 definiert.

²³ SI = Severity Index (Thorax)

Simulationsrechnungen zur Insassenkinematik liegen insbesondere Erkenntnisse und Erfahrungswerte hinsichtlich der Korrelation zwischen Beckendrehwinkel und Beckenbeschleunigung vor. Dieser Zusammenhang dient zur Beurteilung des sog. Submarining - Effektes, bei dem das Becken unter die Beckengurtschlinge "taucht", so dass die aus dem Kontakt Gurt - Insasse resultierende Krafteinleitung nicht mehr über den sehr stabilen Beckengürtel erfolgt, sondern über den Abdominalbereich (Bauchdecke). In der Folge führen die auftretenden Kräfte zu schweren Verletzungen der inneren Organe.

Beim Knieanprall (z.B. auf den Vordersitz) erfolgt die Krafteinleitung dagegen über den Oberschenkel in den Hüftbereich, so dass hier der Beckendrehwinkel keine Bedeutung besitzt. Dagegen ist das Schutzkriterium für die zulässige Oberschenkel-Längsdruckkraft von 10000 N (FMVSS 208) von Interesse, da bei den damit verbundenen Verletzungen keine eindeutige Trennung zwischen Beckenbereich und unteren Extremitäten möglich ist.

Beim Tischenprall (vis-à-vis - Bestuhlung mit Tisch) erfolgt die Krafteinleitung in das Becken direkt über den Kontakt Becken - Tischkante. Für die dabei zu berücksichtigenden zulässigen Beckenkräfte gibt es in den für die Kraftfahrzeugsicherheit relevanten Normen und Regelungen keine zulässigen Grenzwerte. Nach KRAMER [36], S. 128-131 können durch das Becken sehr hohe Kräfte aufgenommen werden. Erfolgt die Krafteinleitung über die Knie, liegen die als zulässige Schwellwerte gegen Beckenbruch im Bereich der Hüftgelenk - Pfanne definierten Kräfte zwischen 6400 N und 12500 N, wobei eher der obere Grenzwert als Level für die zulässige Maximalbelastung herangezogen wird.

Da der Beckenringknochen sehr hohe Belastungen aufzunehmen vermag, wird für das Becken eine resultierende Beschleunigung von $a_{\max} = 80 \text{ g}$ als ertragbar angesehen, wenn der Beckendrehwinkel bei angegurteten Insassen kleiner als der kritische Wert von $\alpha_{\max} = 20^\circ$ ist. Aufgrund der hohen Belastbarkeit des knöchernen Beckengürtels kann der Grenzwert von 80 g auch zur Bewertung der Insassenbelastungen beim Knieanprall unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Oberschenkel-Längskräfte verwendet werden.

Die im Kraftfahrzeugbereich bzw. Straßenverkehr geltenden biomechanischen Toleranzgrenzen und Schutzkriterien lassen sich ohne weiteres auf den Schienenverkehr übertragen. Da es

bisher keine vergleichbaren Kriterien für Schienenfahrzeuge gibt, können sie als Bewertungsgrundlage für Konzepte und Maßnahmen zur Verbesserung der Insassensicherheit im Schienenverkehr herangezogen werden. Weitergehende Untersuchungen (z.B. Untersuchungen mit Führerstandsmodulen und Fahrgastsitzen) sollten dazu dienen, diese Kriterien gegebenenfalls zu ergänzen und zu spezifizieren.

6 Passive Sicherheit im Straßen- und Schienenverkehr

6.1 Vergleich passiver Sicherheitsmaßnahmen

Während in der Kraftfahrzeugtechnik insbesondere in den letzten drei Jahrzehnten ein hoher Aufwand zur Verbesserung des Insassenschutzes im Kollisionsfall betrieben wurde, haben Maßnahmen zur Verbesserung der passiven Sicherheit im Schienenverkehr erst in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen.

Tabelle 6.1 stellt für den Kraft- und Schienenfahrzeugbereich ausgewählte Beispiele für Maßnahmen und Komponenten, die als sicherheitsrelevant einzustufen sind, gegenüber. Die aufgeführten Beispiele gehören im weitesten Sinne zu passiven Sicherheitsmaßnahmen und sind Stand der Technik.

Tabelle 6.1: Vergleich ausgewählter Maßnahmen der passiven Sicherheit in der Kraft- und Schienenfahrzeugtechnik

	Kraftfahrzeugtechnik	Schienenfahrzeugtechnik
"Außen"	<ul style="list-style-type: none"> - Stoßfänger - Pralldämpfer - Knautschzonen (deformierbare Vorbaubereiche) - Steife Fahrgastzelle (Überlebensraum) - Seitenaufprallschutz - Bewegliche Aufhängung der Motor-Getriebe-Einheit - Sicherheitsverglasung 	<ul style="list-style-type: none"> - Zug- und Stoßeinrichtung (Mittelpufferkupplung, Seitenpuffer) - Defo-Elemente ("Crashpatronen") - Aufkletterschutzeinrichtungen - $F_{xmin} = f$ (Fahrzeugkategorie) z. B. 2000 kN für Lokomotiven und Reisezugwagen, (1500 kN) für Triebzüge
"Innen"	<ul style="list-style-type: none"> - Innenauskleidung - Instrumententafel - Fußbedienelemente - Lenkrad - Sicherheits-Lenksäule - Sitze und Kopfstützen - Gurt, Gurtstraffer - Gurtweg- und Gurtkraftbegrenzer - Airbag 	<ul style="list-style-type: none"> - "weiche" Konturen der Innenauskleidung - Vermeidung von scharfkantigen Formen und Oberflächen - Befestigung von Bauteilen: $a_{xmax} = 5 g$ oder $3 g$ (UIC 566) - Sitze und Kopfstützen - kein Gurt - kein Airbag

6.2 Passive Sicherheit von Kraftomnibussen

6.2.1 Allgemeines

Im Zusammenhang mit einer verbesserten passiven Sicherheit von Schienenfahrzeugen im Kollisionsfall sind besonders Konzepte und Maßnahmen von Interesse, die für Kraftomnibusse hinsichtlich eines verbesserten Insassenschutzes (Fahrer, Fahrgäste) entwickelt wurden.

Auf diesem Gebiet durchgeführte Untersuchungen (z. B.: [46], [47], [48], [49], [50], [51] [52], [53] und [54]) konzentrierten sich auf den Zusammenhang zwischen sicherheitsorientierter Innenraumgestaltung und Einsatz von Rückhaltesystemen (Sicherheitsgurte) sowie daraus resultierender Minderung der Unfallfolgen. Der Einfluss von Becken-, Dreipunkt- und Schrägschultergurten auf die Insassenbelastungen wurde dabei ebenso untersucht, wie die Gestaltung der Sitzkonstruktion als Rückhaltesystem. Ziel der Forschungsarbeiten war es u.a., die Eignung der durch die ECE²⁴-R 80 vorgeschriebenen Bedingungen hinsichtlich des Insassenschutzes bei Frontalaufprall zu prüfen und Anforderungen an Sicherheitsgurte in Reisebussen zu definieren.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Schutzwirkung von Fahrgastsitzen und Sicherheitsgurten in Reisebussen für den Frontalaufprall und beim Umkippen/Überschlag haben neben Lösungsansätzen auch Probleme aufgezeigt. Beides soll hier in einer kurzen Zusammenfassung dargestellt werden, da sie auch bei der Verbesserung der Insassensicherheit in Schienenfahrzeugen zu beachten sind.

²⁴ ECE: Economic Commission for Europe (UNO)

6.2.1.1 Sicherheit gegen Umkippen und Überschlag

Grundsätzlich ist der Einsatz von Gurten als effektive Maßnahme zur Verbesserung der Insassensicherheit vor allem für das Kollisionsszenario Umkippen/Überschlag zu bewerten. Hierbei ist ein Beckengurt ausreichend, der den Insassen am Sitz fixiert. In Bezug auf das Herausrutschen des Insassen aus dem Gurt bietet er nach APPEL et. al. [54] sogar Vorteile gegenüber dem Dreipunktgurt.

6.2.1.2 Sicherheit gegen Frontalaufprall

Für den Frontalaufprall weisen Beckengurte den Nachteil des sog. "Klappmessereffektes"²⁵ auf, der mit hohen Kopfbelastungen verbunden ist. Hier sind zusätzliche Maßnahmen, z. B. eine rückseitige Polsterung der Sitzlehne im Bereich der Kopfstütze denkbar, um die Schutzkriterien für den Kopf einzuhalten. Untersuchungen von RÜTER [53] haben zudem gezeigt, dass Fahrgastsitze in Reisebussen, die der Richtlinie ECE-R 80 entsprechen, als Rückhaltesystem geeignet sind. Nahverkehrssitze sind hingegen aufgrund ihrer niedrigeren Lehne und der geringeren Festigkeit von Struktur und Verankerungen als nicht ausreichend zu bewerten.

Bei Verwendung von Dreipunktgurten in Kraftomnibussen stellt sich die Frage der Befestigung, da der obere Gurtpunkt nicht wie beim PKW an Karosserieteilen (B-Säule) befestigt werden kann. Sollen die Gurtkräfte durch die Sitzstruktur aufgenommen werden, muss der Sitz entsprechend steifer ausgelegt werden, das wiederum zu höheren Belastungen des ungesicherten Insassen beim Aufprall auf den Vordersitz und zu einer größeren Masse des Sitzes führt.

Bisher noch nicht ausreichend genutztes Potential einer verbesserten Insassensicherheit von Kraftomnibussen bietet sich durch passive Rückhaltesysteme, die verstärkt den Fahrgastsitz einbeziehen. So besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Fähigkeit des Sitzes zur Energieabsorption durch geeignete Kraft-Weg-Charakteristiken der Rückenlehne einschließ-

²⁵ „Klappmessereffekt“: Vorwärtsgerichtete Drehung des Oberkörper um das durch den Beckengurt zurückgehaltene Becken

lich Kopfstütze, der Lehnenverstellung und der gesamten Sitzkonstruktion. Auch die Sitzbefestigung muss den Anforderungen hoher Beschleunigungswerte genügen.

Als Konsequenz der Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Insassensicherheit in Reisebussen schreibt die aktuelle Straßenverkehr-Zulassungsordnung (StVZO §35a) seit dem 01.06.98 für alle neuen Reisebus-Typen mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 3,5 t und ab 01.10.01 für alle erstmals in den Verkehr kommenden Reisebusse Sicherheitsgurte oder Rückhaltesysteme auf allen Sitzplätzen vor.

6.2.2 Internationale Vorschriften

Die wichtigsten Anforderungen an die passive Sicherheit von Kraftomnibussen sind in den Richtlinien der Economic Commission for Europe ECE-R 66 [55] und ECE-R80 [44] erfasst.

Die Richtlinie ECE-R 66 definiert die Anforderungen an die Festigkeit und Steifigkeit der Busstruktur von Kraftomnibussen zum Schutz der Insassen beim Umkippen und Überschlag. Bei der Prüfung nach ECE-R 66 wird eine Kraft mit einer Longitudinal- und Lateralkomponente seitlich an der oberen Dachkante der Busstruktur aufgebracht. Die Struktur darf sich dabei nur soweit deformieren, dass ein definierter Überlebensraum für die Businsassen erhalten bleibt. Der Nachweis kann mittels Versuch oder mit Hilfe von Simulationsrechnungen erbracht werden.

In den Richtlinien 96/37/EG [56] bzw. ECE-R 80 [44] sind die Bedingungen für die Genehmigung und Prüfung von Fahrzeugsitzen in Kraftomnibussen hinsichtlich ihrer Widerstandsfähigkeit und ihrer Verankerung definiert. Sie gelten für Fahrzeuge, die für die Personenbeförderung vorgesehen sind und mehr als 16 Fahrgastsitzplätze aufweisen. Die Fahrgastsitze sind nach vorn gerichtet und auf einer horizontalen Ebene befestigt. Klappsitze und Sitze, die entgegen oder quer zur Fahrtrichtung angeordnet sind, fallen nicht unter diese Vorschriften. Da die in diesen Richtlinien definierten Anforderungen als Grundlage für Untersuchungen der passiven Sicherheit von Fahrgastsitzen in Schienenfahrzeugen verwendet werden können, sollen sie im folgenden näher erläutert werden.

6.2.3 Anforderungen an Sitze in Kraftomnibussen

Die Richtlinien 96/37/EG bzw. ECE-R 80 enthalten u. a. folgende Vorschriften zur Prüfung und Genehmigung von Sitzen in Kraftomnibussen:

- Jede Einstell- und Verstelleinrichtung an Sitzen muss mit einem selbständigen Verriegelungsmechanismus versehen sein.
- Die Benutzer der Sitze müssen im Crashfall durch die vor ihnen befindlichen Sitze vorschriftsmäßig zurückgehalten werden. Diese Bedingung gilt als erfüllt, wenn bei der dynamischen Prüfung (siehe Abschnitt 6.2.4) die Vorwärtsbewegung eines Teils des Rumpfes oder des Kopfes der Prüfpuppe nicht die vertikale Querebene, die im Abstand von 1,6 m vom R - Punkt²⁶ des Hilfssitzes liegt, überschreitet.
- Die Sitzbenutzer dürfen nicht ernsthaft verletzt werden. Diese Vorschrift gilt als erfüllt, wenn bei der dynamischen Prüfung folgende biomechanischen Schutzkriterien erfüllt sind:
 - Kopf: $HIC < 500$,
 - Thorax: Maximale Beschleunigung $a_{max} < 30$ g, außer für Zeitintervalle von insgesamt weniger als 3 ms und
 - Oberschenkel: Axiale Belastung $F < 10$ kN für Zeitintervalle $t < 20$ ms und $F < 8$ kN für Zeitintervalle $t > 20$ ms.
- Der Sitz und die Sitzbefestigung müssen ausreichend widerstandsfähig sein. Dies gilt als erfüllt, wenn
 - sich kein Teil des Sitzes, der Sitzbefestigung oder der Zubehörteile während der Prüfung vollständig löst,
 - alle Verriegelungseinrichtungen des Sitzes während der gesamten Prüfdauer verriegelt bleiben und

²⁶ Zur Ermittlung der für die Prüfung relevanten Maße und Neigungswinkel der Sitzpolster und Rückenlehnen von kompletten Sitzen oder an Sitzgruppen im eingebauten Zustand wird eine sog. 3DH-Einrichtung verwendet. Die fiktive Drehachse des Torso gegenüber den Oberschenkeln wird dabei als H - Punkt - Gelenk bezeichnet. Der H - Punkt ist Bezugsmaß für die Position der Meßpuppe. In einem fahrzeugfesten Koordinatensystem wird die Lage des H - Punktes in hinterster normaler Sitzposition als R - Punkt beschrieben.

- nach der Prüfung kein Teil des Sitzes eine Bruchstelle, scharfe bzw. spitze Kanten oder Ecken aufweist, die Verletzungen verursachen können.
- Alle Ausrüstungsteile der Rückenlehne des Sitzes bzw. an ihr befestigte Zubehörteile müssen so beschaffen sein, dass Verletzungen der Fahrgäste während eines Aufpralls vermieden werden.

6.2.4 Dynamische Prüfung von Sitzen in Kraftomnibussen

Die Richtlinien 96/37/EG bzw. ECE-R 80 schreiben eine dynamische Prüfung für die Genehmigung von Sitzen in Kraftomnibussen vor. Der zu prüfende Sitz und der Hilfssitz (gleicher Typ wie der zu prüfende Sitz) werden in Reihe auf den Prüfschlitten angeordnet, so dass sich der Hilfssitz direkt hinter dem Prüfsitz befindet. Der Abstand zwischen beiden Sitzen muss 750 mm betragen. Auf den Hilfssitz wird die Prüfpuppe gesetzt.

Die Geschwindigkeit des Prüfschlittens beim Aufprall liegt zwischen 30 und 32 km/h. Während der Aufprallprüfung muss die Verzögerung des Prüfschlittens innerhalb vorgeschriebener Intervallkurven liegen. Hiervon ausgenommen sind Zeitintervalle von insgesamt weniger als 3 ms (siehe hierzu auch Abschnitt 9.2.1).

Eine Verzögerung von 8 g bis 12 g über ein Zeitintervall von ca. 90 ms wird international als repräsentativer Wert für einen Frontalaufprall eines Busses angesehen [49].

6.2.5 Einfluss des Sitzteilermaßes auf die Insassenbelastungen

Die in den Abschnitten 6.2.2 und 6.2.4 beschriebenen Richtlinien 96/37/EG [56] bzw. ECE-R 80 [22] beinhalten enge Vorgaben für die Prüfung und Genehmigung von Sitzen in Kraftomnibussen, die von den Busherstellern zu berücksichtigen sind.

Neben diesen Vorschriften sind auch Ergebnisse der bereits in Abschnitt 6.2.1 genannten Untersuchungen des TÜV Rheinland bezüglich des Einflusses des Sitzteilermaßes auf die Insassenbelastungen im Crashfall im Zusammenhang mit einer verbesserten passiven Sicherheit

von Kraftomnibussen zu nennen. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand der Sitz als passives Insassenrückhaltesystem mit dem Ziel, Erkenntnisse über eine verbesserte Energieaufnahme-fähigkeit des Sitzes, insbesondere der Sitzlehne, und über ein hinsichtlich geringer Insassenbelastungen optimales Sitzteilermaß im Bus zu gewinnen.

Der Sitzteiler in Reisebussen wird in den meisten Fällen über kraftschlüssige Spannverbindungen zwischen Sitzfuß oder Sitzgestell und Schienen in der Fußbodengruppe oder in der Seitenwand eingestellt. Diese Variante der Sitzbefestigung wird in modifizierter Form häufig auch in Schienenfahrzeugen verwendet und ermöglicht die Realisierung eines variablen Sitzteilers (Abbildung 6.1).

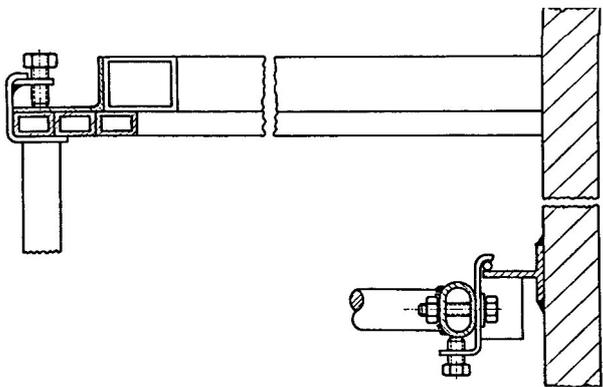


Abbildung 6.1: Variante der Sitzbefestigung in Kraftomnibussen [48]

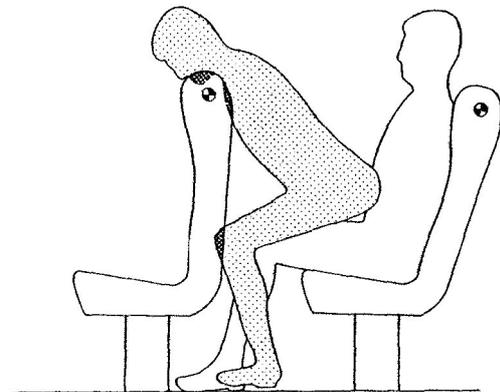


Abbildung 6.2: Insassenkinematik beim Sitzanprall [49]

Innerhalb der Untersuchungen konnte mittels unterschiedlicher Aufprallversuche nachgewiesen werden, dass der Aufprall des Insassen auf die Rückenlehne des Vordersitzes durch eine charakteristische Kinematik beschrieben werden kann (Abbildung 6.2).

Zuerst kommt es zu einem massiven Anprall der Knie auf den vorgebauten Sitz, der zu einer Aufwärtsbewegung des Oberkörpers führt. Dabei stützt sich der gesamte Körper des Insassen über die Knie an der Rückenlehne des Vordersitzes ab. Resultierend aus der Aufwärtsbewegung des Oberkörpers prallt der Insasse mit dem Kopf und Thorax auf den oberen Bereich der Sitzlehne. Dieser zweite Anprall führt im allgemeinen zu einer bleibenden Biegedeformation der Sitzlehne, während der Knieanprall lediglich zu einer Schwingbewegung führt. Im Gegen-

satz zu einer weitestgehenden Invarianz der Thorax-, Becken- und Oberschenkelbelastungen gegenüber einem unterschiedlichen Sitzteiler, sind die Kopfbelastungen unmittelbar abhängig vom Sitzabstand, da der Bereich des Kopfanpralls durch das Sitzteilermaß und die Lehnenhöhe bestimmt wird [48].

Für die Ermittlung des hinsichtlich geringer Insassenbelastungen bei Frontalkollisionen optimalen Sitzteilers in Reisebussen wurden experimentelle Simulationen mit Versuchsschlitten durchgeführt. Für die Bewertung der Insassenbelastungen wurde eine Fahrzeugverzögerung von 5 g zugrunde gelegt.

Die Versuche führten zu dem Ergebnis, dass ein Minimum an Verletzungsschwere bei einem Sitzteilermaß im Bereich von 800 bis 850 mm erreicht wird. Abbildung 6.3 zeigt die Kinematik von Kopf, Thorax und Becken des Dummy (männlicher Erwachsener) beim Aufprall gegen die Lehne des Vordersitzes. In der linken Grafik beträgt der Sitzteiler 700 mm, rechts ca. 890 mm.

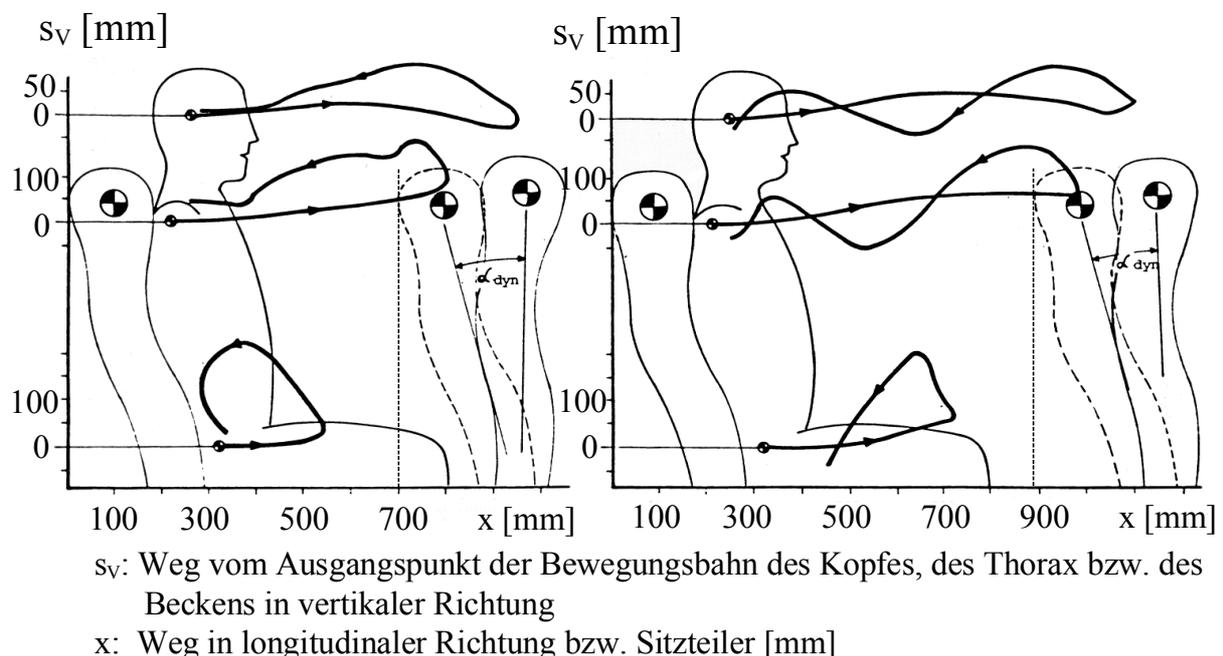


Abbildung 6.3: Kinematik des Dummy bei unterschiedlichen Sitzteilern (links: 700 mm, rechts: ca. 890 mm) nach [48]

Da die irreversible Deformation der Lehne des Vordersitzes infolge Biegung bei einem Sitzteiler im Bereich von 800 bis 850 mm am größten ist, liegt hier das Minimum der am Dummy

gemessenen resultierenden Kopfbelastungen. Bei einem Sitzteilermaß unterhalb bzw. oberhalb dieses Bereiches ergeben sich größere Kopfbeschleunigungen und damit höhere HIC - Werte (Abbildung 6.4) [48].

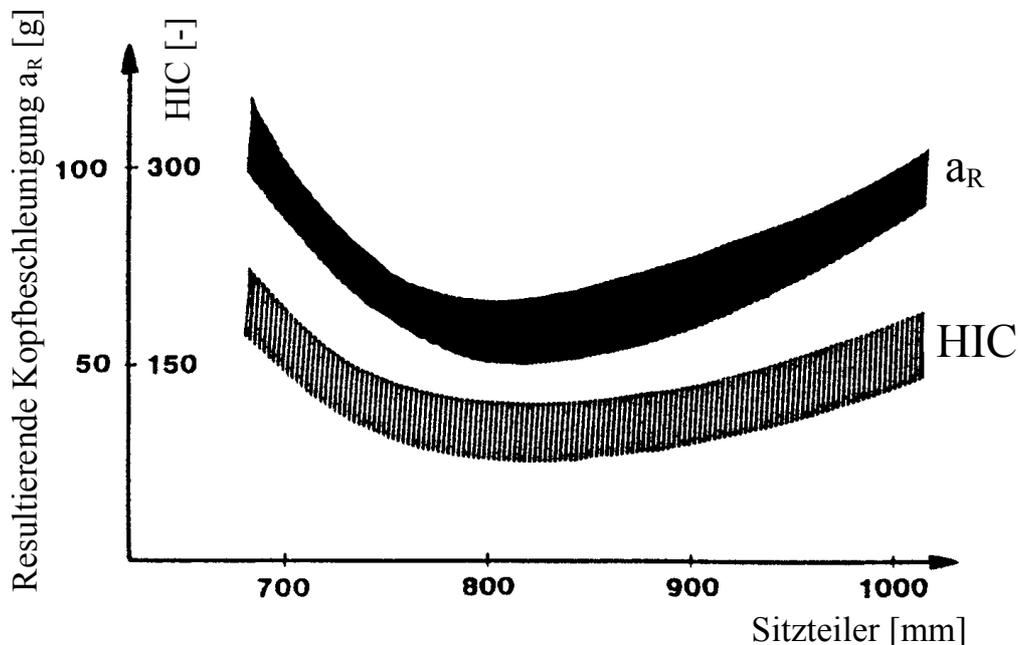


Abbildung 6.4: Abhängigkeit der resultierenden Kopfbeschleunigung des Dummy und des HIC - Wertes vom Sitzteilermaß nach [49]

Neben dem Einfluss des Sitzteilers auf die Insassenbelastungen bei Frontalkollision wurde untersucht, bis zu welchem Einstellwinkel der Rückenlehne die Schutzfunktion des Vordersitzes als Rückhaltesystem gegeben ist. Unter Einstellwinkel, der in Reisebussen bis zu 15° betragen kann, ist der Winkel zwischen Normal- und Ruheposition zu verstehen. Die Untersuchungen brachten folgende Ergebnisse:

- A. Die Sitzlehne des Vordersitzes bietet bei einer Neigung bis zu 30° zur Senkrechten eine hinreichende Rückhaltewirkung für den Insassen beim Körperanprall.
- B. Ist der Neigungswinkel der Sitzlehne des Vordersitzes kleiner als beim dahinter befindlichen Sitz, kann die Kopfbelastung das 1,5 bis 2fache der Belastung bei Normalposition betragen.

- C. Die Lehnenneigung sollte generell auf einen Winkel von 30° zur Senkrechten begrenzt werden.

6.2.6 Beispiele für realisierte Sicherheitskonzepte bei Reisebussen

Die Bemühungen hinsichtlich einer Verbesserung der passiven Sicherheit von Reisebussen wurden von der Industrie aufgegriffen und führten zu neuen Konzepten bei der Innenraumgestaltung, insbesondere der Fernreisebusse. Hier hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass das Potential einer insassensicherheitsorientierten Fahrzeuggestaltung nicht auf die Struktur der Fahrzeuge beschränkt bleiben darf, sondern auch die Innenraumgestaltung in die Sicherheitsüberlegungen mit einbezogen werden muss.

So werden die Sitze in modernen Reisebussen als Rückhaltesysteme ausgebildet, wobei z. B. ein unter dem Sitz angebrachtes Energieabsorptionselement zusammen mit der Rückenlehne eine Art Knautschzone ausbildet, so dass der Fahrgast beim Frontalaufprall von der Lehne des Vordersitzes aufgefangen wird [57].

Beim MAN Reisebus FRH 422 [58] wurde die Fahrgastzelle entsprechend den Kriterien nach ECE-R 66 ausgelegt, um den Schutz der Insassen bei Unfällen mit Umkippen und Überschlag des Busses zu verbessern. Die Fahrgastzelle wurde versteift, ein variables Sitzteilermaß ist durch den Verzicht auf Podeste im Fahrgastraum möglich. Alle Sitze können mit Beckengurten ausgerüstet werden, die ebenfalls zu einem verbesserten Fahrgastschutz beim Umstürzen des Busses beitragen. Des weiteren wurden ausschließlich nicht splitternde Materialien für den Innenraum verwendet.

Beim Neoplan-Reisebus "Starliner" sind die oberen Gurtpunkte der Dreipunktgurte an Mittelsäulen befestigt, die zwischen den Doppelsitzen eingebaut sind und die Gurtkräfte aufnehmen können. Zusätzlich zu den Anforderungen nach ECE-R 66 hinsichtlich des Überrollschutzes wurden die kritischen Knotenpunkte zwischen Seitenwandprofilen und Fenstersäulen mit Epoxidharz aufgefüllt, wodurch die Steifigkeit der Struktur in diesem Bereich um ca. 80% verbessert werden konnte [59].

6.2.7 Übertragbarkeit der Sicherheitsanforderungen auf Schienenfahrzeuge

Die Deutsche Bahn AG hat Empfehlungen bzw. Vorschriften für die Konstruktion und Festigkeitsprüfung von Sitzen für Reisezug- und Triebwagen in einem umfassenden Regelwerk zusammengefasst [69]. Forderungen zur passiven Sicherheit, die den vorbeugenden Fahrgastenschutz betreffen, sind darin bereits zum Teil enthalten, können aber nicht als ausreichend angesehen werden.

Bisher gibt es keine international verbindlichen Regelungen bzw. Vorschriften für die Prüfung und Genehmigung von Sitzen in Schienenfahrzeugen für den Personenverkehr. Als Grundlage für eine sicherheitsbasierte Gestaltung von Fahrgastsitzen in Schienenfahrzeugen können jedoch die Erkenntnisse aus den Untersuchungen des TÜV Rheinland hinsichtlich der Gestaltung eines Bussitzes als Rückhaltesystem und die Vorschriften der ECE-R 80 verwendet werden, da sie den Gegebenheiten und Erfordernissen bei der Auslegung von Sitzen in Schienenfahrzeugen am besten entsprechen. Die Fahrgastsitze im schwedischen Hochgeschwindigkeitszug X2000 sind z. B. bereits gemäß den Prüfkriterien nach ECE-R 80 getestet worden. Auf dieser Basis sind weiterführende theoretische und experimentelle Untersuchungen notwendig, um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus dem Busbereich auf Schienenfahrzeuge zu prüfen, was auch Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist.

7 Verfahren zur Überprüfung der passiven Sicherheit

7.1 Allgemeines

Mit der zunehmenden Bedeutung der passiven Sicherheit in der Kraftfahrzeugtechnik wurden experimentelle Methoden (Crashtests) zur Bewertung der Crashsicherheit von Kraftfahrzeugen entwickelt. Sie wurden hauptsächlich genutzt, um die für eine crashgerechte Auslegung der Fahrzeuge notwendigen Maßnahmen unter möglichst realistischen Bedingungen zu entwickeln und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zu überprüfen. Die Optimierung der Sicherheitsmaßnahmen erfolgte dabei im wesentlichen durch Komponententests und/oder Versuche mit Prototypen. Entsprachen die dabei ermittelten Systemparameter nicht den Sicherheitsanforderungen waren in der Regel aufwendige Änderungen in der Konstruktion der relevanten Fahrzeugbereiche und/oder der Insassen - Schutzsysteme im Innenbereich (Rückhaltesysteme) notwendig. Dieser Prozess war aufgrund der Zerstörung der Testfahrzeuge bei der Erprobung und des großen Zeitaufwandes zur Herstellung der Muster bzw. Prototypen mit hohen Entwicklungskosten verbunden. Die zunehmende Verkürzung der Entwicklungszeiten, die den Fahrzeugherstellern für die Entwicklung neuer Fahrzeugtypen zur Verfügung stehen, und die hohen Kosten der Crashversuche haben dazu geführt, dass die experimentellen Verfahren mehr und mehr durch rechnerische Simulation ersetzt werden. Entsprechend den internationalen Vereinbarungen und gesetzlichen Vorschriften bildet die experimentelle Simulation heute aber nach wie vor die Voraussetzung für eine Zulassung der Fahrzeuge für den Straßenverkehr.

Mit der Bereitstellung leistungsfähiger Simulationswerkzeuge in den vergangenen 20 Jahren ist die Voraussetzung für eine weitgehende Substitution der praktischen Crashtests durch numerische Simulationsverfahren geschaffen worden. Diese sind geeignet, in einem sehr frühen Stadium der Entwicklung Probleme bei der crashgerechten Auslegung der Fahrzeuge zu erkennen. Sie stellen damit die Grundlage für die Integration von Konstruktion und Berechnung bereits in der Konzept- und Entwurfsphase und für die Auslegung der Fahrzeuge bis hin zur Serienreife dar.

Aufgrund der bisher fehlenden gesetzlichen Vorschriften für die Zulassung von Schienenfahrzeugen hinsichtlich ihrer crashgerechten Auslegung sind die bisher für einzelne Fahrzeugtypen entwickelten Maßnahmen zur Verbesserung der passiven Sicherheit vor allem auf die Initiative einzelner Betreiber und Vertreter der Schienenfahrzeugindustrie sowie von Forschungseinrichtungen zurückzuführen. Aus ökonomischen Gründen wurde dabei in der Entwicklungsphase weitestgehend auf die rechnerische Simulation und experimentelle Tests zur Auslegung der für die Crashesicherheit relevanten Komponenten und Fahrzeugstrukturbereiche zurückgegriffen und erst nach Abschluss des Entwicklungsprozesses in Einzelfällen auch Fahrzeugtests im Maßstab 1:1 (sog. "Fullscale - Tests") durchgeführt.

Neben Versuchen mit Komponenten und Teilstrukturen sowie Fahrzeugtests werden auch Versuche mit Modellen im verkleinerten Maßstab durchgeführt, um grundsätzliche Zusammenhänge des Crashverhaltens, bspw. eines Zugverbandes mit Variation der Eigenschaften der Energieabsorptionselemente, zu untersuchen. Diese Modellversuche haben aber den entscheidenden Nachteil, dass ihre Ergebnisse, insbesondere was das Strukturverhalten im Versagensfall betrifft, nur sehr eingeschränkt auf die Realität übertragbar sind.

Bedingt durch die hohen Versuchskosten, kommt den rechnerischen Simulationswerkzeugen bei der Entwicklung von Sicherheitsmaßnahmen für Schienenfahrzeuge eine herausragende Bedeutung zu. Zusätzlich sind Komponententests und Versuche mit den für die crashgerechte Auslegung relevanten Fahrzeugteilstrukturen notwendig, um die Ergebnisse der rechnerischen Simulation zu validieren. Bei Schienenfahrzeugen ist diese gesonderte Prüfung von Komponenten sinnvoll, da eine konsequente Trennung von Wagenkastenstruktur und Energieabsorptionsbereichen und -einrichtungen erfolgt.

Ergänzend sollten Schlittenversuche mit ausgewählten Innenausrüstungskomponenten (Fahrgastsitze, Tische, unterschiedliche Sitzvarianten etc.) durchgeführt werden, um den Einfluss des Interieurs und dessen Anordnung im Innenbereich von Schienenfahrzeugen sowie ggf. die Wirkung zusätzlicher Schutzsysteme auf die Insassenbelastungen zu untersuchen und die Ergebnisse der Simulationsrechnungen zu validieren.

Tabelle 7.1 zeigt einen Vergleich der beschriebenen Verfahren zur Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der passiven Sicherheit hinsichtlich der Erfüllung unterschiedlicher Kriterien.

Tabelle 7.1: Verfahren zur Entwicklung und Bewertung von Sicherheitsmaßnahmen

Kriterien	Simulations- rechnung	Modellversuch	Komponenten- test	Fullscale-Test
Realitätsnähe	-	--	+	++
Reproduzier- barkeit	++	++	+	+
Parametervari- ation	++	++	+	--
Zuverlässigkeit der Ergebnisse	--	--	+	++
Kosten	↓	↓	→	↑

7.2 Experimentelle Verfahren (Crashtests)

Die Optimierung einer Fahrzeugstruktur, mit dem Ziel die Insassensicherheit im Crashfall zu erhöhen, erfordert einen zeit- und kostenintensiven Entwicklungsprozess von hoher Komplexität. Der Fahrzeugcrash als ein dynamisches Problem ist durch den Zusammenhang von Struktur- und Trägheitsverhalten gekennzeichnet. Für die Bewertung der Eignung eines Sicherheitskonzeptes sind deshalb nicht nur das Deformationsverhalten der Energieabsorptionsbereiche und der Struktur, sondern auch die mit dem Strukturverhalten korrespondierende Funktionalität der Schutzsysteme im Innenbereich, Evakuierungskonzepte zur Befreiung der Insassen aus dem Fahrzeug, Maßnahmen zur Verbesserung des Brandschutzes etc. von Interesse.

7.2.1 Experimentelle Simulation zum Nachweis der Crashesicherheit von Kraftfahrzeugen

Wie bereits erwähnt, wird die Crashesicherheit von Kraftfahrzeugen mit Hilfe von verschiedenen Integraltests, bei denen das Unfallverhalten des gesamten Fahrzeuges Gegenstand der Untersuchungen ist, sowie mittels Komponententests und Versuchen mit Teilstrukturen des Fahrzeuges überprüft. Auszugsweise sollen an dieser Stelle einige wichtige Testverfahren für den Frontal-, Seiten- und Heckaufprall genannt werden:

Frontalaufprall nach FMVSS²⁷ 208. Das Fahrzeug prallt frontal gegen eine starre, undeformierbare Barriere (100% Überdeckungsgrad). Die Aufprallgeschwindigkeit beträgt 30 mph (48,3 km/h). Das Fahrzeug ist mit zwei Dummies besetzt, an denen Kräfte und Beschleunigungen gemessen werden, um die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Schutzkriterien zu prüfen. Neben den Dummybelastungen werden auch das Verhalten der Windschutzscheibe (FMVSS 219), des Scheibenrahmens (FMVSS 212) und die Tankleckage (FMVSS 301) bewertet [39].

Frontalaufprall nach ECE²⁸-R 94. Der Anprall des Fahrzeuges erfolgt mit einer Geschwindigkeit von 56 km/h gegen eine deformierbare Barriere (40% Überdeckungsgrad, fahrerseitig). Neben verschiedenen Kriterien zur Bewertung der Insassenbelastungen sind in dieser Vorschrift auch Anforderungen an das Deformationsverhalten und das Vorhandensein bestimmter Eigenschaften des Fahrzeuges während und nach der Prüfung formuliert. So dürfen sich z. B. während der Prüfung keine Türen öffnen; nach dem Anprall müssen die Insassen ohne Einsatz von zusätzlichen Werkzeugen aus dem Fahrzeug befreit werden können. Aus der Kraftstoffanlage dürfen nur geringe Mengen Kraftstoff austreten. Außerdem sind Grenzwerte für die Lenksäuleneindringung in die Fahrgastzelle vorgeschrieben [61].

Seitenaufprall nach FMVSS 214. Eine bewegliche, deformierbare Barriere prallt unter einem Winkel von 27° auf die Seitenstruktur des stehenden Testfahrzeugs. Mit der Schrägstellung der Barriere soll der Einfluss der Eigengeschwindigkeit des sich beim Unfall in Längsrichtung

bewegenden Fahrzeugs berücksichtigt werden. Die Anprallgeschwindigkeit beträgt 33,5 mph (53,9 km/h). Das Fahrzeug ist mit zwei Dummies besetzt, die mit Beschleunigungsaufnehmern zur Bewertung der Insassenbelastungen bestückt sind [62].

Seitenaufprall nach ECE-R 48. Eine bewegliche, deformierbare Barriere prallt mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h unter einem Winkel von 90° auf die Seitenstruktur des stehenden Testfahrzeugs. Zur Bewertung der Insassenbelastungen ist der Fahrersitz mit einer Prüfpuppe besetzt, an der Beschleunigungen gemessen werden [63].

Heckaufprall nach FMVSS 301. Ein Schlitten mit einer starren Barriere prallt mit einer Geschwindigkeit von 30 mph (48,3 km/h) gegen das stehende Fahrzeug. Prüfkriterien sind hierbei die Dichtheit der Kraftstoffanlage, das Deformationsverhalten der Heckstruktur, die Verschiebung des H-Punktes (Hüftgelenk) der Insassen im Fond und die Möglichkeit zur Türöffnung [64].

Als Test zur Bewertung der Crashesicherheit von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Erhalts des Überlebensraumes der Fahrgastzelle ist der Überschlagversuch nach **FMVSS 208** zu nennen.

Komponententests. Für die Überprüfung sicherheitsrelevanter Kraftfahrzeugkomponenten sind u. a. folgende Testverfahren vorgeschrieben:

- Sicherheitsgurte und Gurtverankerungspunkte (**ECE-R 16, FMVSS 210**)
- Sitz- und Sitzverankerung (**ECE-R 17**)
- Bewertung bei Seitenkollisionen: Seitentürsteifigkeit (**FMVSS 214a**)
Türscharniere und Schlösser (**ECE-R 11**)
Stoßfänger (**ECE-R 42**)
Dachfestigkeit (**FMVSS 216**)

²⁷ FMVSS: Federal Motor Vehicle Safety Standards (USA)

²⁸ ECE: Economic Commission for Europe (UNO)

7.2.2 Anwendung experimenteller Verfahren in der Schienenfahrzeugtechnik

7.2.2.1 Allgemeines

Die in der Kraftfahrzeugtechnik durchgeführten Tests zum Nachweis der Kollisionssicherheit geben wichtige Hinweise zur Bewertung der Insassensicherheit im Crashfall. Beispielsweise sind Anforderungen an die Fahrzeugsitze und deren Befestigung sowie an die Möglichkeiten der Evakuierung der Insassen im Kollisionsfall auch für Schienenfahrzeuge relevant. Aufgrund anderer Randbedingungen können die Tests aber nicht 1:1 auf Schienenfahrzeuge übertragen werden.

Die in der Schienenfahrzeugfertigung üblichen Kleinserien, die hohen Fertigungskosten und der gegenüber der Kraftfahrzeugtechnik geringere Stellenwert der passiven Sicherheit lassen Fullscale - Tests nicht als geeignetes Mittel zum Nachweis der Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen erscheinen. In der Vergangenheit wurden Fullscale - Tests und insbesondere Komponententests zur Validierung von Simulationsrechnungen im Zusammenhang mit neuen Konzepten zur Verbesserung der passiven Sicherheit von Schienenfahrzeugen durchgeführt. Nachfolgend sollen einige Beispiele für die experimentelle Simulation und deren wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse dargestellt werden.

7.2.2.2 Die Versuche der ehemaligen Deutschen Reichsbahn zur Überprüfung der Festigkeit von Stahlwagenkästen in Leichtbauweise

Die Deutsche Reichsbahn führte in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts Festigkeits- und Zerstörungsversuche an Reisezugwagen mit geschweißtem Wagenkasten in Stahl - Leichtbauweise durch. Art und Umfang der Versuche waren in Bezug auf die experimentelle Simulation in der Schienenfahrzeugtechnik bis dahin einmalig. Die durch diese Versuche gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Festigkeitsauslegung von Schienenfahrzeugen sind nach wie vor Bestandteil der einschlägigen Regelwerke [2].

Neben verschiedenen Versuchen zur Prüfung der statischen Festigkeitseigenschaften der Fahrzeuge in Leichtbauweise wurden auch Tests zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Kastenkonstruktion durchgeführt:

- Schwingversuche zur Ermittlung der vertikalen und horizontalen Eigenfrequenzen des Wagenkastens,
- Schwingversuche bis zum Versagen einzelner Bauteile,
- Auflaufversuche zur Ermittlung des Verhaltens bei Zusammenstößen von Schienenfahrzeugen und
- Sturzversuche zur Ermittlung des Verhaltens der Wagenkastenstruktur beim Abrollen über eine hohe Böschung.

In Bezug auf die Kollisionssicherheit soll an dieser Stelle nur auf die Auflaufversuche eingegangen werden. Eine ausführliche Beschreibung der statischen und dynamischen Versuche und die Darstellung der Versuchsergebnisse sind in [2] zu finden.

Die Versuche wurden mit dem Rohbauwagenkasten des Einheitssteuerwagens 3. Klasse der damaligen Deutschen Reichsbahn durchgeführt. Neben dem Fahrgastbereich war der Wagen mit Führerstand und Postbereich an den sich gegenüberliegenden Fahrzeugenden ausgestattet.

Im Vorfeld der Auflaufversuche wurden hinsichtlich der passiven Sicherheit der Reisezugwagen u. a. folgende Thesen getroffen:

- A. Die Deformation der Wagenkastenstruktur von Personenzugwagen bei Unfällen darf nicht zur Gefährdung der Reisenden führen (Wahrung des Überlebensraumes für die Fahrgäste).
- B. Bei höheren Kollisionsgeschwindigkeiten soll die Energie durch Verformung definierter Bereiche der Wagenkastenstruktur absorbiert werden; eine vollständige Deformation des Wagenkastens ist zu verhindern (Nutzung der sich an den Wagenenden befindenden Vorräume zur Energieabsorption).

- C. Die Energieabsorption ist über Biegung und Falten der Profile und Blechträger zu realisieren. Die Stahlträger sollten hierzu eine hinreichende Sicherheit gegen Ausknicken aufweisen.
- D. Die Profile für die Seitenwand - Tragkonstruktion ("Seitenwandsäulen") sind mit dem Untergestell und dem Dach zu verschweißen, um eine möglichst scherfeste Verbindung zwischen Seitenwand und Untergestell oder Dach herzustellen.
- E. Für die Innenverkleidung ist splitterfreier Werkstoff zu verwenden; die Verwendung von Holz sollte aus diesem Grund vermieden werden.

Bei den durchgeführten Auflaufversuchen betrug die Masse des nicht vollständig ausgerüsteten Steuerwagens ca. 15 t. Der Anprall erfolgte auf einen stehenden ungebremsten Güterwagen mit einer Gesamtmasse von 30 t. Beide Fahrzeuge waren mit den UIC-zugelassenen Zug- und Stoßvorrichtungen ausgestattet.

Der Anprall des Steuerwagens auf den stehenden Güterwagen erfolgte bei niedrigen Auflaufgeschwindigkeiten bis 23,5 km/h mit dem Postraum - Wagenende in Fahrtrichtung voran. Die Auflaufversuche mit dem Führerstandsende voran wurden bei einer Relativgeschwindigkeit von 42 km/h bzw. 49 km/h durchgeführt, um die Sicherheit des Triebfahrzeugpersonals gegen Verlust an Überlebensraum bei höheren Kollisionsgeschwindigkeiten zu untersuchen. Vor dem Versuch mit einer Geschwindigkeit von 49 km/h wurde das Führerstandsende aufgrund der starken Beschädigung aus dem Vorversuch durch eine leicht modifizierte Variante komplett ersetzt.

Um die aus den Auflaufversuchen resultierenden Verformungen schnell und hinreichend genau auswerten zu können, wurden u. a. die Seitenwände des Wagenkastens mit einem rechteckigen Liniennetz versehen ("Finite - Element - Methode") und Spanndrähte entlang der Seitenwände in Längsrichtung und zwischen den Tür- und Fensterausschnitten in diagonaler Richtung angebracht (Abbildung 7.1).

Bei den Versuchen mit geringer Anprallgeschwindigkeit von bis zu 12 km/h traten an der Wagenkastenstruktur keine bleibenden Verformungen auf. Es zeigte sich aber, dass bereits bei dieser geringen Geschwindigkeit die behelfsmäßige Befestigung der Sitzgestelle an der Sei-

tenwand und der Trennwände am Wagendach teilweise versagten. Aus diesen Erkenntnissen wurde die Forderung abgeleitet, dass nicht nur die Konstruktion der Sitzgestelle und Trennwände, sondern auch deren Verbindungen mit dem Wagenfußboden, dem Dach und den Seitenwänden derart auszuführen sind, dass die aus dem Anprall resultierenden Belastungen (Flieh- und Scherkräfte) aufgenommen werden können.

Bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 20 km/h kam es erstmals zu einer bleibenden Verformung des Untergestells und der Wagenkastenaufbauten. Die Wagenkastenstruktur wurde bei diesem Versuch um 1 mm über die Gesamtlänge gestaucht.

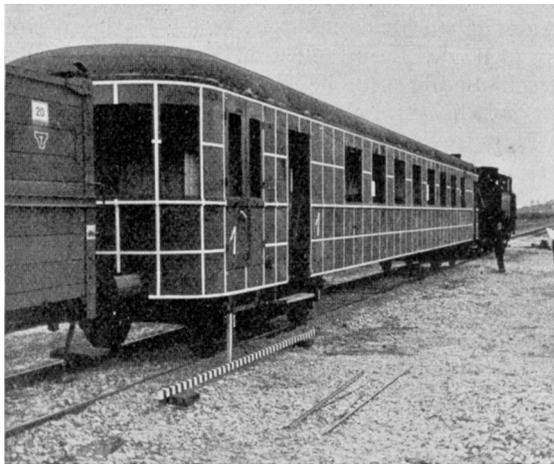


Abbildung 7.1: Für die Auflaufversuche vorbereiteter Steuerwagen

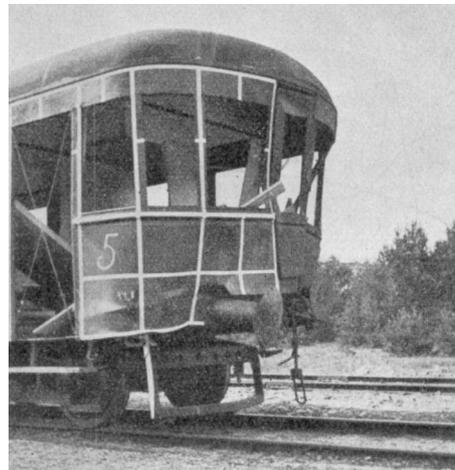


Abbildung 7.2: Plastische Deformation des Führerstandsendes bei einer Geschwindigkeit von 42 km/h

Der Versuch mit einer Auflaufgeschwindigkeit von 42 km/h führte zu einer vollständigen plastischen Deformation der Wagenkasten - Vorbaustruktur bis zum ersten Querträger (ca. 500 mm Deformationsweg - Abbildung 7.2). Zur Verbesserung der Sicherheit des Triebfahrzeugpersonals wurde vorgeschlagen, den Führerstandstisch gezielt in die Energieabsorption durch die Kastenstruktur einzubeziehen. In Vorbereitung des Auflaufversuches mit 49 km/h wurden hierzu die Führerstandstischplatte mit dem Fenstergurt und die Seitenwände des Tisches mit den Stirnwandprofilen und der Untergestellkonstruktion verschweißt.

Auch beim Versuch mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 49 km/h trat an der den Fahrgastbereich betreffenden Wagenkastenstruktur keine wesentliche Beschädigung auf. Die plastische Deformation erfolgte hier weitestgehend im Untergestell bis zum ersten Querträger. Bleibende Verformungen traten auch im unteren Bereich der Seitenwände und im Dachbereich in Höhe des Hauptquerträgers auf (Abbildung 7.3). Aufgrund des in die Wagenkastenkonstruktion einbezogenen Führerstandstisches konnte aber die Eindrückung in Höhe der Fensterbrüstung auf 100 bis 150 mm begrenzt werden.

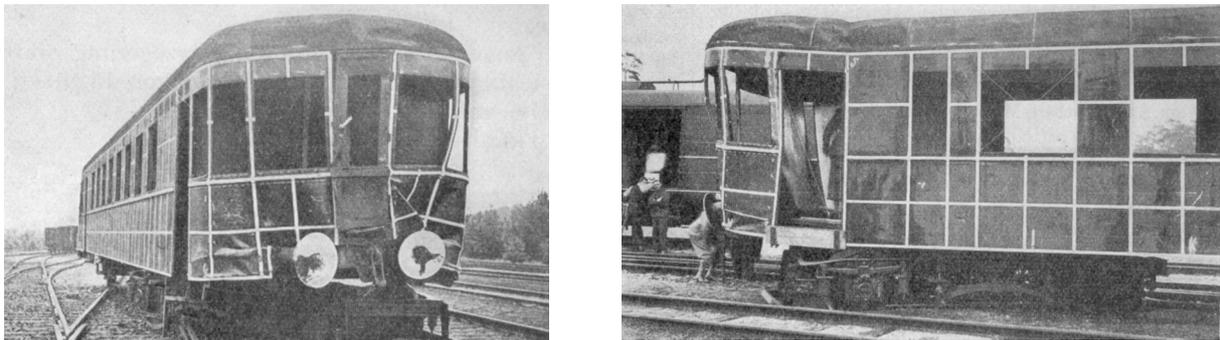


Abbildung 7.3: Deformierte Wagenkastenstruktur nach dem Auflaufversuch mit einer Geschwindigkeit von 49 km/h

Durch die definierte Energieabsorption in Form einer plastischen Deformation der Untergestell - Vorbaustruktur wurde bereits ein hohes Maß an passiver Sicherheit hinsichtlich der Wahrung des Überlebensraumes für die Fahrgäste erreicht. Aussagen in Bezug auf die Belastungen der Insassen beim Anprall auf die Inneneinrichtung waren nicht Ziel der Untersuchungen und konnten zu dieser Zeit mit der zur Verfügung stehenden messtechnischen Ausstattung auch noch nicht getroffen werden.

7.2.2.3 ORE²⁹-Frage B 165: Dynamische Festigkeit der Führerstandskabine gegenüber Frontalstößen

Im Rahmen des Versuchsprogramms zur Untersuchung der Aufprallfestigkeit des Führerstands bereiches wurden im Mai/Juni 1990 Fullscale - Tests auf dem Versuchsring der Polnischen Staatsbahn (PKP) in der Nähe von Zmigrod durchgeführt (Abbildung 7.4). Die Versuchsreihe beinhaltete 3 Versuche, bei denen ein einzelnes Fahrzeug auf ein stehendes Fahrzeug prallte (Tabelle 7.2) [65].



Abbildung 7.4: Gestoßenes Fahrzeug nach dem Aufprallversuch [65]

²⁹ ORE: Ehemaliges Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes (heute ERRI: European Rail Research Institute)

Tabelle 7.2: Aufprallversuche innerhalb der ORE-Frage B 165

	Aufprallendes Fahrzeug	Gestoßenes Fahrzeug	Versuchsziel
Versuch 1	m = 40 t, v = 2,5 m/s, Mittelpufferkupplung und Aufkletterschutz- vorrichtungen	m = 40 t, v = 0, Mittelpufferkupplung und Aufkletterschutz- vorrichtungen	Gewährleistung der Funktion der Messtechnik, Verhalten des Energieabsorbers der Mittel- pufferkupplung
Versuch 2	wie Versuch 1, v = 16 m/s	wie Versuch 1	Verhalten der Strukturelemente und der Energieabsorptionsein- richtungen
Versuch 3	m = 40 t, v = 12 m/s, Zughaken und Seiten- puffer, normale Puf- ferhöhe	m = 40 t, v = 0, Zughaken und Seiten- puffer, Anhebung des Fahrzeuges um 100 mm	Untersuchung der Bedingun- gen für das Aufklettern, Ein- fluss des Phänomens "Aufklet- tern" auf das Strukturverhalten und die Energieabsorption

Die Versuche haben nur zum Teil die Vorhersagen bezüglich des Deformationsverhaltens der Energieabsorptionseinrichtungen bestätigt. Gute Übereinstimmung zwischen prognostizierter Energieabsorption und Versuchsergebnissen lagen bei den verwendeten Aluminiumwagen und GFK-Rohren vor, wobei letztere die Energie bei höherem Kraftniveau und geringerem Deformationsweg absorbierten. Unterhalb des Fußboden des Führerstandes angeordnete Energieabsorber aus Stahl haben sich dagegen nicht wie erwartet deformiert und deshalb nur 30 bis 45 % der prognostizierten Energie aufgenommen. Trotz Höhenunterschiedes der Pufferebenen der Fahrzeuge beim 3. Versuch fand kein Aufklettern der Fahrzeuge statt. Durch das einseitige Versagen der Kopfstückbefestigung und der daraus resultierenden asymmetrischen Krafteinleitung entgleiste das Drehgestell unterhalb des Führerstandes des gestoßenen Fahrzeugs. Die Entgleisung führte nicht zu einer Einschränkung des Überlebensraumes für den Triebfahrzeugführer.

7.2.2.4 Aufprallversuche mit modifizierten Reisezugwagen (British Rail Research)

Die Forschungseinrichtung der ehemaligen Staatsbahn British Rail (BR) hat 1994 Versuche mit an den Fahrzeugenden modifizierten Reisezugwagen (Bauart BR Mk1, Masse $m = 35$ t)

zur Erprobung von Aufkletterschutzvorrichtungen und Energieabsorptionsbereichen durchgeführt [66].

Die Fahrzeugenden wurden hierzu mit Energieabsorptionszonen von 0,5 m Länge und die führende Fahrzeugfront eines Zugverbandes mit 1 m Deformationslänge versehen. Die Testreihe beinhaltete 4 Versuche mit Kollisionsgeschwindigkeiten bis zu 60 km/h:

- A. Zusammenstoß von zwei Wagengruppen mit je 5 Fahrzeugen, die an den Wagenenden mit Energieabsorptionseinrichtungen versehen sind. Der Anprall erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 15 km/h auf den stehenden Zugverband, um zu überprüfen, dass bei kleiner Kollisionsgeschwindigkeit keine bleibende Deformation im Kupplungsbereich und in der Struktur auftritt.
- B. Zusammenstoß von zwei Zugverbänden mit je 5 Fahrzeugen (Versuchskonfiguration wie 1.). Der Anprall erfolgte mit 60 km/h, um die aus den Simulationsrechnungen gewonnenen Ergebnisse bezüglich der Energieabsorption an den Fahrzeugenden und die Verteilung der Energieaufnahme auf den gesamten Zugverband zu bestätigen. Es trat keine Entgleisung auf, die plastische Deformation beschränkte sich auf die vorgesehenen Energieabsorptionsbereiche (Abbildung 7.5).
- C. Zusammenstoß von zwei nicht modifizierten Fahrzeugen, um den Fall des Aufkletterns zu simulieren. Fahrzeug 1 prallt mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h auf das stehende Fahrzeug 2, das um 100 mm angehoben wurde. Der Wagenkasten des aufprallenden Fahrzeugs wurde am Wagenende auf einer Länge von 1,5 m plastisch deformiert; das gestoßene Fahrzeug entgleiste.
- D. Zusammenstoß von zwei einzelnen modifizierten Fahrzeugen, mit dem Ziel, die Maßnahmen zur Vermeidung des Aufkletterfalles zu bewerten (Versuchskonfiguration wie 3.). Durch den Einsatz von Aufkletterschutzeinrichtungen konnte das Aufklettern und die Entgleisung des gestoßenen Fahrzeuges verhindert werden. Es erfolgte eine kontrollierte Energieabsorption in den dafür vorgesehenen Bereichen an den Fahrzeugenden.

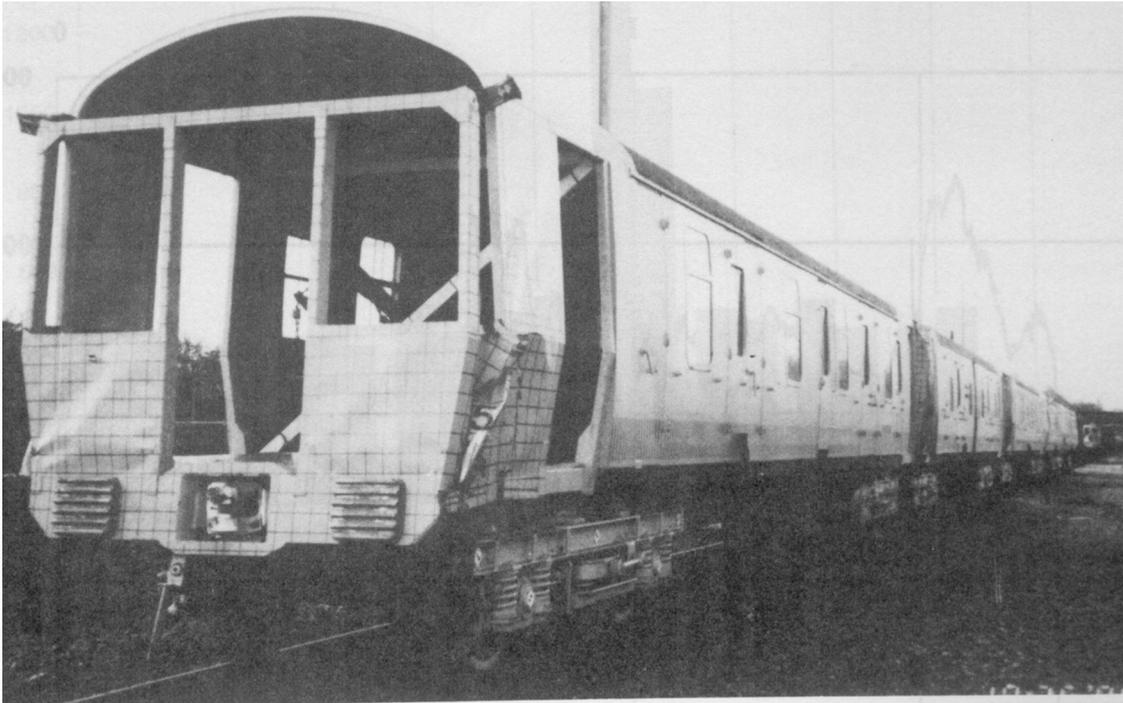


Abbildung 7.5: Aufprallender 5-Wagen-Zug mit modifizierten Fahrzeugenden nach dem Versuch 2 [66]

Aus den Versuchen wurden folgende Anforderungen an die Energieabsorptionsbereiche crashgerecht gestalteter Schienenfahrzeuge abgeleitet:

- Auslegung der Fahrzeugenden für einen Energiebetrag von 0,75 MJ für die Kuppelsektionen zwischen den Fahrzeugen und 1,5 MJ für die unmittelbare Anprallzone an der Zugfront bei einem maximalen Verformungsweg von 1 m,
- Begrenzung der für das Strukturversagen notwendigen Initialkraft auf 3000 kN; Niveau der Strukturkraft soll zwischen 2000 und 3000 kN liegen und
- Fahrzeugfront muss bei Belastung oberhalb des Untergestells einen Energiebetrag von 0,5 MJ absorbieren können, um den Kompatibilitätsanforderungen (Zusammenstoß mit konventionellen Fahrzeugen ohne Aufkletterschutzeinrichtungen) zu genügen.

7.2.2.5 Experimentelle Simulation zum Nachweis der crashgerechten Gestaltung des Hochgeschwindigkeitszuges TGV 2N und des Dieseltriebfahrzeuges für den Regionalverkehr X73500 (SNCF)

Auf der Grundlage eines realen Unfalls - Zusammenprall des TGV SE Nr. 70 (Grenoble - Lyon) mit einem Schwertransport (Gesamtmasse ca. 80 t) auf einem Bahnübergang mit einer Kollisionsgeschwindigkeit von ca. 110 km/h (1988)- hat die Französische Staatsbahn (SNCF) für dieses Szenario Maßnahmen zur Verbesserung der Kollisionssicherheit neuer TGV - Generationen abgeleitet. [18], [67], [68], [69], [70], [71] und [72]

Im Februar 1994 wurde von der SNCF ein Fullscale - Crashtest mit einem Endwagen des Doppelstock - TGV in Aluminium - Integralbauweise durchgeführt, um das Konzept zur Energieabsorption durch definierte Fahrzeugstrukturbereiche experimentell zu bestätigen. Der Test sah den Aufprall einer Fahrzeugkonfiguration mit Energieabsorptionsbereichen mit einer Geschwindigkeit von 45 km/h auf eine stehende, gebremste Wagengruppe von 6 Fahrzeugen (Gesamtmasse: 480 t) vor (Abbildung 7.6).

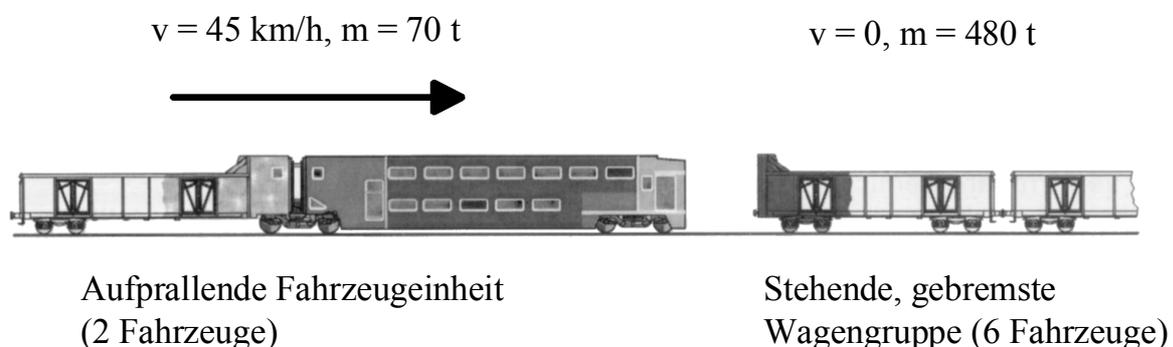


Abbildung 7.6: Fahrzeugkonfiguration beim Crashversuch mit energieabsorbierenden Wagenkastenstrukturen des TGV 2N [70]

Für den Versuch wurde ein TGV 2N - Endwagen über ein Mittenfahrwerk mit einer energieabsorbierenden Endsektion eines Mittelwagens verbunden. Die Endsektion war an einem konventionellen Güterwagen montiert. Mit dieser Versuchsanordnung konnten sowohl die Frontstruktur des Endwagens zur Seite des Triebkopfes als auch die Energieabsorptionsberei-

che zwischen den Mittelwagen erfasst werden. Die Gesamtmasse der aufprallenden Fahrzeugeinheit betrug 70 t.

Ausgehend von einem Gesamtbetrag zu absorbierender Energie von 20 MJ, sollte der Test die prognostizierte Energieverteilung auf verschiedene Strukturbereiche bestätigen:

- ca. 8 MJ durch die Deformationsbereiche des Triebkopfes (Stahlprofile),
- ca. 5 MJ durch die Deformationsbereiche des Endwagen (Aluminium - Strangpressprofile) und
- ca. 7 MJ durch die restlichen Fahrzeuge des Zugverbandes (Aluminium - Strangpressprofile).

Um sicherzustellen, dass die aus dem Anprall resultierenden Kräfte durch die Deformationsbereiche aufgenommen werden, wurden zwischen Triebkopf und Endwagen Aufkletterenschutzvorrichtungen montiert.

Zur Wahrung des Überlebensraumes für den Triebfahrzeugführer und die Fahrgäste sind die Führerstandskabine und die Fahrgastbereiche gegen eine statische Längsdruckkraft von 5000 kN (Triebkopf und Endwagen) bzw. 4000 kN (Mittelwagen) ausgelegt worden. Das Niveau der für die Deformation der Energieabsorptionsbereiche notwendigen Initialkraft liegt bei ca. 2200 bis 2500 kN.

Durch den Test konnten die Ergebnisse der rechnerischen Simulation zur Auslegung der Energieabsorptionsstrukturen bestätigt werden. Die plastische Verformung beschränkte sich auf die hierfür vorgesehenen Endbereiche der Fahrzeuge (Deformationsweg: ca. 1 m); kein Fahrzeug entgleiste (Abbildung 7.7).

Deformationsbereiche des Endwagens

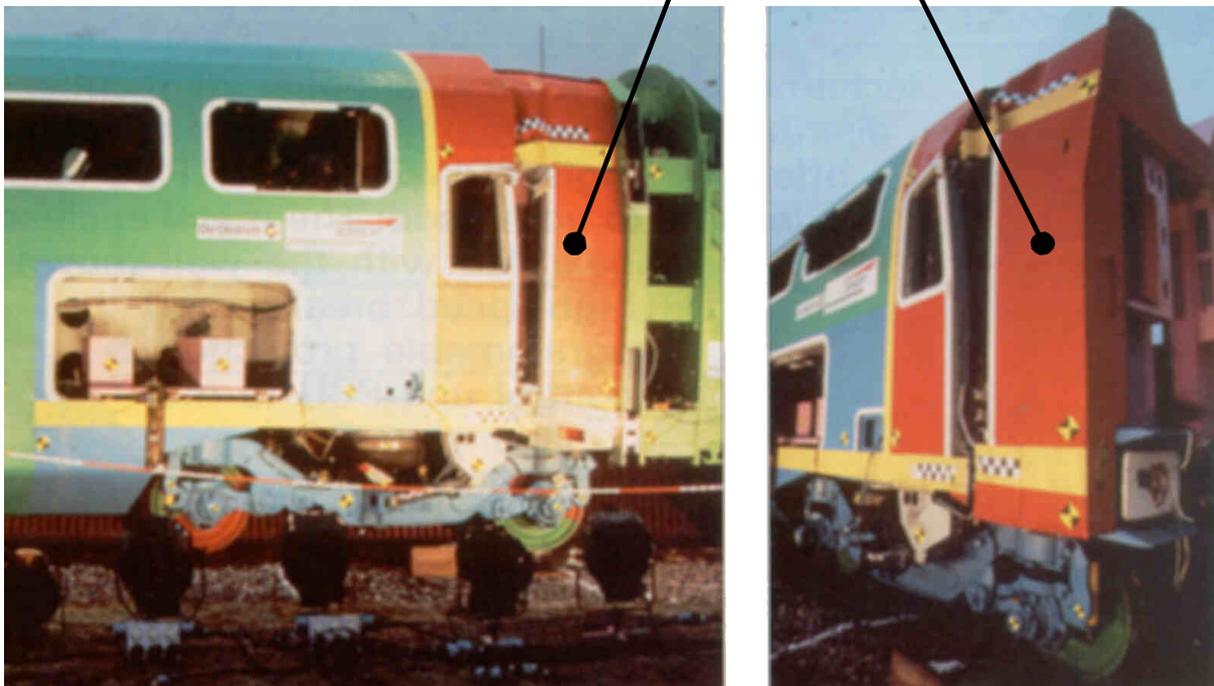


Abbildung 7.7: Fullscale - Crashversuch mit dem doppelstöckigen TGV2N [67]

Die Ergebnisse des erfolgreich durchgeführten Fullscale - Crashtestes mit den neuen Energieabsorptionsstrukturen flossen in die Entwicklung der crashgerecht gestalteten Dieseltriebfahrzeuge TER X72500 und TER X73500 für die SNCF ein. Zur Verbesserung der Sicherheit des Triebfahrzeugführers und der Fahrgäste im Kollisionsfall wurden bei diesen Fahrzeugen an den Enden Energieabsorptionsbereiche mit einer Aufnahmefähigkeit von 4 MJ bzw. 2 MJ integriert. Nach Komponententests zur Validierung der Simulationsrechnungen wurden im Juni 1997 bzw. im September 1998 erfolgreich Fullscale - Crashversuche mit der kompletten energieabsorbierenden Frontstruktur inklusive Führerstandskabine durchgeführt (Abbildung 7.8).

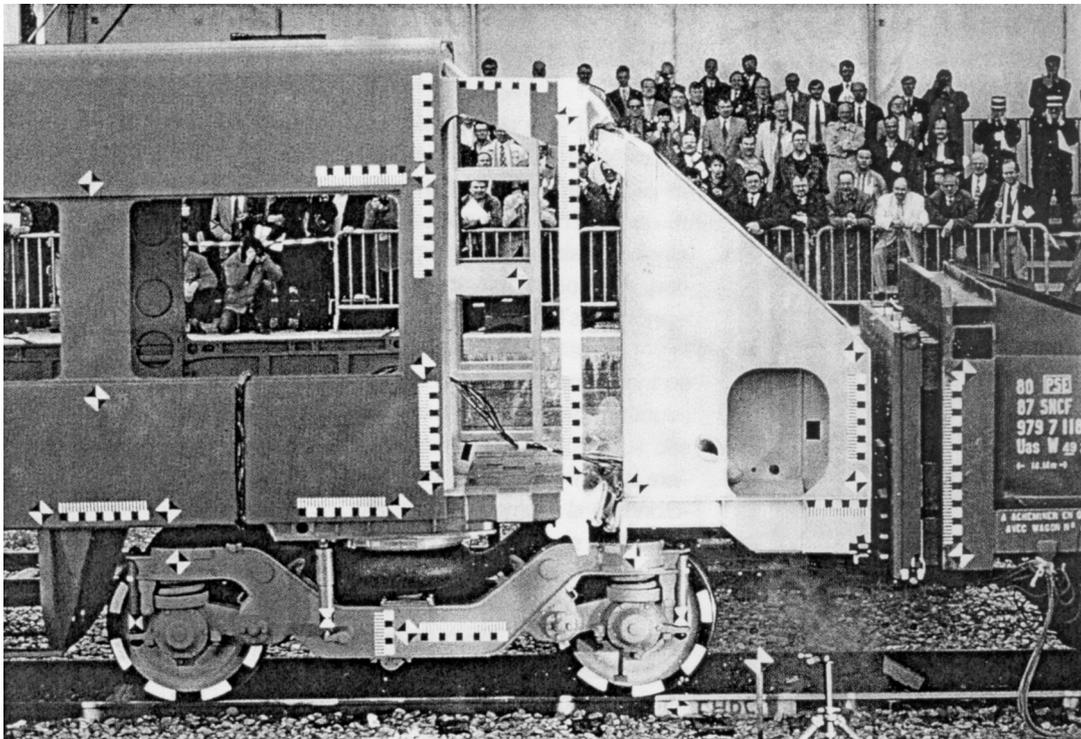


Abbildung 7.8: Fullscale-Crashtest mit der energieabsorbierenden Frontstruktur des Dieseltriebfahrzeuges TER X72500 [71]

7.2.2.6 Komponententests mit unterschiedlichen Energieabsorptionselementen (Fa. Bombardier Transportation)

Im Zusammenhang mit der Entwicklung energieabsorbierender Komponenten zur Verbesserung der Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen wurden von der ehemaligen Institut für Schienenfahrzeuge GmbH, Berlin (heute: Bombardier Transportation) Tests mit verschiedenen Strukturen und Werkstoffen durchgeführt [73].

Nach Versuchen mit einfachen Strukturen (Aluminiumschaum, Aluminium-Wabenstrukturen, Kunststoff-Wabenstrukturen, Kastenprofilen aus Stahl und FVK³⁰-Rohren) unter Laborbedingungen zur Bewertung der Energieabsorptionseigenschaften wurden zwei Komponententwicklungen an Schienenfahrzeugen auf einer Versuchsanlage getestet (Abbildung 7.9):

- Geschweißtes Kastenprofil aus Stahl in Kombination mit Kunststoffwabenkern
- Crashtoptimiertes FVK-Rohr mit Fasertrigger für die Versagensinitialisierung



Abbildung 7.9: Komponententest mit einem Kastenprofil aus Stahl in Kombination mit einem Kunststoffwabenkern [73]

³⁰ FVK: Faserverstärkter Kunststoff

Die unter realitätsnahen Bedingungen durchgeführten Komponententests haben die Ergebnisse der Simulationsrechnungen weitgehend bestätigt (Abbildung 7.10). Der Vergleich der Ergebnisse zeigt aber auch, dass die beim realen System vorhandenen Elastizitäten bei der rechnerischen Simulation nur schwer berücksichtigt werden können, so dass sich hier bei der Berechnung eine unrealistisch hohe Kraftspitze zum Initiieren des Verformungsprozesses ergibt (siehe Abschnitt 7.3.1 Abs. 5).

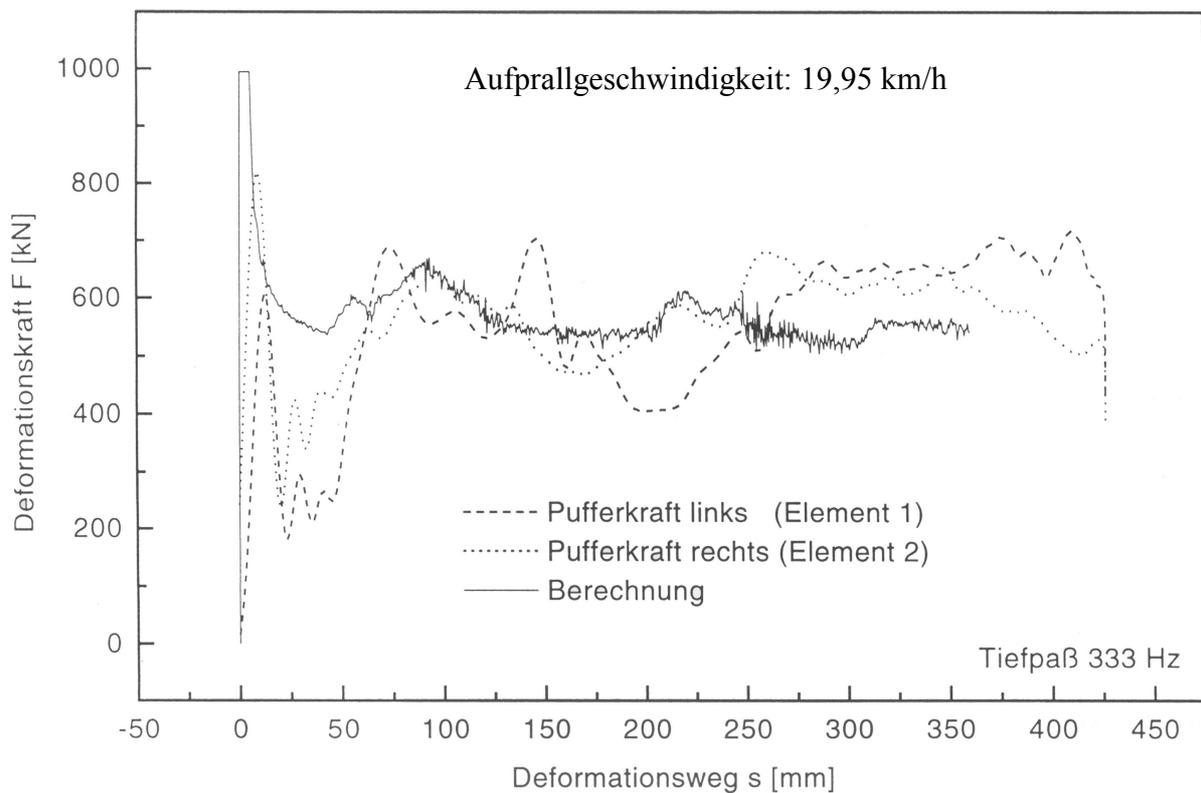


Abbildung 7.10: Vergleich der Ergebnisse aus rechnerischer Simulation und Versuch für ein Kastenprofil aus Stahl mit Kunststoffwabenkern [74]

Mit Hilfe des Wabenkerns konnte die mittlere Verformungskraft für das Kastenprofil von ca. 200 kN auf ca. 600 bis 700 kN - je nach Ausführungsvariante - erhöht werden.

Das crashoptimierte FVK-Rohr weist ein gegenüber dem Kastenprofil günstigeres spezifisches Energieabsorptionsvermögen auf (Betrag der absorbierten Energie, bezogen auf die Masse in [kJ/kg]). Schwieriger gestaltet sich die Integration dieser Profile in die bestehende Fahrzeugstruktur.

7.2.2.7 Schlittentests mit konventionellen Fahrgastsitzen von Reisezugwagen (John A. Volpe National Transportation Systems Center)

Im Auftrag des U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration führte das John A. Volpe National Transportation Systems Center 1996 statische Tests und Schlittenversuche mit Fahrgastsitzen von Reisezugwagen des amerikanischen Verkehrsunternehmens Amtrak durch [75].

Die mittels experimenteller Simulation ermittelten Daten lieferten Erkenntnisse über das Verhalten der Sitzbefestigungen und -konstruktion bei vorgegebener Fahrzeugverzögerung und beim Aufprall des Insassen auf den Sitz sowie über die dabei auftretenden Insassenbelastungen.



Abbildung 7.11: Schlittenversuche mit konventionellen Fahrgastsitzen von Reisezugwagen [75]

Vor den dynamischen Tests wurden quasistatische Versuche durchgeführt, um das Energieabsorptionsvermögen unter statischer Belastung zu ermitteln. Danach erfolgten Schlittenversuche mit den in Reihenbestuhlung angeordneten Sitzen, um Ergebnisse von Simulationsrechnungen mit Mehrkörper-Systemen (MKS) zu validieren und das Verhalten der Sitze und Sitz-

befestigungen beim Anprall des Insassen zu prüfen. Außerdem wurden die relevanten Kriterien zur Bewertung der Insassenbelastungen ermittelt. Der Prüfschlitten wurde hierfür mit einem dreieckigen Beschleunigung-Zeit-Verlauf mit unterschiedlichen Beschleunigungsmaxima (5 g, 8 g, 10 g) entgegen der Sitzrichtung der Prüfpuppen beschleunigt, so dass diese auf das vordere Sitzpaar prallten. Die Gesamtdauer der Beschleunigungscharakteristik betrug 250 ms.

Die dynamischen Versuche zeigten, dass die Sitzbefestigungen insbesondere an den Wandarretierungspunkten bei Beschleunigungsmaxima von 8 g bzw. 10 g versagten. Die daraus resultierende Sitzdrehung um die Sockelhalterung führte zum Abscheren des Sitzes und in der Folge zu einer sehr ungünstigen Dummykinematik in Verbindung mit dem Herausschleudern der Prüfpuppen aus dem Sitz.

Die ermittelten HIC-Werte ergaben eine höhere Kopfbelastung für den Fall des Beschleunigungsmaximums von 5 g aufgrund der bei diesem Test fast ausschließlich im elastischen Bereich erfolgten Verformung der Sitzlehne. Das hierbei auftretende Kraftniveau beim Anprall der Dummies auf die Rückenlehne des Vordersitzes erreichte nicht den für den Beginn der plastischen Verformung notwendigen Wert. Der starke Rückpralleffekt führte dazu, dass die Prüfpuppen in ihren Sitz "zurückgeworfen" wurden. Dabei traten höhere Beschleunigungswerte für den Kopf auf.

Das aus dem Anprall der Dummies auf das vordere Sitzpaar resultierende Kraftniveau bei den 8 g- und 10 g-Schlittenversuchen führte zur plastischen Deformation der Sitzkonstruktion und -befestigung und zum Versagen des Rückenlehnen-Neigemechanismus an den Vordersitzen. Die damit verbundene Energieabsorption hatte eine Verzögerung der Dummies über einen längeren Zeitraum und niedrigere HIC-Werte zur Folge.

7.2.2.8 Fullscale - Crashtests mit einem Reisezugwagen (TTCI, USA)

Zur Untersuchung der Insassenbelastung in Abhängigkeit von der Sitzgestaltung und -befestigung wurden vom Transportation Technology Center, Inc. (TTCI) in Pueblo (USA) im November 1999 und im April 2000 Fullscale - Crashversuche mit Reisezugwagen durchgeführt (Abbildung 7.12) [76].

Beim ersten Test prallte ein einzelner Wagen mit Standardsitzen mit einer Geschwindigkeit von 56 km/h gegen eine Stahlbetonwand. Eine erste Auswertung des Versuchs ergab, dass aufgrund des Versagens der Sitzbefestigungen und Sitzkonstruktion die nicht angegurtenen Dummies durch das Fahrzeug geschleudert wurden, so dass für diesen Fall schwerste Verletzungen der Insassen zu erwarten sind. Die mit einem Gurt versehenen Messpuppen wurden durch den Gurt kontrolliert zurückgehalten.

Ein zweiter Versuch wurde im April 2000 mit verstärkten Sitzbefestigungen und Rückenlehnen durchgeführt. Der Aufprall von zwei gekuppelten Reisezugwagen auf eine Stahlbetonwand erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 42 km/h. In den Fahrzeugen befanden sich 13 Messpuppen. Gegenüber dem ersten Versuch konnte ein verbesserter Schutz, insbesondere der nicht angegurtenen Insassen, nachgewiesen werden.



Abbildung 7.12: Fullscale-Crashtest mit konventionellen Reisezugwagen [77]

7.3 Rechnerische Simulationsverfahren

In der Konzept- und Entwicklungsphase neuer Fahrzeuge besitzen heute moderne Berechnungs- und Simulationswerkzeuge eine herausragende Bedeutung, bspw. für die Festigkeitsauslegung der Fahrzeugstruktur, für die Bewertung der Fahrzeugdynamik und des Komforts, um bereits vor Realisierung der Konstruktion Aussagen über das Fahrzeugverhalten bei unterschiedlichen Belastungen treffen zu können. Die rechnerische Simulation ist dabei kostengünstiger als Messungen an realisierten Prototypen. Mit Hilfe mathematischer Modelle können insbesondere physikalische Größen berechnet werden, die mit experimenteller Simulation nicht oder nur mit großem Aufwand zu erfassen sind. Auswirkungen von kleinen Parameteränderungen auf eine komplexe Gesamtstruktur lassen sich aufgrund der sehr guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse untersuchen.

Auch in der rechnerischen Simulation zur Untersuchung und Bewertung der Insassensicherheit im Crashfall werden heute meist numerische Verfahren auf der Grundlage der Finite Element - Methode (FEM) oder Mehrkörpersystem - Programme (MKS) angewendet. Es ist abzusehen, dass beide Verfahren zukünftig mehr und mehr miteinander kombiniert werden, um ihre Leistungsfähigkeit für eine bessere Abbildung des realen Systems zu optimieren. Systeme der Starrkörper- und Strukturdynamik können z. B. für die Crashsimulation von Zugverbänden als Kombination komplexer Fahrzeugmodelle und FEM - Teilstrukturen unter Einbeziehung von MKS - Insassenmodellen genutzt werden.

7.3.1 Finite-Element-Methode (FEM)

Für die Beschreibung mechanischer Problemstellungen werden häufig das Prinzip der virtuellen Arbeit und das Prinzip der virtuellen Verrückungen als Grundlage für die rechnerische Simulation verwendet. Es besagt, dass für einen Schnittkraftzustand, der die Gleichgewichtsbedingungen und die Schnittkrafrandbedingungen erfüllt, die virtuelle Formänderungsenergie gleich der virtuellen Arbeit der äußeren Kräfte für jeden virtuellen Verschiebungs-/ Verzerungszustand ist [78].

Für die numerische Behandlung dynamischer Aufgabenstellungen, wie z. B. bei Crashsimulationen, lautet das modifizierte Prinzip der virtuellen Verrückungen unter Einbeziehung der Massenträgheitskräfte:

Nach der Methode der Finiten Elemente wird die Gesamtstruktur in beliebig viele einzelne Elemente zerlegt. Für jedes dieser Elemente wird eine stetige Ansatzfunktion vorgegeben und in das Prinzip der virtuellen Verrückungen eingesetzt. Es entsteht ein im allgemeinen nichtlineares System gewöhnlicher Differentialgleichungen 2. Ordnung für die unbekanntes Verschiebungen $u(t)$.

Mit dem hergeleiteten Gleichungssystem lassen sich sowohl die unbekanntes Auflagerkräfte, als auch die Verschiebungen berechnen, aus denen mit Hilfe von Stoffgesetz und Verschiebungs-/ Verzerrungsrelation die Schrittkräfte ermittelt werden können. Den Verschiebungsvektor erhält man mit Hilfe von numerischer Integration des Differentialgleichungssystems zu diskreten Zeitpunkten. Durch die Diskretisierung entwickelt sich aus dem Prinzip der virtuellen Verrückungen ein Verfahren der Finiten Elemente, dass die Behandlung statischer und dynamischer Probleme ermöglicht.

Die Gesamtlösung des Finite-Element-Modells entspricht dabei um so besser der Realität, also den realen Verformungen und Spannungen, je feiner die Vernetzung die reale Strukturgeometrie abbildet, d. h. je mehr Finite Elemente für die Vernetzung verwendet werden. Eine grob vernetzte Struktur weist im elastischen Bereich ein steiferes Verhalten als eine fein vernetzte Struktur auf, da durch das Einsetzen eines Näherungsansatzes in das Prinzip der virtuellen Verrückungen die im System gespeicherte Formänderungsenergie von unten angenähert wird.

Durch den Einsatz von Finite-Element-Programmen ist es heute möglich, bereits in einem sehr frühen Entwicklungsstadium Aussagen zur crashgerechten Gestaltung eines neuen Fahrzeugs zu treffen. In der Kraftfahrzeugtechnik beschränkt sich die Modellierung dabei nicht nur auf das Fahrzeug, sondern schließt auch Dummies und Kollisionspartner (z. B. deformierbare Barrieren gemäß den nach den gesetzlichen Vorschriften geforderten Tests) ein. Neben der statischen und dynamischen Festigkeitsberechnung werden FEM-Tools in der Schienenfahr-

zeugtechnik zur Dimensionierung von Energieabsorptionskomponenten und komplexer Crashstrukturen eingesetzt (Abbildung 7.13).

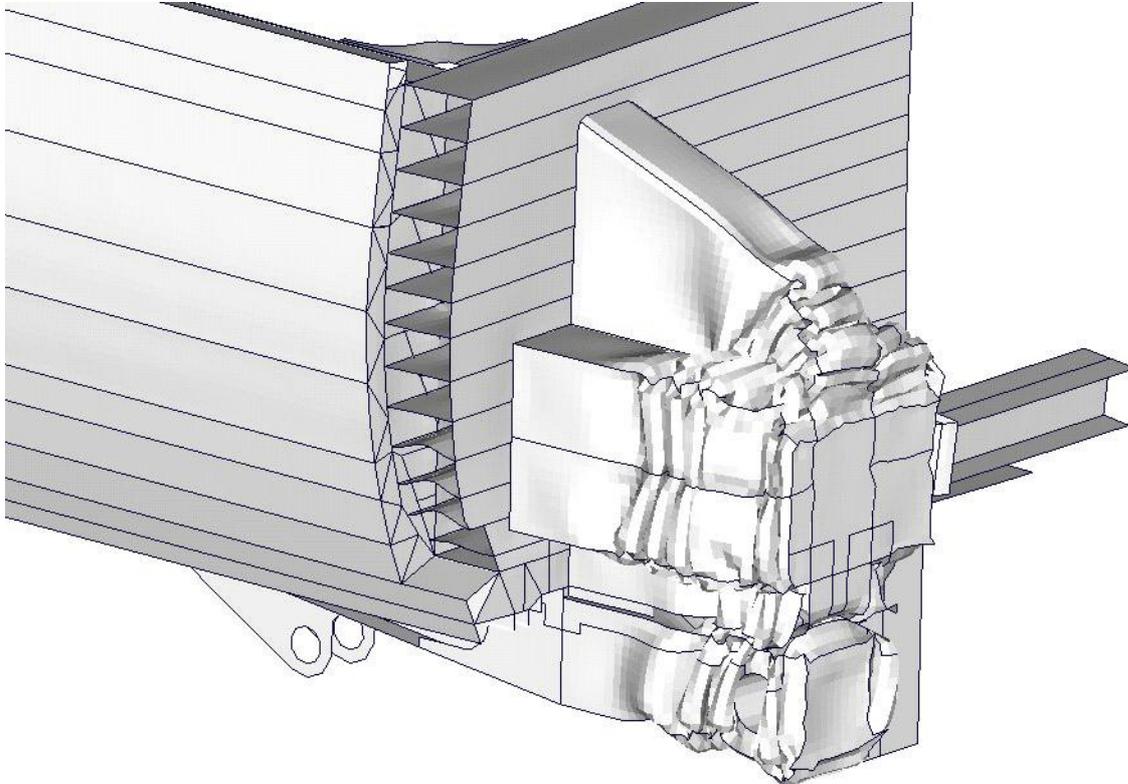


Abbildung 7.13: Beispiel für die rechnerische Simulation von Deformationsstrukturen mit Hilfe von FEM [79]

Mit Hilfe der FEM - Simulationen ist es möglich, die aus den numerischen Berechnungen gewonnenen Ergebnisse in Form von Maßnahmen zur Verbesserung der Crashesicherheit unmittelbar in die Konstruktion einfließen zu lassen. Durch eine enge Verflechtung von Berechnung und Konstruktion kann der Entwicklungsaufwand für ein crashgerecht gestaltetes Fahrzeug auf ein vertretbares Maß reduziert werden.

7.3.2 Mehrkörpersysteme (MKS)

Ein Mehrkörpersystem setzt sich aus einer beliebigen Anzahl massebehafteter starrer Körper zusammen, die über Gelenke, Federn und Dämpfer miteinander verbunden sind (Abbildung 7.14). Die Beschreibung des Bewegungsverhaltens der Starrkörper erfolgt mit Hilfe von gene-

realisierten Koordinaten, deren Anzahl gleich der Zahl ξ der Freiheitsgrade ist. Das entstandene Gleichungssystem mit ξ Gleichungen für die ξ Freiheitsgrade stellt ein nichtlineares und gewöhnliches Differentialgleichungssystem zweiter Ordnung dar.

Die Lösung des Gleichungssystems, also die Ermittlung der Weg- und Geschwindigkeitskoordinaten, erfolgt mit numerischen Näherungsverfahren, bspw. des RUNGE-KUTTA-NYSTRÖM-Verfahrens oder des NEWTON-RAPHSON-Verfahrens, wobei die Genauigkeit der Lösung unmittelbar von der Schrittweitengröße abhängt. Mit zunehmender Schrittweite nimmt der Fehler stark zu, während bei Schrittweitenverkleinerung eine rasche Fehlerreduzierung zu erzielen ist.

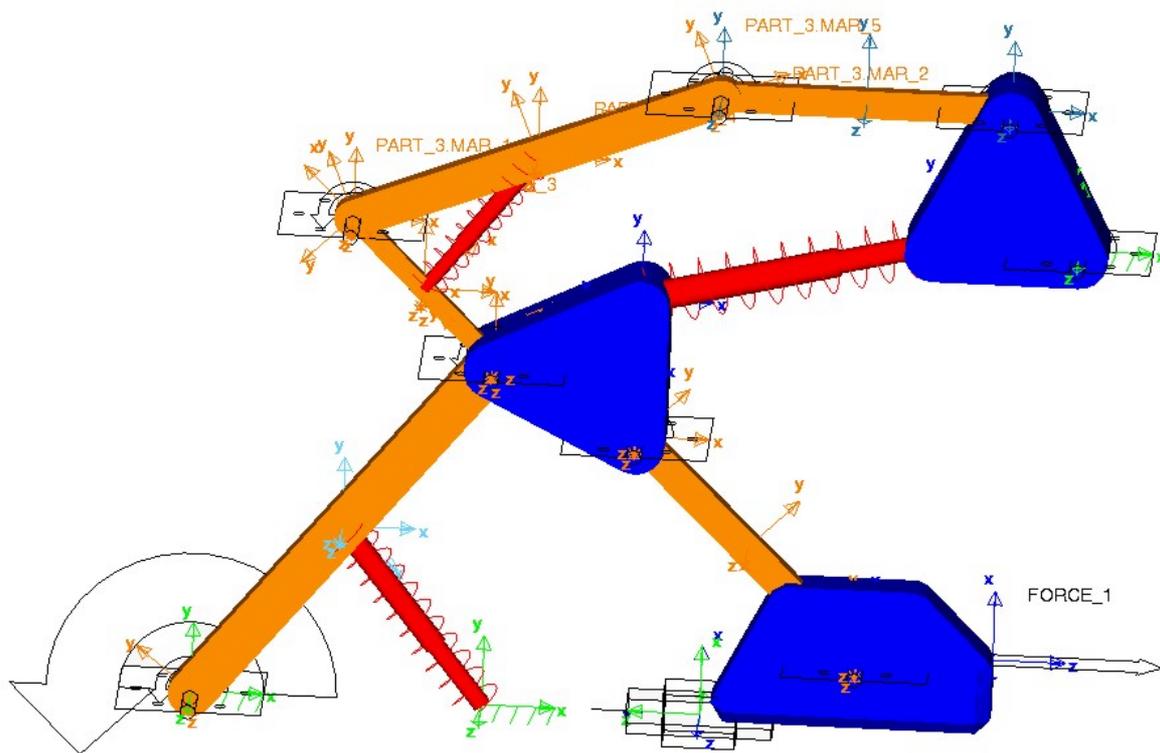


Abbildung 7.14: Beispiel für ein Mehrkörpersystem (Modellierung mit der MKS-Simulationssoftware ADAMS®)

Ein großer Vorteil von Mehrkörpersystemen gegenüber der Finite-Element-Methode ist, dass zur Lösung eines mechanischen Problems wesentlich weniger Modellgleichungen aufgrund der relativ kleinen Anzahl an Freiheitsgraden benötigt werden und die Rechenzeit damit erheblich kürzer ist. Zudem ist es durch einen schnellen Modellaufbau gekennzeichnet und geeignet für umfangreiche Parametervariationen.

In der Crashsimulation werden Mehrkörpersysteme zur Modellierung von Dummies, Interieur und Rückhaltesystemen verwendet, um die Insassenbelastungen im Crashfall zu ermitteln. Als Eingangsdaten dienen u. a. die aus der experimentellen und rechnerischen Strukturcrashsimulation ermittelten Geschwindigkeit-Zeit-Charakteristiken der Fahrzeuge. Für die Insassenmodelle werden dabei Ellipsoide verwendet, die standardmäßig über Gelenke miteinander verbunden sind. Das Interieur wird mit Hilfe unterschiedlicher Flächen und Körper modelliert. Unter Verwendung verschiedener Module zur Definition der Kontaktbedingungen lassen sich die Durchdringung zwischen den Starrkörpern des Insassenmodells und der Innenraumstruktur und die auf den Insassen wirkenden Kräfte berechnen.

Das Fortschreiten einer verbesserten Leistungsfähigkeit der Rechnersysteme hat dazu geführt, dass in der Kraft- und Schienenfahrzeugtechnik für die Untersuchung des Verhaltens der Deformationsstrukturen heute ausschließlich FEM-Programme verwendet werden. Auch für die Ermittlung der Insassenbelastungen werden zunehmend Modelle unter Verwendung von FEM-Teilstrukturen für die biomechanische Modellierung menschlicher Körperteile (z. B. Kopf) und für die Modellierung von Rückhaltesystemen und Anprallflächen (Airbag, Windschutzscheibe, Knieanprallfläche) verwendet. Dabei tritt allerdings mehr und mehr die Koppelung von MKS- und FEM-Programmen in den Vordergrund, um die Vorteile beider Systeme in einer integrierten rechnerischen Crashsimulation besser ausnutzen zu können.

8 Grundsätzliche Zusammenhänge zur Verbesserung der passiven Sicherheit von Schienenfahrzeugen

8.1 Bahnspezifische Besonderheiten hinsichtlich der Insassenposition im Crashfall

Die Position der Insassen in Kraftfahrzeugen ist durch die Sitzanordnung, die eindeutige Vorfahrtrichtung und Rückhaltesysteme (Sicherheitsgurte, Kindersitze) sehr genau festgelegt. Untersuchungen, Modelle und Simulation zur Crashkinematik im Straßenverkehr, die sich mit der Bewegung der Fahrzeuginsassen und der zu erwartenden Verletzungsschwere beschäftigen, basieren auf diesen systemspezifischen Gegebenheiten.

Zweifellos ist aber die Verletzungsschwere wesentlich von dem Aufenthaltsort, der Sitzposition und der Körperhaltung des Insassen abhängig. In Schienenfahrzeugen können diese Bedingungen sehr unterschiedlich ausfallen: Der Fahrgast kann sitzen, stehen oder ist in Bewegung. Er kann sich im Abteil- oder Großraumbereich, im Seiten- bzw. Mittelgang, auf Treppen (in Doppelstockfahrzeugen), im Schlafwagenabteil, im Restaurant-/Bistrobereich oder in Abteilen mit Sondereinrichtungen befinden.

Auch die Sitzposition der Fahrgäste in Schienenfahrzeugen ist oftmals sehr verschieden: Die Fahrzeuginsassen können auf ihrer linken oder rechten Körperhälfte sitzen, dabei die Beine ausstrecken oder kreuzen und zusätzlich die Rückenlehnenneigung von Normal- bis Ruhe- bzw. Liegestellung verändern. Demgegenüber kann die Sitzposition und Sitzhaltung des Triebfahrzeugführers relativ genau erfasst werden. Allerdings sind moderne Führerstände so gestaltet, dass die Führerpulte sowohl sitzend als auch stehend bedient werden können.

Da es nicht möglich ist, alle denkbaren Situationen für den Fahrzeuginsassen zu betrachten, müssen sich die Untersuchungen im wesentlichen auf die Fahrgastbereiche beschränken, wo sich der überwiegende Teil der Fahrgäste im Normalfall aufhält. Dies sind die Sitzbereiche in den Abteil- und Großraumwagen mit

- Reihenbestuhlung und
- vis-à-vis-Bestuhlung mit/ohne Tisch.

Fahrgäste in Schienenfahrzeugen können im Gegensatz zu Insassen in anderen Verkehrsmitteln (PKW, Bus, Flugzeug) sowohl in als auch entgegen der Fahrtrichtung sitzen. Im allgemeinen sind etwa die Hälfte aller Sitze in Fahrtrichtung und die andere Hälfte entgegen dieser angeordnet.

Dieser wesentliche Unterschied zu anderen Verkehrsmitteln hat zum einen die Konsequenz, dass Sitze in Schienenfahrzeugen hinsichtlich der passiven Sicherheit für verschiedene Belastungsrichtungen ausgelegt sein müssen. Infolge des Fehlens von Rückhaltesystemen (Sicherheitsgurte) kann es andererseits dazu kommen, dass ein Sitz unter Umständen den Aufprall von mehreren Fahrgästen ertragen muss. Dies ist zum Beispiel bei vis-à-vis - Anordnung dann der Fall, wenn die gegenüberliegenden Sitzplätze besetzt sind.

Gerade die Bewegungsfreiheit im einzelnen Wagen, als auch im Zugverband ist ein wesentliches Komfortkriterium des Schienenfernverkehrs im Vergleich mit anderen Verkehrsmitteln. Dieser Wettbewerbsvorteil – berechtigt durch das systembedingt hohe Niveau der aktiven Sicherheit – sollte nicht ohne zwingenden Grund aufgegeben werden.

8.2 Zusammenhang zwischen Fahrzeug- und Insassenverzögerung

Der bahnspezifische Komfortvorteil einer großzügigen Innenraumgestaltung, wie sie in den Sitzbereichen mit Reihenbestuhlung und vis-à-vis-Anordnung oder in Speisewagen zu finden ist, kehrt sich im Kollisionsfall oder bereits bei erhöhten Verzögerungswerten im Zusammenhang mit einer Gefahrenbremsung zu einem Nachteil für die Fahrgäste um.

Die Fahrzeuggeschwindigkeit und damit die Geschwindigkeit des Fahrgastraumes nimmt innerhalb kurzer Zeit schnell ab. Große Freiflächen bieten dem ungesicherten Fahrzeuginsassen im allgemeinen kaum Haltemöglichkeiten, so dass sich seine Differenzgeschwindigkeit relativ zum Fahrzeuginnenraum vergrößert. Nachdem er eine längere Strecke ohne Verzögerung zurückgelegt hat, wird der Fahrgast mit entsprechend hoher Relativgeschwindigkeit zum Fahrzeug auf die Inneneinrichtung prallen. Die dabei auftretenden Beschleunigungen, die der Insasse an bestimmten Körperteilen bzw. -zonen erfährt, können schwere und lebensbedrohende

Verletzungen verursachen. Hinzu kommt gegebenenfalls eine zusätzliche Intrusionsgefahr durch scharfkantige und spitze Gegenstände.

Folgender Zusammenhang ist dabei zu beachten: Je größer der zurückgelegte Weg des Insassen im Inneren des Fahrzeuges ist bzw. je länger er dem "freien Flug" ausgesetzt wird, um so größer sind seine Geschwindigkeit beim Aufprall relativ zum Fahrzeuginnenraum und die daraus resultierenden Beschleunigungswerte.

Die dazugehörigen Geschwindigkeit-Zeit-Charakteristiken von Fahrzeug und Insasse sind exemplarisch in Abbildung 8.1 dargestellt.

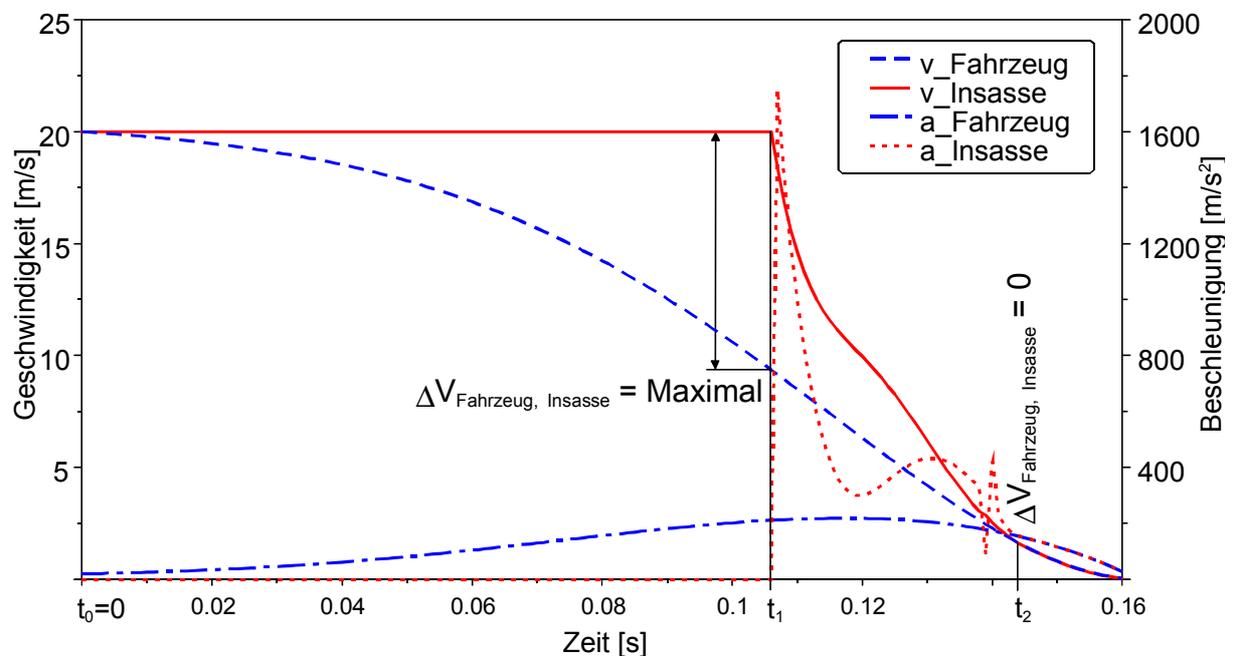


Abbildung 8.1: Zusammenhang zwischen Fahrzeugverzögerung und Insassenbelastung im Crashfall

Zu Beginn einer Kollision, Gefahrenbremsung etc., zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ s, weisen Fahrzeug und Insasse die gleiche Anfangsgeschwindigkeit v_0 auf. Mit Verringerung der Fahrzeuggeschwindigkeit nimmt die Geschwindigkeitsdifferenz des ungesicherten Insassen relativ zum Fahrzeug zu, bis sie beim Aufprall des Fahrzeuginsassen auf die Inneneinrichtung zur Zeit t_1 ihren Maximalwert $\Delta v_{\text{Fahrzeug, Insasse}} = \text{max.}$ erreicht hat.

Nach dem Aufprall auf die Fahrzeuginneneinrichtung erfährt der Insasse eine negative Beschleunigung, bis seine Relativgeschwindigkeit zum Fahrzeug zur Zeit t_2 gleich Null ist ($\Delta v_{\text{Fahrzeug, Insasse}} = 0$). Die Insassenverzögerung wird von der maximalen Relativgeschwindigkeit ($v_{\text{rel(max)}}$) und vom Zeitintervall $\Delta t = t_2 - t_1$ beeinflusst. Von diesen beiden physikalischen Größen hängt die Verletzungsschwere für den Insassen unmittelbar ab.

Ziel ist es, die Verzögerung des Fahrzeuginsassen so zu beeinflussen, dass die biomechanischen Belastungsgrenzen des Menschen bzw. die daraus abgeleiteten Schutzkriterien eingehalten werden. Zur Minderung der Verletzungsschwere ist es möglich, die Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Insasse durch den Einsatz von fahrzeugseitigen Energieabsorptionseinrichtungen mit entsprechender Deformationscharakteristik zu verringern, die eine moderate Verzögerung des Fahrzeuges bedingen - zumindest bis zum Aufprall des Insassen auf die Inneneinrichtung. Mit Hilfe von Rückhaltesystemen, die es dem Insassen ermöglichen, mit dem Fahrzeug zu verzögern, kann die Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Insasse ebenfalls reduziert werden.

Die Beeinflussung der Verzögerungscharakteristik des Insassen nach dem Aufprall auf die Inneneinrichtung - Vergrößerung des Zeitintervalls Δt - ist beispielsweise durch Verwendung von Energie absorbierenden Materialien bei der Innenraumgestaltung möglich.

Bei Annahme einer ideal plastischen Aufprallcharakteristik verbleibt der Fahrzeuginsasse nach dem Zeitpunkt t_2 im Kontakt mit den Fahrzeugausrüstungsgegenständen und verzögert zusammen mit dem Fahrzeug bis die Geschwindigkeit von Fahrzeug und Insasse gleich Null ist.

8.3 Zusammenhang zwischen Fahrzeugstruktur- und Innenraumgestaltung

Bisherige Untersuchungen auf dem Gebiet der Unfallforschung im Straßenverkehr haben zu der Erkenntnis geführt, dass der Gesamtverlauf, die Größe und die Dauer des Crashpulses einen wesentlichen Einfluss auf die Insassenkinematik und die Verletzungsschwere ausüben. Zudem stehen die verfügbaren fahrzeugseitigen Deformationslängen der Energieabsorptions-

einrichtungen im indirekten Zusammenhang mit der Beschleunigungsantwort der Fahrzeugzelle: Sind die zur Verfügung stehenden Deformationslängen sehr klein, müssen große Steifigkeitskennwerte bzw. Kraftniveaus für die Energieabsorptionselemente gewählt werden, um den gleichen Energiebetrag zu absorbieren, wie bei großen verfügbaren Deformationslängen. Dies führt zu einer für den Insassen nachteiligen Verzögerungscharakteristik des Fahrzeuges, die durch zusätzliche Maßnahmen in der Fahrgastzelle (z. B. Rückhaltesysteme) kompensiert werden muss.

Bei einem vorgegebenen Betrag an Energie, der im Kollisionsfall absorbiert werden soll, kann die Fahrzeugstruktur wie folgt gestaltet werden:

- steife Fahrzeugstruktur mit hohem Kraftniveau der Energieabsorptionseinrichtungen und kleinen Deformationslängen → große Verzögerungen für den Fahrgastbereich,
- weiche Fahrzeugstruktur mit geringem Kraftniveau der Energieabsorptionseinrichtungen und großen Deformationslängen → kleine Verzögerungen für den Fahrgastbereich,
- Struktursteifigkeit, Kraftniveau der Energieabsorptionseinrichtungen und Deformationslängen zwischen diesen beiden Extremfällen und
- Kombination unterschiedlicher Struktursteifigkeit und -festigkeit für verschiedene Fahrzeugbereiche: steife Fahrzeugstruktur mit hoher Strukturfestigkeit für den Fahrgastbereich (Gestaltungsvariante 1) und gezielte Gestaltung von Fahrzeugbereichen, wo sich keine oder nur selten Fahrgäste aufhalten, als Energieabsorptionsbereiche gemäß Variante 2.

Folgende Erkenntnisse hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen Fahrzeugstrukturgestaltung und Insassenbelastung lassen sich aus der Unfallforschung in der Kraftfahrzeugtechnik ableiten:

- A) Die Verwendung von Werkstoff mit relativ großer Streckgrenze, also hohem elastischen und plastischen Verformungsvermögen und somit hoher Energieaufnahmefähigkeit (z. B. vergüteter Stahl oder Faserverbund-Werkstoffe) für die Fahrzeugstruktur führt zu unerwünscht hohen Rückprallgeschwindigkeiten, mit der Konsequenz eines großen Verletzungspotentials für die Fahrzeuginsassen. In der Kraftfahrzeugtechnik lässt sich dieser Zusammenhang durch verbesserte Insassenschutzsysteme (Rückhaltesysteme) bei ent-

sprechender Charakteristik des Fahrzeugvorbaus weitestgehend entschärfen. Diese Maßnahmen können aber nur teilweise auf Schienenfahrzeuge übertragen werden.

- B) Die zunehmenden Forderungen nach Energie- und Kostenoptimierung sowie Wirtschaftlichkeit im Straßen- und Schienenverkehr führen zu leichteren Fahrzeugen, die in ihrer Fahrzeugstruktur steifer ausgelegt werden müssen, um mit schweren Fahrzeugen kompatibel zu sein. Gleichzeitig stellt sich damit die Frage, welche Deformationslängen realisiert werden müssen, damit die Belastungen für die Fahrzeuginsassen erträglich bleiben.
- C) Für einen optimalen Insassenschutz ist nicht nur der Gesamtbetrag der kinetischen Energie wichtig, der von Energieabsorptionseinrichtungen und der Fahrzeugstruktur im Kollisionsfall aufgenommen werden muss, sondern auch der Ort, der Zeitpunkt und das "Wie" (elastische und plastische Deformationscharakteristik) der Energieumwandlung.
- D) Ein verbesserter Insassenschutz unter Verwendung geeigneter Rückhaltesysteme, die eine optimale Kontrolle der Charakteristik der Insassenverzögerung ermöglichen, erweitert in jedem Fall auch die Möglichkeiten der Maßnahmen bei der Gestaltung der Fahrzeugstruktur.

Anhand dieser Punkte ist das Potential einer sicherheitsorientierten Gestaltung des Fahrgastbereiches und der Innenausrüstungskomponenten von Schienenfahrzeugen erkennbar. Eine den Möglichkeiten entsprechende Optimierung des Insassenschutzes durch gezielte Maßnahmen im Innenbereich hat direkte Auswirkungen auf die Auslegung der fahrzeugseitigen Energieabsorptionseinrichtungen und -bereiche. In Kombination mit einer optimalen Verteilung der Absorptionsenergie auf mehrere Fahrzeuge im Zugverband können geeignete Maßnahmen hinsichtlich des Interieurs dazu beitragen, Energie auch im Fahrgastbereich zu absorbieren und die auf die Insassen wirkenden Belastungen zu verringern. In der Folge ist es möglich, die Deformationslängen der Komponenten und Bereiche zur Energieabsorption bei höheren Kraftniveaus zu verkleinern sowie die Steifigkeit der Fahrzeugstruktur und damit die Fahrzeugmasse zu reduzieren.

9 Randbedingungen für die rechnerische Simulation

9.1 Allgemeines

Für die Untersuchung der Insassenkinematik und Ermittlung der Belastungen, die auf die Insassen wirken, ist es notwendig, die Beschleunigung-Zeit-Charakteristik des Fahrzeugs, respektive der Inneneinrichtung zu kennen. Wie weiter oben bereits ausgeführt (Abschnitte 1 und 7), ist es aufgrund der Randbedingungen für die Unfallforschung und Prüfung von Schienenfahrzeugen äußerst schwierig, hinsichtlich der Anforderungen an die passive Sicherheit realistische Eingabedaten - z. B. aufgrund von Full-Scale-Crashversuchen zu erhalten. Die verfügbaren Verzögerungscharakteristiken von Fahrzeugen im Zugverband stammen daher größtenteils aus numerischen Simulationsrechnungen unter Verwendung der Finite-Element-Methode (FEM) und Starrkörperrechnungen mit Feder-Masse-Modellen.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden deshalb zum einen sog. synthetische Beschleunigung-Zeit-Charakteristiken entsprechend der für die Prüfung von Fahrgastsitzen in Kraftomnibussen in den Richtlinien 96/37/EG bzw. ECE-R 80 festgeschriebenen Grenzkurven verwendet, die anspruchsvolle Prüfkriterien für die Insassensicherheit darstellen. Zum anderen konnten Verzögerungsverläufe als Ergebnisse von Simulationsrechnungen der Industrie ([79] und [80]) genutzt werden, die den Einfluss von fahrzeugseitigen Energieabsorptionseinrichtungen berücksichtigen.

Die durchgeführten Untersuchungen gehen vom Kollisionsszenario "**Frontalzusammenstoß**" bzw. "**Frontalaufprall**" aus, bei der das Fahrzeug, respektive die Inneneinrichtung, aus einer Anfangsgeschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung bis zum Stillstand oder einer Endgeschwindigkeit verzögert wird. Während der Fahrzeugverzögerung wird die Bewegung des Fahrzeuges eindimensional, als **reine Longitudinalbewegung** ohne Nick- und Wankbewegungen vorausgesetzt. Da die Bewegung des Fahrzeuges in longitudinale Richtung für die Insassensimulation ohne Bedeutung ist, wurden für die Simulationsrechnungen lediglich die für die Insassenkinematik und -belastungen relevanten Relativbewegungen zwischen Insassen und Inneneinrichtung berücksichtigt. Dabei wirkt die Verzögerung des Fahrzeuges, respektive

der Inneneinrichtung, entgegengesetzt zur tatsächlichen Bewegungsrichtung auf die Insassenmodelle.

9.2 Beschleunigung-Zeit-Charakteristiken für den Fahrgastbereich

9.2.1 Synthetische Beschleunigungsimpulse nach Richtlinien 96/37/EG bzw. ECE-R 80

In Abbildung 9.1 sind die nach den Richtlinien 96/37/EG bzw. ECE-R 80 vorgegebenen Beschleunigung - Zeit - Verläufe für die Prüfung von Fahrzeugsitzen in Kraftomnibussen dargestellt. Die für die Prüfung der Sitze zu verwendenden Charakteristiken der Verzögerung des Prüfschlittens müssen innerhalb der unteren und oberen Begrenzungskurven liegen.

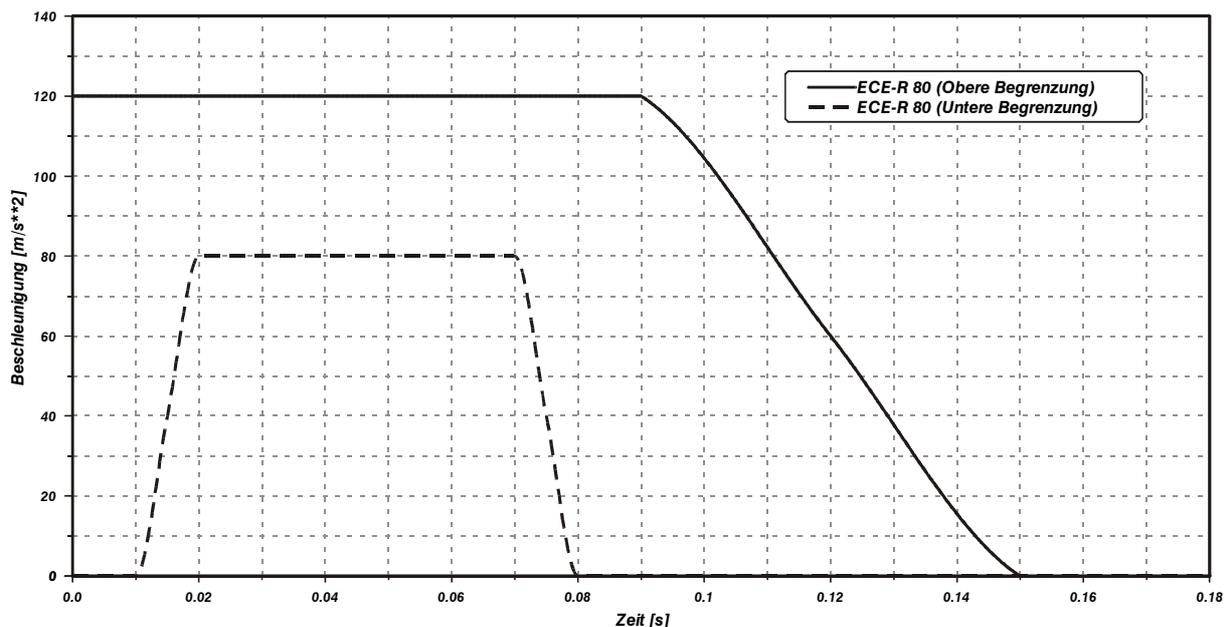


Abbildung 9.1: Synthetische Beschleunigung-Zeit-Charakteristiken nach der Richtlinie 96/37/EG [56]

Die vorliegenden Beschleunigungsimpulse entsprechen einer rechteckigen Kennung von 80 m/s^2 bzw. 120 m/s^2 mit Rampen am Ende - die untere Grenzkurve weist auch am Anfang eine Rampe auf. Die Dauer der Verzögerung der unteren Begrenzungskurve beträgt 50 ms. Hinzu kommen die linearen Steigungen innerhalb von 10 ms am Anfang und Ende der Be-

schleunigungsphase, so dass der Verzögerungsimpuls der unteren Intervallkurve insgesamt 70 ms dauert. Dies entspricht einer Geschwindigkeitsänderung von 4,8 m/s bzw. 17,28 km/h.

Die obere Grenzkurve beginnt ohne linearen Anstieg bei einer Verzögerung von 120 m/s^2 über 90 ms und fällt dann innerhalb von 60 ms linear auf 0 m/s^2 ab. Die Geschwindigkeitsdifferenz beträgt 14,4 m/s bzw. 51,84 km/h.

9.2.2 Beschleunigungsimpuls aus einer Simulationsrechnung für den Aufprall eines Hochgeschwindigkeitszuges auf eine starre Wand

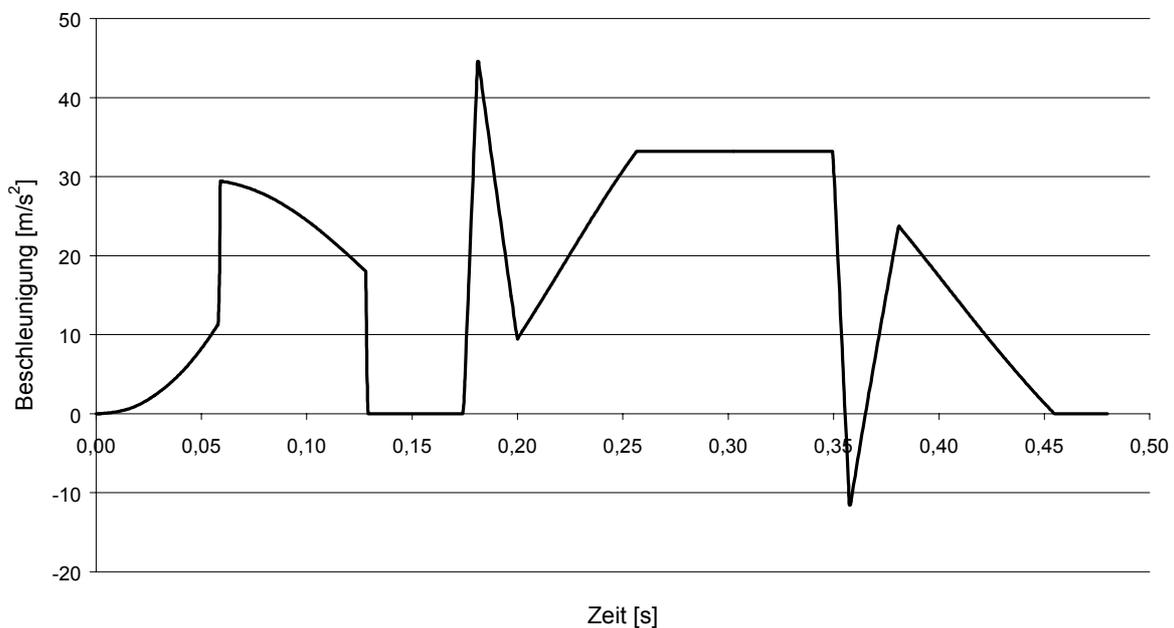


Abbildung 9.2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik beim Aufprall auf eine starre Wand (Zeitausschnitt: 0 bis 0,5 s) - Ergebnis aus Simulationsrechnungen [79]

In Abbildung 9.2 ist der Beschleunigung-Zeit-Verlauf einer Bewegungsanalyse für das im Zugverband zweite Fahrzeug eines Hochgeschwindigkeitszuges dargestellt. Die Energieabsorptionseinrichtungen wurden mit Hilfe der Finite-Element-Methode (FEM) und der Zugverband als Feder-Masse-System modelliert. Der Aufprall erfolgt mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h auf eine starre Wand. Die Masse des betrachteten Fahrzeuges beträgt 50175 kg. Die Deformationslängen in den einzelnen Bereichen betragen 500 mm für den Kupplungsbereich und 612 mm für den Bereich der Fahrzeugstruktur.

9.3 Beschleunigung-Zeit-Charakteristiken für den Führerstand

In Abbildung 9.3 ist als Ergebnis einer Simulationsrechnung mit einem FEM-Programmsystem der Beschleunigung - Zeit - Verlauf für ein Führstandsmodul eines Fahrzeuges mit frontseitigen Deformationselementen dargestellt. Der Aufprall erfolgt mit einer Relativgeschwindigkeit von 20 m/s bzw. 72 km/h auf ein starres Fahrzeug von ca. 40 t Masse ohne Energieverzehreinrichtungen. Das Führstandsmodul wird innerhalb der Simulationszeit von 211 ms auf ca. 5,8 m/s bzw. 20,9 km/h abgebremst.

Zu Beginn des Verzögerung - Zeit - Verlaufes wird das Fahrzeug durch plastische Deformation der paarweise an der Fahrzeugfront angeordneten Energieabsorptionselemente ("Pufferhörner") abgebremst. Der oszillierende Verzögerung - Zeit - Verlauf resultiert aus Torsionsschwingungen des mit der Masse des Führerstandstisches behafteten Rahmens der auf einem sog. Rammschutzträger befestigt ist. Dies ist anhand des Vorzeichenwechsels der Verzögerungscharakteristik unschwer zu erkennen. Daraus lassen sich auch die beiden Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsspitzen erklären, die durch den Beginn der plastischen Deformation des Rammschutzträgers unterhalb des Rahmens für die Befestigung des Führstandsmoduls charakterisiert sind.

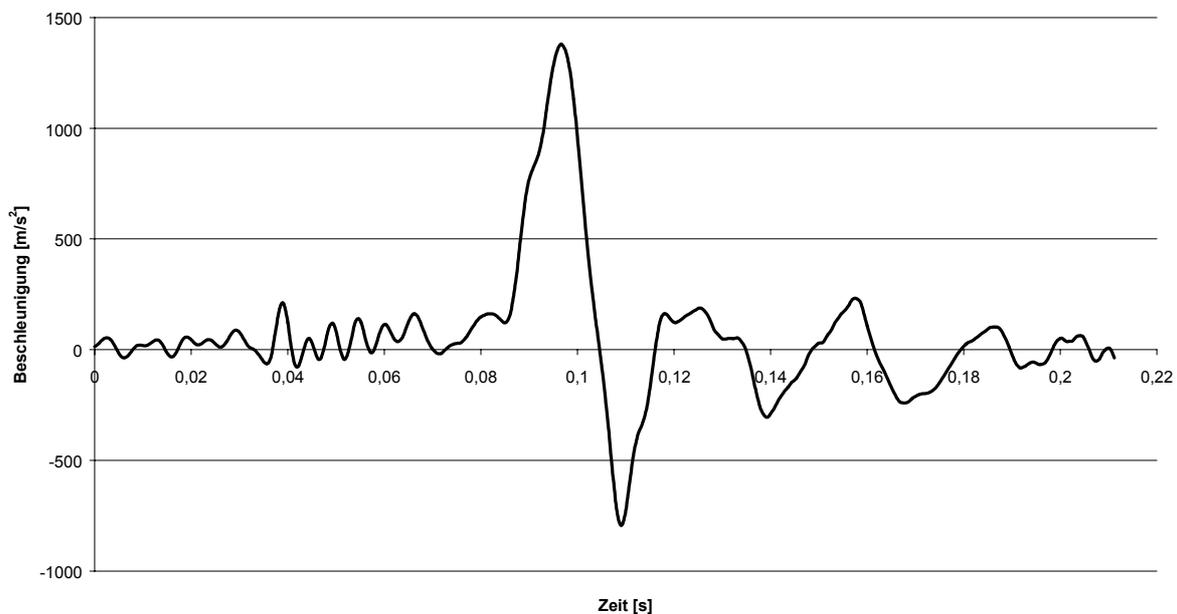


Abbildung 9.3: Beschleunigung - Zeit - Charakteristik für ein Führstandsmodul [80]

9.4 Modelle für die Insassensimulation

9.4.1 Allgemeines

Die numerischen Simulationsrechnungen zur Untersuchung der Insassenkinematik und zur Ermittlung der Belastungen, die im Kollisionsfall auf den Fahrgast und den Triebfahrzeugführer wirken, wurden mit dreidimensionalen MKS - Modellen für die Insassen und Komponenten der Inneneinrichtung durchgeführt. Die Beschreibung der mechanischen Modelle basiert auf Mehrkörpersystemen, die sich aus starren Körpern zusammensetzen. Diese werden über Gelenke und Kraftelemente miteinander gekoppelt. Zur Beschreibung der Geometrie können innerhalb von ADAMS® u.a. Ellipsoide und ebene Flächenelemente genutzt werden. Die Definition von Kontaktkräften zwischen Insassen und Inneneinrichtung kann zwischen Ellipsoiden bzw. Kreisgeometrien und Ellipsoiden, Kreisgeometrien bzw. Flächen erfolgen.

Ziel der rechnerischen Simulation ist es, die Insassenbewegungen bei vorgegebener Verzögerung der Inneneinrichtung des Fahrgastbereiches (Sitze, Tisch) bzw. des Führerstandsmoduls (Führerstandstisch und Fahrersitz) durch ein mathematisches Modell zu beschreiben und die für die Sicherheitsbewertung relevanten Insassenbelastungen zu ermitteln. Dabei gilt es, die Auswirkungen zusätzlicher Auffang- und Rückhaltesysteme (Polsterung, Becken- und 3-Punkt-Gurt) auf die Kinematik des Fahrgastes bzw. des Triebfahrzeugführers zu untersuchen, die dabei auftretenden Belastungen zu evaluieren und Anforderungen an derartige zusätzliche Schutzsysteme abzuleiten.

Die für die Modellierung unterschiedlicher Fahrgastbereiche verwendete Sitz- und Tischgeometrie orientiert sich an der Fahrgastraum - Ausstattung in der 2. Klasse der Fahrzeuge Bim²⁶³/Bimz²⁶⁴ der Deutschen Bahn AG für den Interregio (IR) - Verkehr. Für die Modellierung standen Konstruktionszeichnungen des ehemaligen Bundesbahnzentralamtes in Minden zur Verfügung.

Die Modellierung der Fahrgastsitze erfolgte unter Verwendung der wesentlichen Sitzelemente: Sitzfuß mit Sitzuntergestell, Sitzschale mit Sitzpolster, Armlehnen mit Träger, Rückenschale mit Rückenlehnenpolster, Schale und Polster für die Kopfstütze. Die Verbindungen der einzelnen Sitzelemente untereinander wie auch die Befestigung des Sitzes am Fußboden wur-

den als starre Verbindung modelliert (Ausnahme: Modellvariante B3 bei Reihenbestuhlung - siehe Abschnitt 9.4.4.4). Das Deformationsverhalten der Sitzpolster und der Sitzstruktur wurde über Kontaktbedingungen (-kräfte) zwischen Insasse und Sitz mit Hilfe von Steifigkeits- und Dämpfungskennwerten definiert.

Das Modell des Führerstandsmoduls (Fahrersitz und Führerstandspult) basiert auf einer Konstruktion der Fa. Bombardier/DWA für ein Triebfahrzeug des Fernverkehrs und entspricht hinsichtlich der geometrischen Verhältnisse dem derzeitigen Standard [80].

Die Benennung der Modellvarianten erfolgt mit Hilfe einer Kombination von **lateinischen Großbuchstaben A, B und C** für die drei unterschiedlichen Beschleunigung - Zeit - Charakteristiken (nur Modellvarianten für den Fahrgastbereich) und **arabischer Ziffern** in aufsteigender Reihenfolge für die untersuchten Modellvarianten ohne und mit Schutzsystemen:

Varianten A: Synthetische Beschleunigung - Zeit - Charakteristik gemäß ECE - R80 (untere Begrenzung) – siehe Abbildung 9.1

Varianten B: Synthetische Beschleunigung - Zeit - Charakteristik gemäß ECE - R80 (obere Begrenzung) – siehe Abbildung 9.1

Varianten C: Beschleunigung - Zeit - Charakteristik beim Aufprall auf eine starre Wand (Ergebnis einer FEM - Simulation der Fa. ALUSUISSE) – siehe Abbildung 9.2

Varianten X1: Status - Analysen (Referenzvarianten für nachfolgende Untersuchungen)

Varianten X2, X3: Modellvarianten unter Verwendung zusätzlicher Schutzsysteme (z.B. zusätzliche lokale Polsterung, Einsatz von Rückhaltesystemen etc.)

9.4.2 Modellierung des Fahrgastes und des Triebfahrzeugführers

Die Modellierung des Fahrgastes und des Triebfahrzeugführers erfolgte mit Hilfe des ADAMS[®]-Moduls Android, mit dem ein Insassenmodell eines 50% - Mannes³¹ erstellt wurde (Abbildung 9.4). Das Insassenmodell besteht aus insgesamt 15 Ellipsoiden die über Gelenke miteinander verbunden sind und verwendet die vom ADAMS[®]-Modul Android bereitgestellte Datenbasis. Die Gesamtmasse des Insassenmodells beträgt 78,8 kg, die Größe 177 cm.

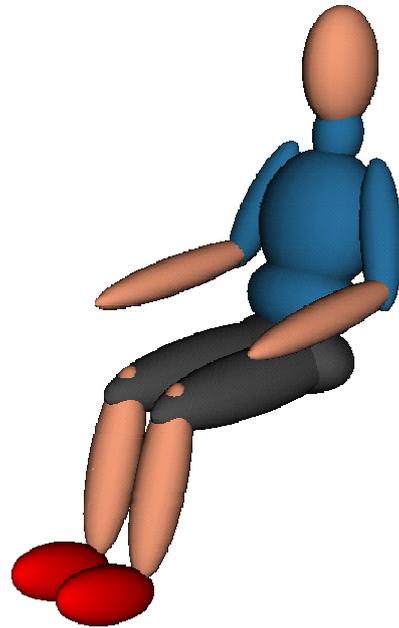


Abbildung 9.4: Insassenmodell des 50% - Mannes

9.4.3 Systemparameter für die numerische Simulation

Für die Simulationsrechnungen waren modellbeschreibende Größen, wie Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte, Kraft - Weg - Charakteristiken der verwendeten Energieabsorptionselemente und geometrische Größen zu definieren. Diese Größen können als Systemparameter bezeichnet werden. Die verwendeten Systemparameter wurden gezielt variiert, um ihren Einfluss auf die Insassenkinematik und die auftretenden Insassenbelastungen bewerten zu können.

In Tabelle 9.1 und Tabelle 9.2 sind die für die Modellierung des Fahrgastbereiches und des Führerstandsmoduls relevanten Systemparameter zusammengestellt, wobei in der rechten Spalte die jeweils möglichen Parameterwerte stehen.

Tabelle 9.1: Systemparameter für verschiedene Modellvarianten des Fahrgastbereiches

Systemparameter (Fahrgastbereich)	Parameterwert
Typ des Dummy	50% - Mann
Sitzteiler ³²	865 mm (Reihenbestuhlung)
Rückenlehnenabstand ³³	1757 mm (Vis-à-vis - Sitzanordnung ohne Tisch) 1798 mm (Vis-à-vis - Sitzanordnung mit Tisch)
Tischbreite	450 mm (Statusvariante) 550 mm (Variante mit vergrößerter Tischbreite)
Lokale Kontaktbedingungen für den Kopf-anprall	Siehe Beschreibung der Modellvarianten
Lokale Kontaktbedingungen für den Anprall des Thorax	Siehe Beschreibung der Modellvarianten
Lokale Kontaktbedingungen für den Anprall von Abdomen/Pelvis	Siehe Beschreibung der Modellvarianten
Lokale Kontaktbedingungen für den Oberschenkel-/Knieanprall	Siehe Beschreibung der Modellvarianten

Tabelle 9.2: Systemparameter für verschiedene Modellvarianten des Führerstandsmoduls

Systemparameter (Führerstandsmodul)	Parameterwert
Typ des Dummy	50%-Mann
Gurttyp	Kein Gurt, Führerstandstisch als Rückhaltesystem Beckengurt (2-Punkt-Gurt) 3-Punkt-Gurt
Lokale Kontaktbedingungen für den Kopf-anprall	Siehe Beschreibung der Modellvarianten
Lokale Kontaktbedingungen für den Anprall des Thorax	Siehe Beschreibung der Modellvarianten
Lokale Kontaktbedingungen für den Anprall von Abdomen/Pelvis	Siehe Beschreibung der Modellvarianten

³¹ 50 %-Dummy: 50 % der männlichen Population sind kleiner als der 50 %-Wert, der den Durchschnittswert der Häufigkeitsverteilung einer anthropometrischen Reihenuntersuchung darstellt.

³² Das Maß für den Sitzteiler S ist der Abstand zwischen zwei Sitzen, gemessen zwischen zwei in Reihe angeordneten Sitzen bei gleicher Lehnenneigung

³³ Das Maß für den Rückenlehnenabstand R ist der Abstand zwischen den Außenkanten zweier gegenüberstehender Sitze in Grundstellung (vis-à-vis - Sitzanordnung).

Die lokalen Kontaktbedingungen werden innerhalb des Mehrkörper - Simulationsprogramms ADAMS[®] mit Hilfe einer sog. One-sided Impact (IMPACT) - Funktion beschrieben. Diese Funktion hat den Effektivwert einer Deformationskraft zum Ergebnis, die aus dem Kontakt zweier Körper resultiert. Dabei wird ein Körper als starr, der andere als elastisch und/oder plastisch verformbar betrachtet ("one-sided impact"). Die Funktion beruht auf einer Gleichung für ein nichtlineares Feder - Dämpfer - System und berücksichtigt ausschließlich die Kompressionsphase.

Zur Definition der IMPACT - Funktion werden folgende Variablen und Koeffizienten benötigt [81]:

- x(t) [m]..... Deformationsweg: Abstand zwischen den Schwerpunkten der beiden Körper
- v(t) [m/s²]..... Deformationsgeschwindigkeit: Erste Ableitung des Abstandes zwischen den Körpern nach der Zeit
- x₀ [m]..... Trigger für die Deformationskraft: Definiert, bei welcher Relativverschiebung der Schwerpunkte der Körper die Kontaktkraft wirkt
- S [N/m] Steifigkeitskoeffizient
- e [-] Exponent: Beeinflusst die Kraft - Weg - Charakteristik der Federkraft (linear, progressiv oder degressiv)
- D [Ns/m] Dämpfungskoeffizient
- d [m] Konstante für die Rampenfunktion der Dämpfungskraft: Definiert bei initialisierter Kontaktkraft, innerhalb welcher Relativverschiebung der Körper die Dämpfungskraft voll wirkt

Zur besseren Veranschaulichung sind die Funktionsverläufe für die Verformungskraft, die sich aus Federkraft (F_S) und Dämpfungskraft (F_D) zusammensetzt, qualitativ in Abhängigkeit der verwendeten Variablen und Funktionsparameter in [Abbildung 9.5](#) und [Abbildung 9.6](#) dargestellt.

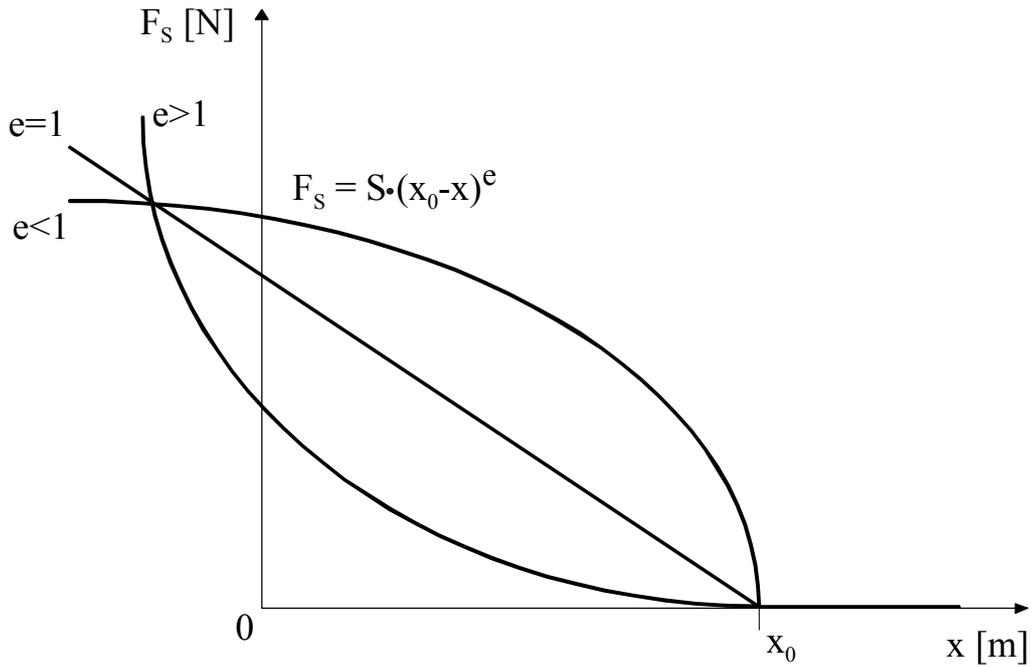


Abbildung 9.5: Definition der Federkraft (F_S) innerhalb der IMPACT - Funktion in Abhängigkeit der Funktionsparameter

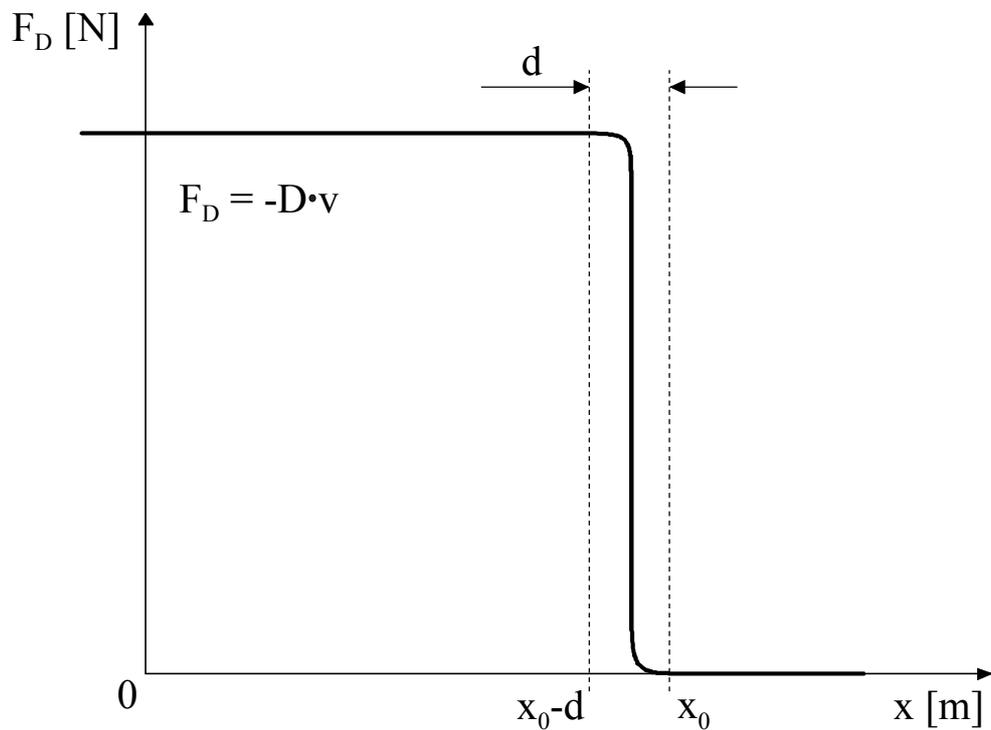


Abbildung 9.6: Definition der Dämpfungskraft (F_D) innerhalb der IMPACT - Funktion in Abhängigkeit der Funktionsparameter

9.4.4 Modellierung des Fahrgastbereiches: Reihenbestuhlung

9.4.4.1 Allgemeines

Der für die Modellierung der Reihenbestuhlung verwendete **Sitzteiler S = 865 mm** liegt hinsichtlich der Reduzierung der Verletzungsschwere bei einem Frontalaufprall, insbesondere hinsichtlich des Grenzwertes für die Kopfbeschleunigung, nahe dem im Abschnitt 6.2.5 aufgeführten Bereich des optimalen Sitzteilers von 800 bis 850 mm.

Die Sitzkonfiguration zur Modellierung der Reihenbestuhlung besteht aus einem Dummy (50% - Mann) auf einem Einzelsitz und einem vorderen Einzelsitz ohne Dummy (siehe Abbildung 9.7).

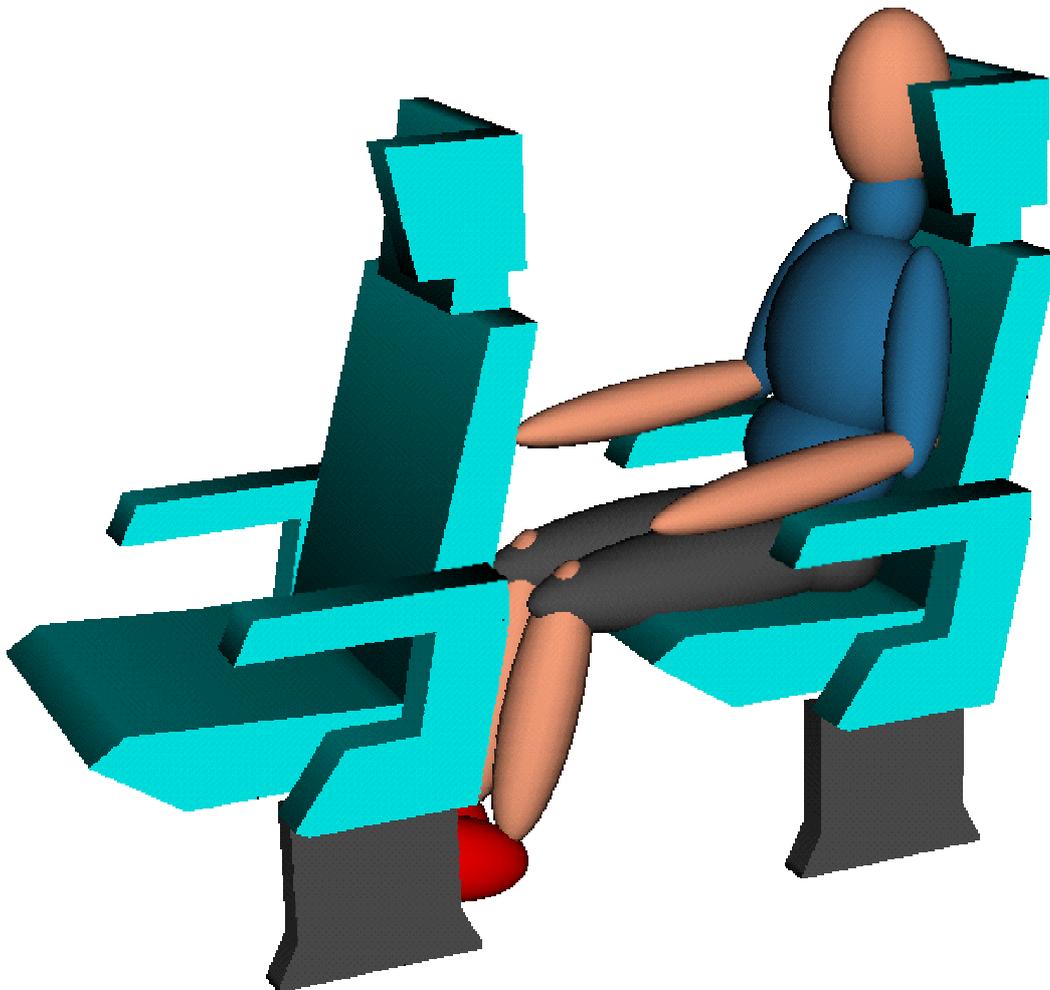


Abbildung 9.7: MKS-Modell für die Sitzkonfiguration Reihenbestuhlung

Abhängig von den zu untersuchenden Modellvarianten waren für die unterschiedlichen Anprallbereiche lokale Kontaktbedingungen (Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte) zu definieren, die in den folgenden Abschnitten 9.4.4.2 bis 9.4.4.3 beschrieben werden.

9.4.4.2 Modellvarianten A1, B1 und C1: Status - Analyse

Als Referenzmodell für nachfolgende Untersuchungen werden zuerst die Insassenbelastungen des IST - Zustandes ermittelt. Die Modellvarianten **A1, B1 und C1** stellen damit die Ausgangssituation ohne Schutzsystem dar und dienen zum Vergleich der Ergebnisse mit nachfolgenden Varianten.

Die Definition der Eigenschaften der lokalen Kontaktbedingungen zwischen dem vorderen Sitz und dem Fahrgast erfolgt über Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte. Die Kraft - Weg - Charakteristiken der für den Anprall des Insassen relevanten Sitzkomponenten (Rückenlehne, Kopfstütze) werden hierbei in zwei unterschiedliche Bereiche unterteilt:

- I) Kraft - Weg - Charakteristik für den Kontakt des Insassen mit der elastischen Sitzschale unter Einbeziehung der Nachgiebigkeit der Sitzlehne einschließlich Kopfstütze
- II) Kraft - Weg - Charakteristik für das Ansprechen der härteren Sitzstruktur

Die Definition der Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte für die elastische Verformung der Rückenlehenschale mit Polster und der Schale mit Polster für die Kopfstütze erfolgte unter Verwendung von Prüfprotokollen über die Prüfung von Fahrgastsitzen der Bim²⁶³/Bimz²⁶⁴ - Reisezugwagen ([Abbildung 9.8](#) und [Abbildung 9.9](#)). Die von der Versuchsanstalt München, Abt. für Chemie der ehemaligen Deutschen Bundesbahn angefertigten Prüfprotokolle wurden dem Fachgebiet Schienenfahrzeuge der TU Berlin vom ehemaligen Bundesbahnzentralamt in Minden freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Weitere Angaben zur Konstruktion und Prüfung von Fahrgastsitzen in Schienenfahrzeugen finden sich in [82].

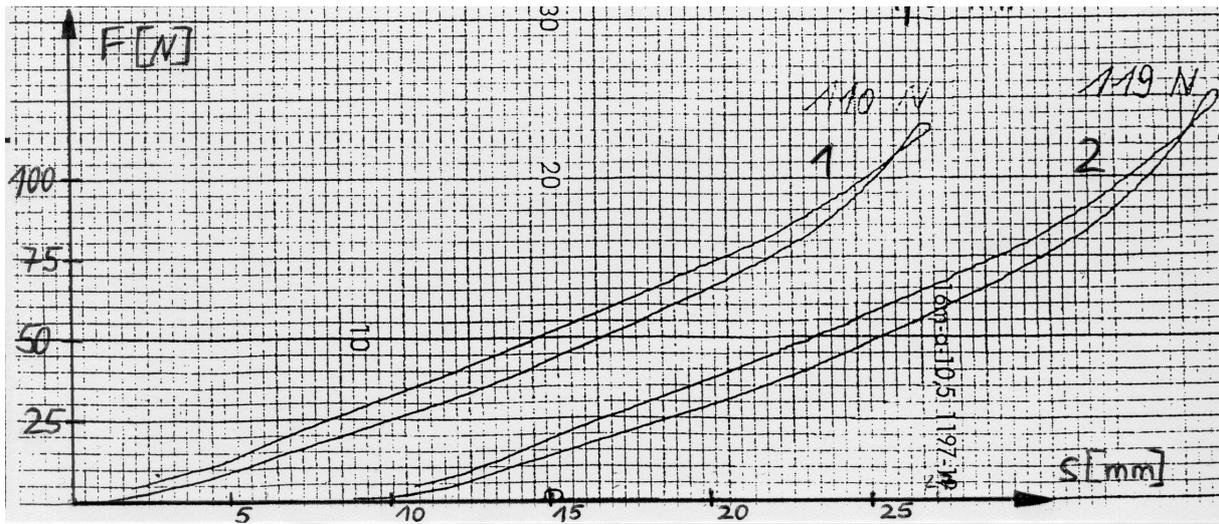


Abbildung 9.8: Kraft - Weg - Charakteristik der Rückenschale mit Rückenlehnenpolster (komplett) gemäß Prüfung von Fahrgastsitzen ([82] und [60])

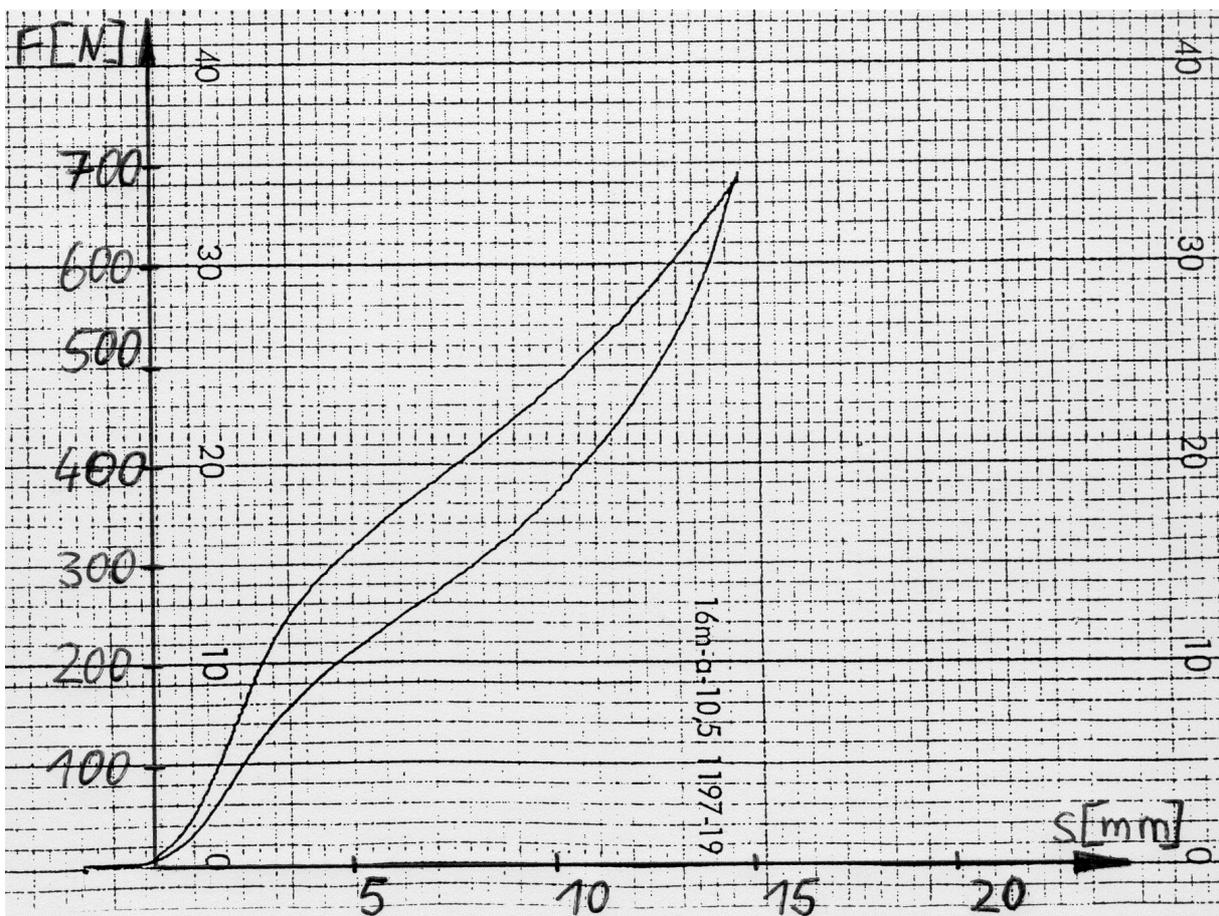


Abbildung 9.9: Kraft - Weg - Charakteristik der Schale mit Polster für die Kopfstütze gemäß Prüfung von Fahrgastsitzen ([82] und [60])

Entsprechend der aus den zerstörungsfreien Prüfversuchen resultierenden Kraft-Weg-Charakteristiken beträgt der maximale Verformungsweg (maximale Eindrückung) für den ersten Bereich:

- Rückenschale mit Rückenlehnenpolster: 27 mm (siehe Abbildung 9.8) und
- Schale mit Polster für die Kopfstütze: 15 mm (siehe Abbildung 9.9).

Für die bei größerer Verformung der relevanten Sitzkomponenten auftretenden Kontaktkräfte infolge des Insassenanpralls wurde ein zweiter Bereich der Kraft - Weg - Charakteristik definiert. Hierbei wurden bewusst hohe Werte gewählt, die einer starren Platte entsprechen ("worst case - scenario"), da keine Materialkennwerte für die Struktur des Fahrgastsitzes vorlagen.

Die Kennwerte werden für den Kontakt der auf die Rückenlehne/Kopfstütze des Vordersitzes anprallenden Körperteile des Insassen (Kopf, Thorax, Oberschenkel/Knie) wie folgt definiert (Tabelle 9.3):

Tabelle 9.3: Systemparameter: Modellvarianten A1, B1 und C1 (Status - Analyse)

Lokale Kontaktbedingung	Steifigkeitskennwert [N/m]	Dämpfungskennwert [Ns/m]	Bemerkung
Kopf	siehe Abbildung 9.9		≤ 15 mm Eindrückung
	1,0 10 ⁷	1,0 10 ³	> 15 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
Thorax	siehe Abbildung 9.8		≤ 27 mm Eindrückung
	1,0 10 ⁷	1,0 10 ³	> 27 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
Abdomen/Pelvis	-	-	-
Oberschenkel/Knie	siehe Abbildung 9.8		≤ 27 mm Eindrückung
	1,0 10 ⁷	1,0 10 ³	> 27 mm Eindrückung, progressiver Verlauf

9.4.4.3 Modellvarianten A2, B2 und C2: Verwendung einer zusätzlichen Polsterung

Für die Untersuchung der Möglichkeiten zur Verringerung der Belastungen des Insassen, insbesondere beim Kopf- und Knieanprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes, wurde innerhalb der Modellvarianten **A2, B2 und C2** eine dritte Kraft - Weg - Charakteristik für eine zusätzliche Polsterung im Bereich des Kopf- und Knieanpralls definiert, die direkt auf die Schalenkonstruktion der Sitzlehne und Kopfstütze montiert wird.

Die Verformungscharakteristik der Polsterung weist eine annähernd trapezförmige Kraft - Weg - Kennung auf, um eine möglichst große Energieabsorption bei stetigem Kraftanstieg bis zum Kraftmaximum zu realisieren. Die Kopfstütze wurde mit einer 50 mm dicken Polsterung modelliert, die Dicke der zusätzlichen Lehnenpolsterung für den Knieanprall beträgt 30 mm.

Die Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte für die lokalen Kontaktbedingungen der Modellvarianten A2, B2 und C2 können der [Tabelle 9.4](#) entnommen werden.

Tabelle 9.4: Systemparameter zur Beschreibung der lokalen Aufprallsteifigkeiten - Modellvarianten A2, B2 und C2 (Verwendung einer zusätzlichen Polsterung)

Lokale Kontaktbedingung	Steifigkeitskennwert [N/m]	Dämpfungskennwert [Ns/m]	Bemerkung
Kopf	siehe Abbildung 9.9		≤ 15 mm Eindrückung
	1,0 10 ⁷	1,0 10 ³	> 15 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
	4,0 10 ⁶	2,0 10 ³	Polsterung: 50 mm, trapezförmige Kennung
Thorax	siehe Abbildung 9.8		≤ 27 mm Eindrückung
	1,0 10 ⁷	1,0 10 ³	> 27 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
	4,0 10 ⁶	2,0 10 ³	Polsterung: 30 mm, trapezförmige Kennung
Abdomen/Pelvis	-	-	-
Oberschenkel/Knie	siehe Abbildung 9.8		≤ 27 mm Eindrückung
	1,0 10 ⁷	1,0 10 ³	> 27 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
	4,0 10 ⁶	2,0 10 ³	Polsterung: 30 mm, trapezförmige Kennung

9.4.4.4 Modellvariante B3: Optimierung der Nachgiebigkeit der Sitzlehne

Um die aus dem Kopfanprall auf die Rückenlehne bzw. Kopfstütze des Vordersitzes resultierenden Kopfbeschleunigungen weiter zu reduzieren, wurde innerhalb einer dritten Modellvariante die Nachgiebigkeit der Sitzlehne durch ein zusätzliches Drehgelenk zwischen Rückenlehne und Sitzgestell erhöht. Dieser zusätzliche rotatorische Freiheitsgrad der Sitzlehne mit Drehpunkt direkt in der Verbindung zwischen Lehne und Sitzgestell ist mit einem sog. "Revolute Joint" (Drehgelenk) mit Reibung im Gelenk zur Energieabsorption beim Anprall des Insassen modelliert worden.

Die Simulationsrechnungen für diese Modellvariante wurden nur für die Beschleunigung - Zeit - Charakteristik gemäß ECE - R80 (obere Begrenzung) durchgeführt, da bei den anderen Verzögerungscharakteristiken alle Schutzkriterien bereits bei der Modellvariante 2 (zusätzliche Polsterung) eingehalten wurden.

9.4.5 Modellierung des Fahrgastbereiches: Abteilbestuhlung ohne Tisch

Für die Modellierung der Abteilbestuhlung ohne Tisch wurde ein Rückenlehnenabstand von 1757 mm zwischen den Sitzen gewählt. Die einzelnen Sitzelemente (Sitzfuß, Sitzschale mit Sitzpolster, Rückenschale mit Rückenlehnenpolster, Kopfstütze etc.) sind starr miteinander verbunden. Die Befestigung der Fahrgastsitze am Fußboden wurde ebenfalls als starre Verbindung modelliert.

Die Sitzkonfiguration zur Modellierung der Abteilbestuhlung ohne Tisch besteht aus einem Dummy (50% - Mann) auf einem Einzelsitz und einem vis-à-vis angeordneten Einzelsitz ohne Dummy (Abbildung 9.10).

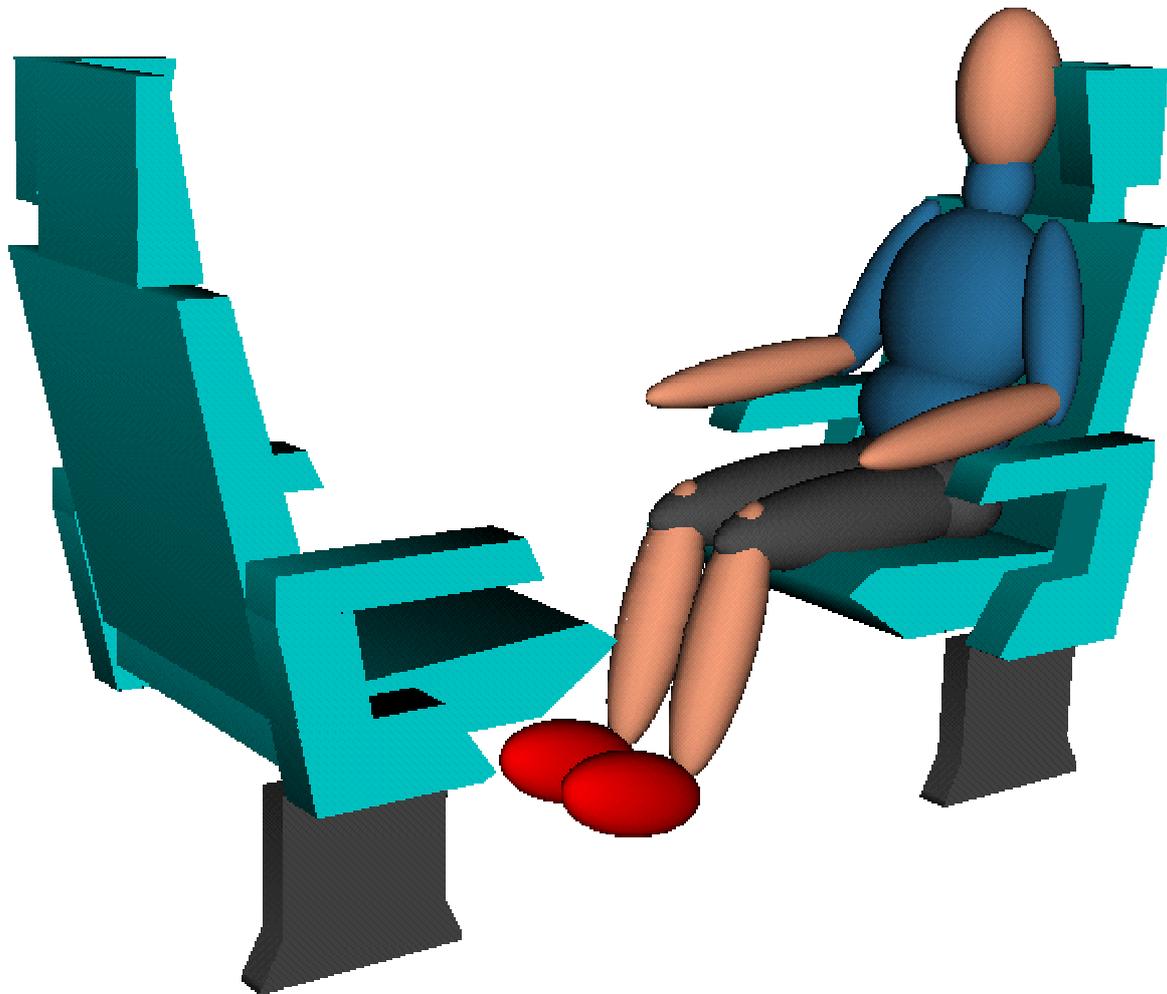


Abbildung 9.10: MKS-Modell für die Sitzkonfiguration Abteilbestuhlung ohne Tisch

Die lokalen Kontaktbedingungen (Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte) für die untersuchten Modellvarianten sind den folgenden Abschnitten 9.4.5.1 bis 9.4.5.2 beschrieben.

9.4.5.1 Modellvarianten A1, B1 und C1: Status - Analyse

Die Varianten **A1, B1 und C1** dienen zur Ermittlung der Insassenbelastungen in Abhängigkeit des IST - Zustandes (Ausgangssituation ohne Schutzsystem) und als Basisreferenz für den Vergleich mit modifizierten Modellvarianten.

Auch für die Modellvarianten der Abteilbestuhlung ohne Tisch wurde die Kraft - Weg - Kennung für die Definition der Kontaktbedingung zwischen Insassen und den relevanten Sitzkomponenten in zwei unterschiedliche Bereiche unterteilt:

- I) Kraft - Weg - Charakteristik für den Kontakt des Insassen mit der Polsterung der Sitzschale, der Rückenschale und der Kopfstütze (Eindrückung: ≤ 40 mm)
- II) Kraft - Weg - Charakteristik für den Kontakt des Insassen mit der härteren Sitzstruktur (Eindrückung: > 40 mm)

Für die Definition der Kontaktbedingungen des Bereiches I) konnten die Ergebnisse aus den zerstörungsfreien Prüfversuchen an Fahrgastsitzen der ehemaligen Versuchsanstalt München genutzt werden (Abbildung 9.11).

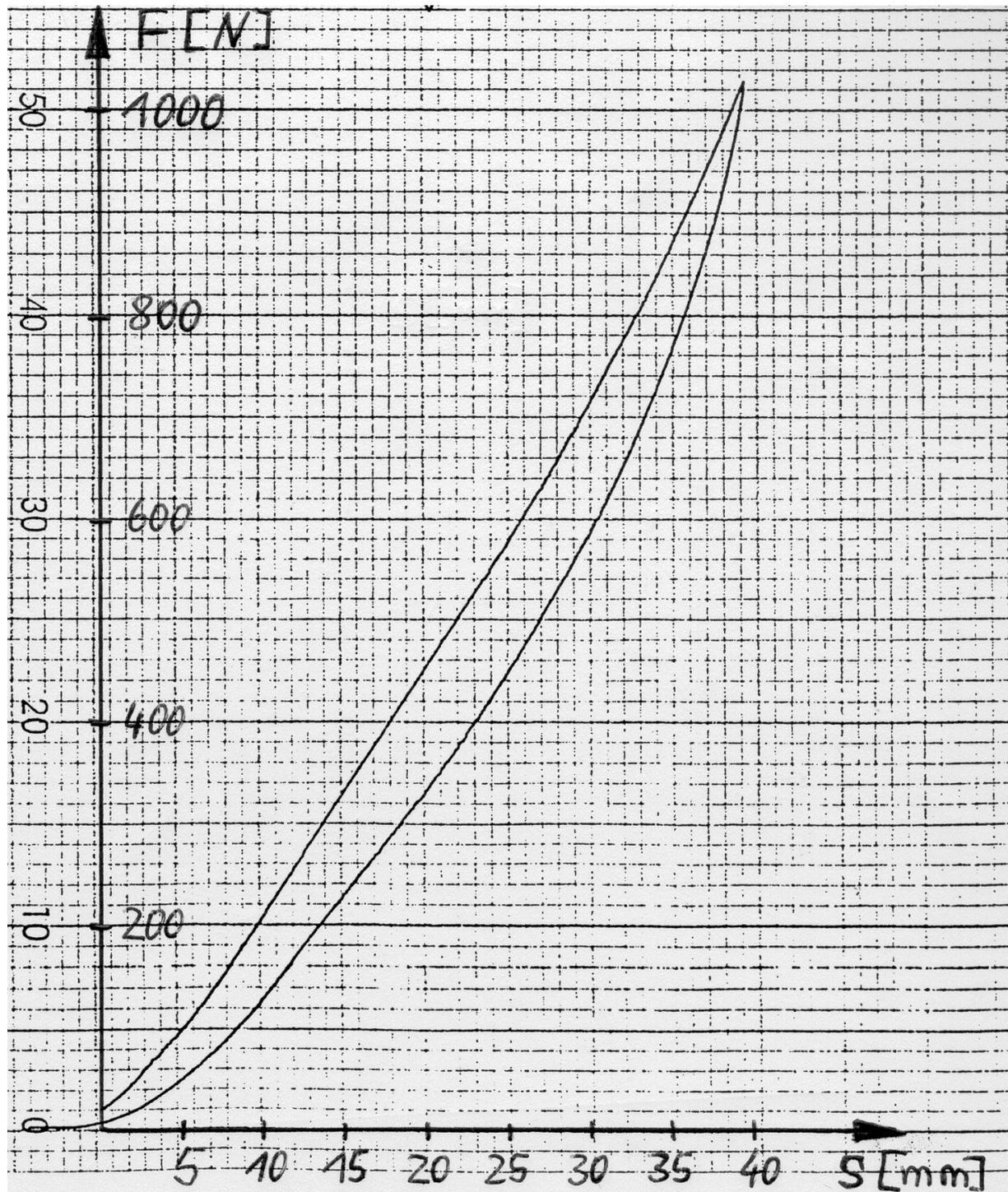


Abbildung 9.11: Kraft - Weg - Charakteristik der Sitzschalenpolsterung gemäß Prüfung von Fahrgastsitzen ([82] und [60])

Die den unterschiedlichen Anprallbereichen (Kopf, Thorax, Abdomen/Pelvis, Oberschenkel/Knie) zugeordneten Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte sind der Tabelle 9.5 zu entnehmen.

Tabelle 9.5: Systemparameter: Modellvarianten A1, B1 und C1 (Status - Analyse)

Lokale Kontaktbedingung	Steifigkeitskennwert [N/m]	Dämpfungskennwert [Ns/m]	Bemerkung
Kopf	siehe Abbildung 9.11		≤ 40 mm Eindrückung
	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^3$	> 40 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
Thorax	siehe Abbildung 9.11		≤ 40 mm Eindrückung
	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^3$	> 40 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
Abdomen/Pelvis	-	-	-
Oberschenkel/Knie	siehe Abbildung 9.11		≤ 40 mm Eindrückung
	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^3$	> 40 mm Eindrückung, progressiver Verlauf

9.4.5.2 Modellvarianten A2, B2 und C2: Verwendung eines zusätzlichen Energieabsorptionselementes

Die Modellvarianten **A2, B2 und C2** weisen als Schutzsystem im Bereich des Kopfanpralls auf die Rückenlehne/Kopfstütze des gegenüberliegenden Sitzes und des Knieanpralls/Anpralls der unteren Extremitäten auf die Vorderkante der Sitzschale ein in die Sitzpolsterung/-struktur integriertes Energieabsorptionselement mit annähernd trapezförmiger Kraft - Weg - Charakteristik (z. B. hinterschäumtes Deformationsblech) auf.

In Tabelle 9.6 sind die Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte für die lokalen Kontaktbedingungen der Modellvarianten A2, B2 und C2 aufgeführt:

Tabelle 9.6: Systemparameter: Modellvarianten A2, B2 und C2 (Verwendung eines in die Sitzpolsterung/ Sitzstruktur integrierten Energieabsorptionselementes)

Lokale Kontaktbedingung	Steifigkeitskennwert [N/m]	Dämpfungskennwert [Ns/m]	Bemerkung
Kopf	siehe Abbildung 9.11		≤ 12 mm Eindrückung
	$3,5 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^3$	12 bis 40 mm Eindrückung, trapezförmige Kennung
	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^3$	> 40 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
Thorax	siehe Abbildung 9.11		≤ 12 mm Eindrückung
	$3,5 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^3$	12 bis 40 mm Eindrückung, trapezförmige Kennung
	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^3$	> 40 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
Abdomen/Pelvis	-	-	-
Oberschenkel/Knie	siehe Abbildung 9.11		≤ 22 mm Eindrückung
	$4,0 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^3$	22 bis 40 mm Eindrückung, trapezförmige Kennung
	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^3$	> 40 mm Eindrückung, progressiver Verlauf

9.4.6 Modellierung des Fahrgastbereiches: Abteilbestuhlung mit Tisch

9.4.6.1 Allgemeines

Der Rückenlehnenabstand der vis-à-vis angeordneten Sitze bei der Abteilbestuhlung mit Tisch beträgt 1798 mm. Die Abmessungen der Tischplatte sind: Breite: 450 mm, Höhe: 75 mm, Tiefe: 510 mm. Der Schwerpunkt des Tisches liegt 946 mm über dem Fußboden. Die Verbindungen der Sitzelemente untereinander (Sitzfuß, Sitzschale mit Sitzpolster, Rückenschale mit Rückenlehnenpolster, Kopfstütze etc.) sowie die Verankerung der Fahrgastsitze am Fußboden und die Befestigung des Tisches an der gedachten Seitenwand bzw. am Fußboden sind starr ausgeführt (Abbildung 9.12).

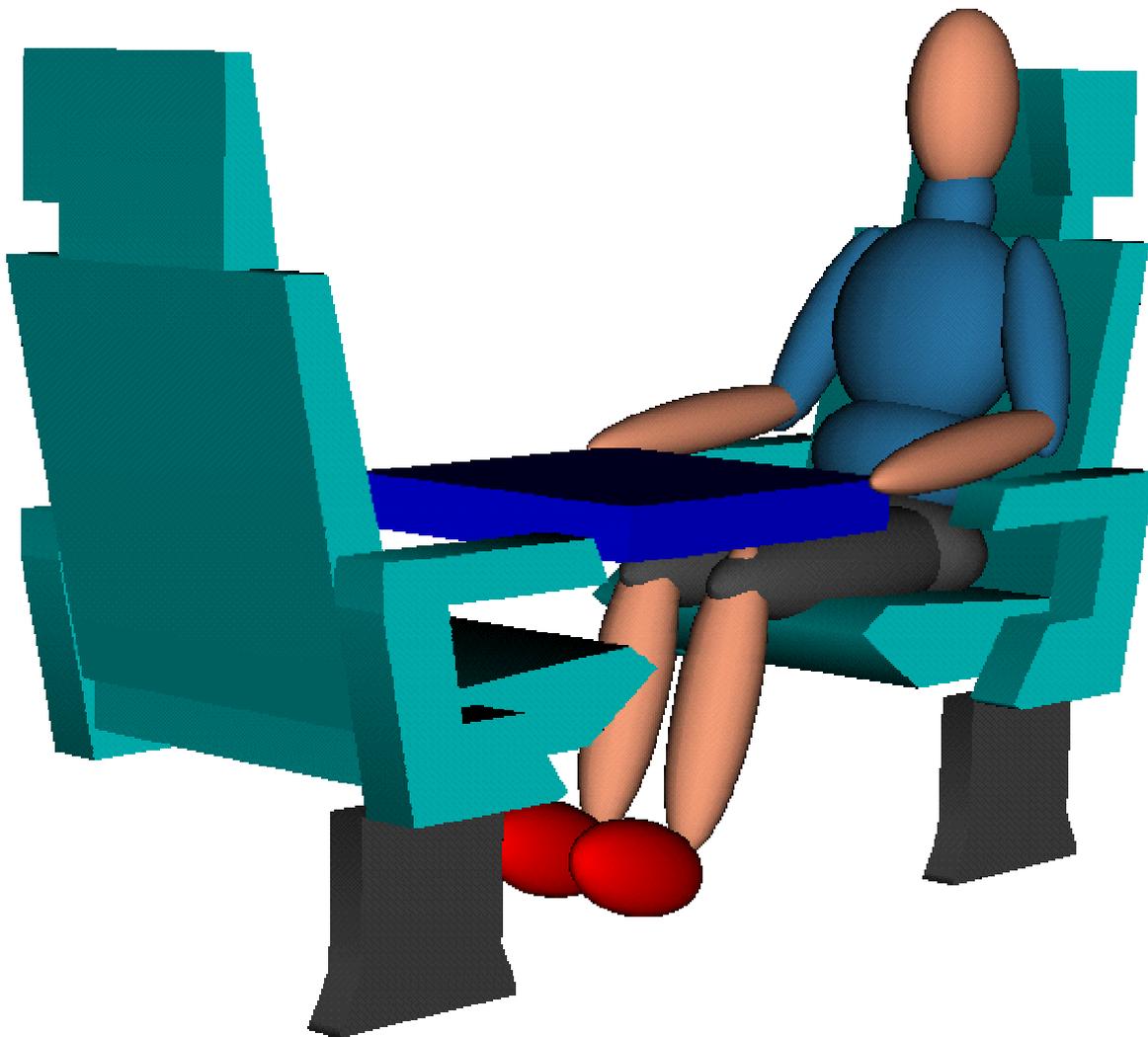


Abbildung 9.12: MKS-Modell für die Sitzkonfiguration Abteilbestuhlung mit Tisch

9.4.6.2 Modellvarianten A1, B1 und C1: Status - Analyse

Als Referenzmodelle und Grundlage für die Untersuchungen von Möglichkeiten zur Reduzierung der Insassenbelastungen infolge des Tischenpralls dienen die Modellvarianten **A1, B1 und C1** (Status - Analyse), die bis auf den vergrößerten Rückenlehnenabstand identisch sind mit den Statusvarianten für die Modellierung der Abteilbestuhlung ohne Tisch. Zusätzlich zum Kontakt des Insassen mit dem vis-à-vis angeordneten Sitz und hier von herausragender Bedeutung sind die zu definierenden Kontaktbedingungen für den Anprall des Fahrgastes auf den Tisch. Der Primärkontakt tritt hierbei zwischen dem Becken-/Abdominalbereich und dem Tisch auf.

Die Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte für die lokalen Kontaktbedingungen der Varianten A1, B1 und C1 sind in Tabelle 9.7 aufgeführt.

Tabelle 9.7: Systemparameter: Modellvarianten A1, B1 und C1 (Status - Analyse)

Lokale Kontaktbedingung	Steifigkeitskennwert [N/m]	Dämpfungskennwert [Ns/m]	Bemerkung
Kopf	siehe Abbildung 9.11		≤ 40 mm Eindrückung
	1,0 10 ⁷	1,0 10 ³	> 40 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
	1,0 10 ⁷	1,0 10 ³	Kontaktkraft für den Tischenprall
Thorax	siehe Abbildung 9.11		≤ 40 mm Eindrückung
	1,0 10 ⁷	1,0 10 ³	> 40 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
	1,0 10 ⁷	1,0 10 ³	Kontaktkraft für den Tischenprall
Abdomen/Pelvis	1,0 10 ⁷	1,0 10 ³	Kontaktkraft für den Tischenprall
Oberschenkel/Knie	siehe Abbildung 9.11		≤ 40 mm Eindrückung
	1,0 10 ⁷	1,0 10 ³	> 40 mm Eindrückung, progressiver Verlauf

Da keine Angaben zu den Materialeigenschaften des Tisches vorlagen, wurden die Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte für den Kontakt des Insassen mit der Sitzstruktur übernommen, die den ungünstigsten Fall des Anpralls auf eine starre Platte entsprechen ("worst case - scenario").

9.4.6.3 Modellvariante B2: Optimiertes Energieabsorptionsvermögen des Tisches

Um die Belastungen des Insassen, insbesondere beim Anprall des Beckens und des Kopfes auf den Tisch, zu reduzieren, wurde innerhalb der Modellvariante **B2** die Kraft - Weg - Charakteristik der Kontaktkräfte für den Tischenprall modifiziert. Durch eine annähernd trapezförmige Kennung unter Berücksichtigung der funktional erforderlichen Steifigkeit der Tischplatte konnte ein deutlich verbessertes Energieabsorptionsvermögen des Tisches erzielt werden. Die Simulationsrechnungen wurden nur für die Beschleunigung - Zeit - Charakteristik gemäß ECE - R80 (obere Begrenzung) durchgeführt.

Die Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte für die Modellvariante B2 können der Tabelle 9.8 entnommen werden.

Tabelle 9.8: Systemparameter: Modellvariante B3 (Optimiertes Energieabsorptionsvermögen des Tisches)

Lokale Kontaktbedingung	Steifigkeitskennwert [N/m]	Dämpfungskennwert [Ns/m]	Bemerkung
Kopf	siehe Abbildung 9.11		≤ 40 mm Eindrückung
	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^3$	> 40 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
	$1,2 \cdot 10^7$	$5,5 \cdot 10^2$	Tischenprall: trapezförmige Kraft-Weg-Kennung
Thorax	siehe Abbildung 9.11		≤ 40 mm Eindrückung
	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^3$	> 40 mm Eindrückung, progressiver Verlauf
	$1,2 \cdot 10^7$	$5,5 \cdot 10^2$	Tischenprall: trapezförmige Kraft-Weg-Kennung
Abdomen/Pelvis	$1,2 \cdot 10^7$	$5,5 \cdot 10^2$	Tischenprall: trapezförmige Kraft-Weg-Kennung
Oberschenkel/Knie	siehe Abbildung 9.11		≤ 40 mm Eindrückung
	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^3$	> 40 mm Eindrückung, progressiver Verlauf

9.4.6.4 Modellvariante B3: Vergrößerung der Tischbreite

Unter Beibehaltung der Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte aus der Statusvariante wurde innerhalb der Modellvariante B3 ausschließlich die Tischbreite auf 550 mm vergrößert, um den Einfluss eines möglichst frühen Tischenpralls auf die Insassenbelastungen zu untersuchen.

9.4.7 Modellierung des Führerstandsmoduls

9.4.7.1 Allgemeines

Für die Modellierung des Führerstandsmoduls stand eine CAD-Zeichnung der Fa. Bombardier Transportation, DWA zur Verfügung, die in das MKS - Modell importiert worden ist [80].

Das Modell des Führerstandsmoduls und des Triebfahrzeugführers ist in [Abbildung 9.13](#) dargestellt.

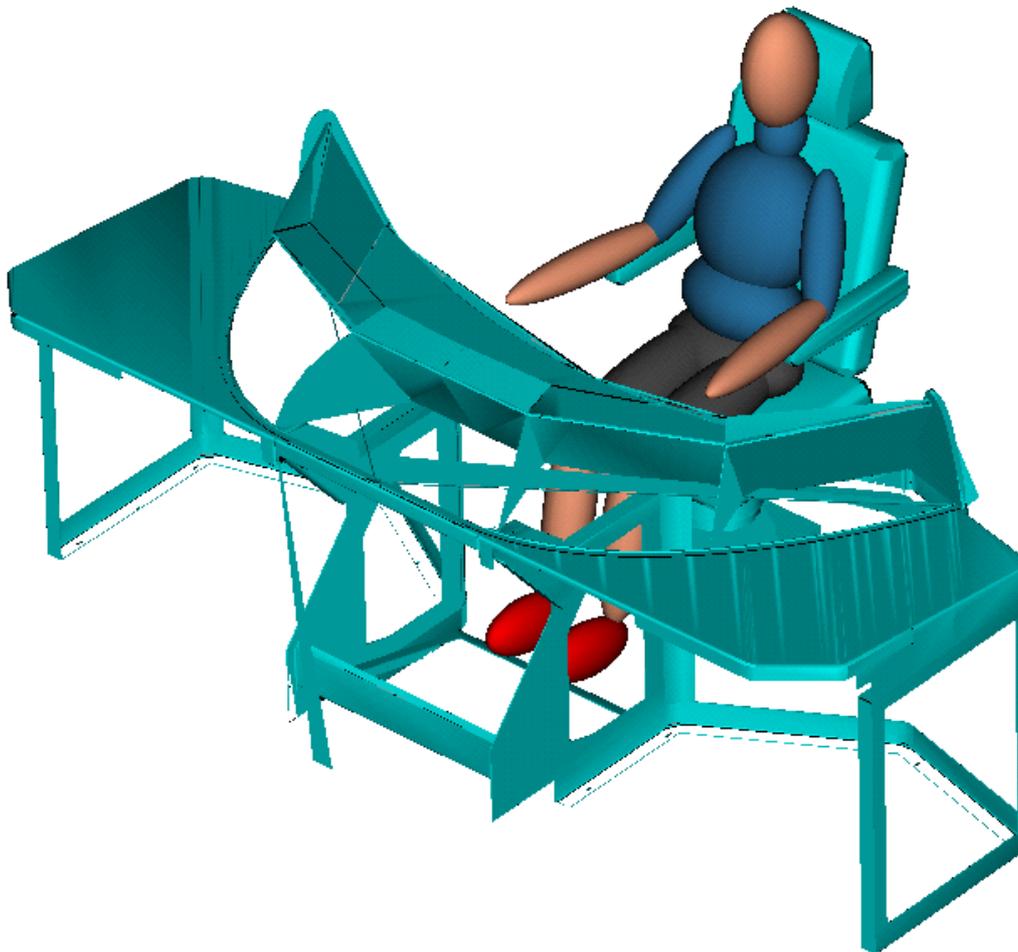


Abbildung 9.13: MKS-Modell des Führerstandsmoduls und des Triebfahrzeugführers

In den folgenden Abschnitten 9.4.7.2 bis 9.4.7.5 werden die für die Simulationsrechnungen verwendeten Systemparameter in Abhängigkeit von der jeweiligen Modellvariante beschrieben.

9.4.7.2 Modellvariante 1: Status - Analyse

Als Referenzmodell für nachfolgende Untersuchungen werden zuerst die Insassenbelastungen des IST-Zustandes ermittelt. Die Modellvariante 1 stellt damit die Ausgangssituation ohne Schutzsystem dar und dient zum Vergleich der Ergebnisse mit nachfolgenden Varianten.

Die Definition der Kontaktkräfte zwischen Führerstandstisch und Dummy erfolgt über Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte. Die Kontaktkennwerte werden für den jeweiligen lokalen Aufprallbereich (Kopf, Thorax, Abdomen/Pelvis) wie folgt definiert (Tabelle 9.9):

Tabelle 9.9: Systemparameter zur Beschreibung der lokalen Aufprallsteifigkeiten - Modellvariante 1 (Status - Analyse)

Lokaler Aufprallbereich	Steifigkeitskennwert [N/m]	Dämpfungskennwert [Ns/m]	Bemerkung
Kopf	10^8	10^5	progressiver Verlauf
Thorax	10^8	10^4	progressiver Verlauf
Abdomen/Pelvis	10^8	10^4	progressiver Verlauf

Für die Definition der lokalen Aufprallsteifigkeiten wurden bewusst hohe Werte gewählt, die einer starren Platte entsprechen, da keine Materialkennwerte des für die Simulationsrechnungen verwendeten Führerstandsmoduls vorliegen.

9.4.7.3 Modellvariante 2: Verwendung einer zusätzlichen Polsterung

Modellvariante 2 dient zur Ermittlung der Insassenbelastungen für eine im Vergleich zu Modellvariante 1 weicheren Aufprallfläche im Becken-/Abdominalbereich, bei gleichbleibender Steifigkeit und Dämpfung im Bereich des Kopfaufpralls. Zusätzlich ist eine 200mm dicke Polsterung im Becken-/Abdominalbereich für die Simulationsrechnungen modelliert worden.

Die Kontaktkennwerte für den jeweiligen lokalen Aufprallbereich (Kopf, Thorax, Abdomen/Pelvis) und für die zusätzliche Polsterung sind in Tabelle 9.10 dargestellt:

Tabelle 9.10: Systemparameter zur Beschreibung der lokalen Aufprallsteifigkeiten - Modellvariante 2 (zusätzliche Polsterung)

Lokaler Aufprallbereich	Steifigkeitskennwert [N/m]	Dämpfungskennwert [Ns/m]	Bemerkung
Kopf	10^8	10^5	progressiver Verlauf
Thorax	$5 \cdot 10^7$	1500	stark progressiver Verlauf
Abdomen/Pelvis	$5 \cdot 10^7$	1500	stark progressiver Verlauf
Polsterung	$5 \cdot 10^4$	1,5	trapezförmige Kraft-Weg-Kennung

9.4.7.4 Modellvariante 3: Verwendung eines Beckengurtes mit Gurtkraftbegrenzung

Für eine Untersuchung des Einflusses eines Beckengurtes auf die Insassenbelastungen wurde in Modellvariante 3 ein Beckengurt mit Gurtkraftbegrenzung, $F_{\text{Gurtband}} = 16 \text{ kN}$ als zusätzliches Rückhaltesystem modelliert.

Die Kontaktkennwerte für den jeweiligen lokalen Aufprallbereich (Kopf, Thorax, Abdomen/Pelvis) und für den Beckengurt sind in Tabelle 9.11 dargestellt.

Im Vergleich zu Modellvariante 1 sind die Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte für den Becken-/ Abdominalbereich und Kopfbereich unverändert geblieben.

Tabelle 9.11: Systemparameter zur Beschreibung der lokalen Aufprallsteifigkeiten - Modellvariante 3 (Verwendung eines Beckengurtes mit Gurtkraftbegrenzung)

Lokaler Aufprallbereich	Steifigkeitskennwert [N/m]	Dämpfungskennwert [Ns/m]	Bemerkung
Kopf	10^8	10^5	progressiver Verlauf
Thorax	10^8	10^4	progressiver Verlauf
Abdomen/Pelvis	10^8	10^4	progressiver Verlauf
Beckengurt	$1,1 \cdot 10^5$	11,0	trapezförmige Kraft-Weg-Kennung, Gurtkraftbegrenzung ($F_{\text{Gurtband}} = 16 \text{ kN}$)

9.4.7.5 Modellvariante 4: Verwendung eines Dreipunktgurtes mit Gurtkraftbegrenzung

Für eine Untersuchung des Einflusses eines Dreipunktgurtes auf die Belastungen des Triebfahrzeugführers wurde in Modellvariante 4 ein Dreipunktgurt mit Gurtkraftbegrenzung, $F_{\text{Gurtband}} = 11 \text{ kN}$, als zusätzliches Rückhaltesystem modelliert. Im Vergleich zu Modellvariante 1 sind die Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte für den Becken-/ Abdominalbereich und Kopfbereich unverändert geblieben.

Die Kontaktkennwerte für den jeweiligen lokalen Aufprallbereich (Kopf, Thorax, Abdomen/Pelvis) und für den Dreipunktgurt sind in Tabelle 9.12 dargestellt:

Tabelle 9.12: Systemparameter zur Beschreibung der lokalen Aufprallsteifigkeiten - Modellvariante 4 (Verwendung eines Dreipunktgurtes mit Gurtkraftbegrenzung)

Lokaler Aufprallbereich	Steifigkeitskennwert [N/m]	Dämpfungskennwert [Ns/m]	Bemerkung
Kopf	10^8	10^5	progressiver Verlauf
Thorax	10^8	10^4	progressiver Verlauf
Abdomen/Pelvis	10^8	10^4	progressiver Verlauf
Dreipunktgurt	$1,1 \cdot 10^5$	11,0	trapezförmige Kraft-Weg-Kennung, Gurtkraftbegrenzung ($F_{\text{Gurtband}} = 11 \text{ kN}$)

10 Rechnerische Simulation zur Ermittlung der Belastungen für den Fahrgast und den Triebfahrzeugführer

10.1 Ermittlung der Beschleunigung-Zeit-, Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Charakteristika

Für den Vergleich mit den in Abschnitt 5.4 genannten relevanten Schutzkriterien aus der Kraftfahrzeugsicherheit war es notwendig, die mit Hilfe des Mehrkörper - Simulationsprogramms ADAMS[®] ermittelten Beschleunigung-Zeit- und Kraft-Zeit-Charakteristika auszuwerten. Da die z. B. für die Berechnung des HIC₃₆- und des SI-Wertes sowie der Beschleunigungsmaxima erforderliche Nachbearbeitung der Ergebnisse mit ADAMS nicht möglich ist, wurde die Auswertung der Simulationsdaten mit dem Programmsystem FAMOS[®] vorgenommen, welches über die benötigten mathematischen Operatoren und Funktionen verfügt.

Die grafischen Darstellungen der Simulationsergebnisse (Beschleunigung-Zeit- und Kraft-Zeit-Charakteristika) sind dem Anhang C zu entnehmen. Gegebenenfalls sind zusätzlich die Kraft-Weg-Charakteristika bei Verwendung von Schutzsystemen (lokale Polsterung, optimiertes Energieabsorptionsvermögen, Verwendung eines Becken- bzw. Dreipunktgurtes) dargestellt.

In Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.4 erfolgt eine Zuordnung der mit dem Mehrkörper-Programmsystem ADAMS[®] erzielten Simulationsergebnisse zu den untersuchten Modellvarianten für den Fahrgastbereich (Reihenbestuhlung, Abteilbestuhlung mit und ohne Tisch) und das Führerstandsmodul.

Tabelle 10.1: Reihenbestuhlung: Übersicht der ermittelten Beschleunigung-Zeit-, Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Charakteristika im Anhang C

Variante	Beschleunigung-Zeit-Charakteristik	Kraft-Zeit-Charakteristik	Kraft-Weg-Charakteristik	Bemerkung zur Kraft-Weg-Charakteristik
A1	Abbildung C.1 bis Abbildung C.3	Abbildung C.4	-	-
A2	Abbildung C.5 bis Abbildung C.7	Abbildung C.8	Abbildung C.9	Anprall gegen Rückenlehne des Vordersitzes
B1	Abbildung C.10 bis Abbildung C.12	Abbildung C.13	-	-
B2	Abbildung C.14 bis Abbildung C.16	Abbildung C.17	Abbildung C.18	Anprall gegen Rückenlehne des Vordersitzes
B3	Abbildung C.19 bis Abbildung C.21	Abbildung C.22	Abbildung C.23 Abbildung C.24	Anprall gegen Rückenlehne des Vordersitzes
C1	Abbildung C.25 bis Abbildung C.27	Abbildung C.28	-	-
C2	Abbildung C.29 bis Abbildung C.31	Abbildung C.32	Abbildung C.33	Anprall gegen Rückenlehne des Vordersitzes

Tabelle 10.2: Abteilbestuhlung ohne Tisch: Übersicht der ermittelten Beschleunigung-Zeit-, Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Charakteristika im Anhang C

Variante	Beschleunigung-Zeit-Charakteristik	Kraft-Zeit-Charakteristik	Kraft-Weg-Charakteristik	Bemerkung zur Kraft-Weg-Charakteristik
A1	Abbildung C.34 bis Abbildung C.36	Abbildung C.37	-	-
A2	Abbildung C.38 bis Abbildung C.40	Abbildung C.41	Abbildung C.42	Anprall gegen vis-à-vis angeordneten Sitz
B1	Abbildung C.43 bis Abbildung C.45	Abbildung C.46	-	-
B2	Abbildung C.47 bis Abbildung C.49	Abbildung C.50	Abbildung C.51	Anprall gegen vis-à-vis angeordneten Sitz
C1	Abbildung C.52 bis Abbildung C.54	Abbildung C.55	-	-
C2	Abbildung C.56 bis Abbildung C.58	Abbildung C.59	Abbildung C.60	Anprall gegen vis-à-vis angeordneten Sitz

Tabelle 10.3: Abteilbestuhlung mit Tisch: Übersicht der ermittelten Beschleunigungs-Zeit-, Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Charakteristika im Anhang C

Variante	Beschleunigungs-Zeit-Charakteristik	Kraft-Zeit-Charakteristik	Kraft-Weg-Charakteristik	Bemerkung zur Kraft-Weg-Charakteristik
A1	Abbildung C.61 bis Abbildung C.63	Abbildung C.64	Abbildung C.65	Anprall des Beckens gegen den Tisch
B1	Abbildung C.66 bis Abbildung C.68	Abbildung C.69	Abbildung C.70	Anprall des Beckens gegen den Tisch
B2	Abbildung C.71 bis Abbildung C.73	Abbildung C.74	Abbildung C.75	Anprall des Beckens gegen den Tisch
B3	Abbildung C.76 bis Abbildung C.78	Abbildung C.79	Abbildung C.80	Anprall des Beckens gegen den Tisch
C1	Abbildung C.81 bis Abbildung C.83	Abbildung C.84	Abbildung C.85	Anprall des Beckens gegen den Tisch

Tabelle 10.4: Führerstandsmodul: Übersicht der ermittelten Beschleunigungs-Zeit-, Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Charakteristika im Anhang C

Variante	Beschleunigungs-Zeit-Charakteristik	Kraft-Zeit-Charakteristik	Kraft-Weg-Charakteristik	Bemerkung zur Kraft-Weg-Charakteristik
1	Abbildung C.86 bis Abbildung C.88	Abbildung C.89	-	-
2	Abbildung C.90 bis Abbildung C.92	Abbildung C.93	Abbildung C.94	Anprall des Beckens gegen Führerstandstisch
3	Abbildung C.95 bis Abbildung C.97	Abbildung C.98	Abbildung C.99	Kraft- und Weg - Cha- rakteristik des Becken- gurtes (Gurtband)
4	Abbildung C.100 bis Abbildung C.102	Abbildung C.103	Abbildung C.104	Kraft- und Weg - Cha- rakteristik des Drei- punktgurtes (Gurtband)

10.2 Ergebnisse für eine Reihenbestuhlung unter Verwendung der Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Fahrgastbereich

10.2.1 Ermittlung der HIC_{36} -Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen

Nach US-Standard FMVSS 208 ist die als Grenzwert anzusehende Schwelle des HIC_{36} auf 1.000 festgelegt (siehe Abschnitt 5.4).

In Abbildung 10.1 sind die HIC_{36} -Werte, berechnet aus der resultierenden, translatorischen Kopfbeschleunigung, für unterschiedliche Verzögerungsverläufe und Varianten dargestellt.

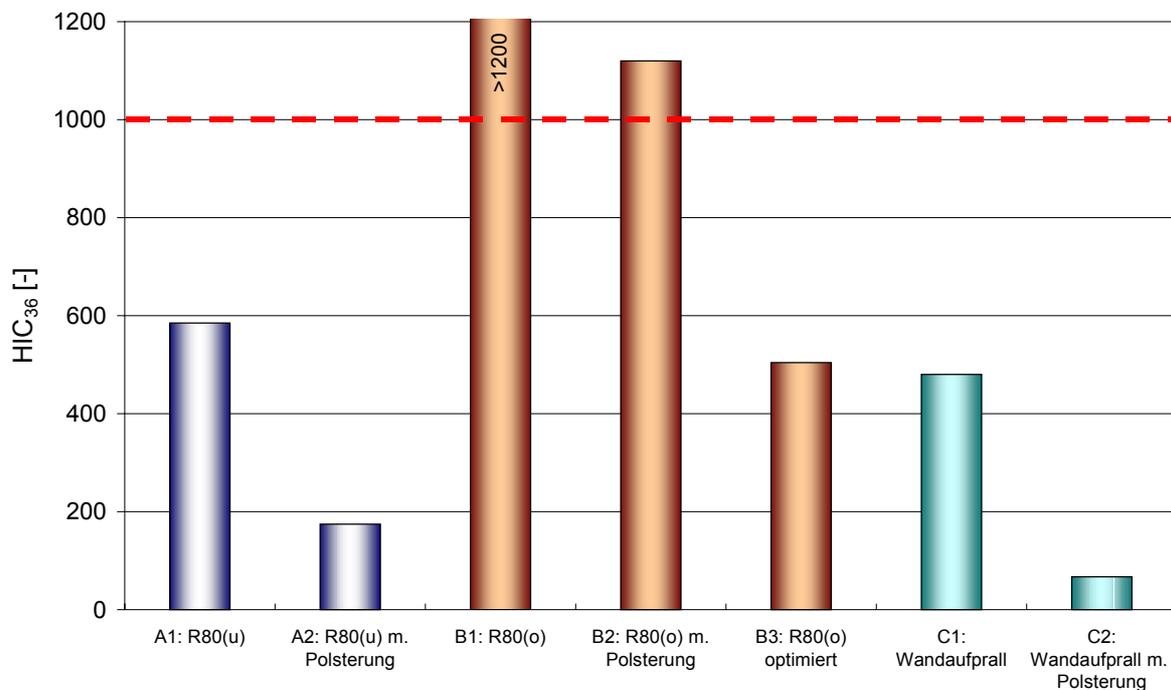


Abbildung 10.1: Vergleich der berechneten HIC_{36} -Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen

Der Grenzwert des HIC_{36} von 1000 wird bei der Variante B1 (obere Intervallkurve nach ECE-R 80 ohne zusätzliche Polsterung) deutlich überschritten. Auch eine zusätzliche Polsterung im des Kopfanpralls ist nicht ausreichend, den HIC_{36} -Werte hinreichend zu reduzieren. Erst eine weitere Optimierung der Sitzlehne und der Polsterung (Variante B3) führt zu einer Einhaltung des HIC_{36} -Grenzwertes. Bei den anderen untersuchten Varianten, denen moderatere Be-

schleunigung-Zeit-Charakteristiken zugrunde liegen, wird das HIC36-Schutzkriterium bereits bei der Konfiguration ohne zusätzliche Polsterung sicher eingehalten.

10.2.2 Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Kopf (a_{3ms})

Im FMVSS 201 ist für die resultierende, translatorische Beschleunigung, die auf den Kopf wirkt, folgender Grenzwert festgelegt: $a_{3ms} = 80 \text{ g}$.

In Abbildung 10.2 sind die Maxima der resultierenden, translatorischen Kopfbeschleunigung für die Varianten A1 bis C2 dargestellt.

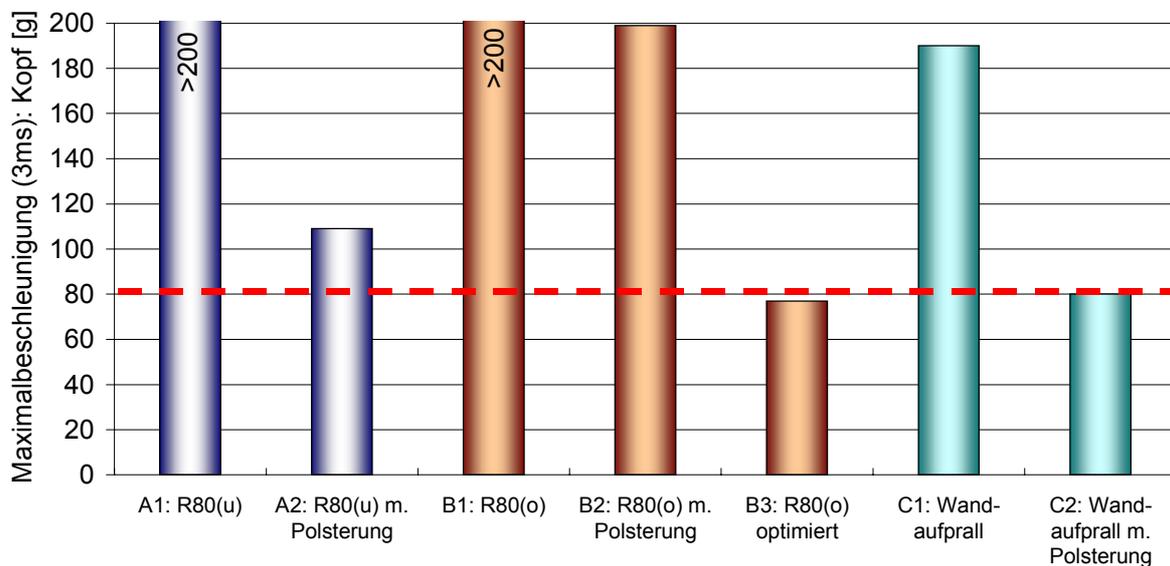


Abbildung 10.2: Vergleich der Maxima der resultierenden Kopfbeschleunigung (a_{3ms} : Kopf)

Der zulässige Grenzwert für die resultierende, translatorische Kopf-Beschleunigung wird für alle Verzögerungscharakteristiken bei den Varianten ohne zusätzliche Polsterung deutlich überschritten. Bei den Varianten A2 und B2 (Verzögerung gemäß ECE-R 80) reicht eine lokale Polsterung des Knie- und Kopfanprallbereiches nicht aus, um den Grenzwert einzuhalten. Nur durch ein verbessertes Energieabsorptionsvermögen der Polsterung für den Kopfanprall und eine nachgiebig gestaltete Sitzlehne ist eine deutliche Reduzierung der Kopfverzögerung unter den zulässigen Wert möglich. Bei Variante C2 (Wandaufprall mit zusätzlicher Polste-

rung) entspricht das Maximum der resultierenden Kopfbeschleunigung genau dem Grenzwert von 80 g.

10.2.3 Ermittlung der SI-Werte aus den resultierenden Beschleunigungen für den Thorax

Als Schutzkriterium für die Brust wurde im FMVSS 208 der SI auf 1.000 festgelegt.

In [Abbildung 10.3](#) sind die SI-Werte, berechnet aus der resultierenden, translatorischen Brustbeschleunigung, für unterschiedliche Verzögerungsverläufe und Varianten dargestellt.

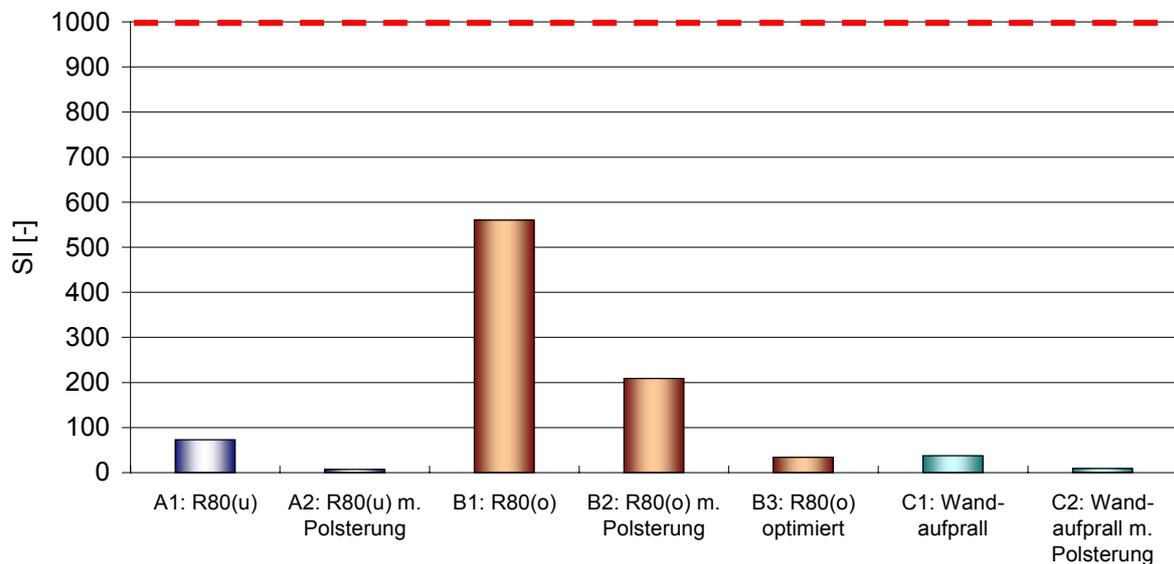


Abbildung 10.3: Vergleich der berechneten SI-Werte aus der resultierenden Brustbeschleunigung

Die als Grenzwert definierte Schwelle des SI-Wertes von 1.000 wird bei keiner Variante überschritten. Erwartungsgemäß tritt der größte Wert bei der Variante B1 (Verzögerungsverlauf gemäß obere Grenzkurve nach ECE-R 80) auf. Es zeigt sich, dass der SI-Wert als Schutzkriterium für die Bewertung der Insassenbelastungen bei Reihenbestuhlung im Fahrgastbereich von Schienenfahrzeugen eine eher untergeordnete Bedeutung besitzt.

10.2.4 Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Thorax (a_{3ms})

Im Standard FMVSS 208 ist für die resultierende, translatorische Beschleunigung, die auf den Oberkörper (Thorax) wirkt, folgender Grenzwert festgelegt: $a_{3ms} = 60$ g.

Die Maxima der resultierenden, translatorischen Brustbeschleunigung für die Varianten A1 bis C2 sind in [Abbildung 10.4](#) dargestellt.

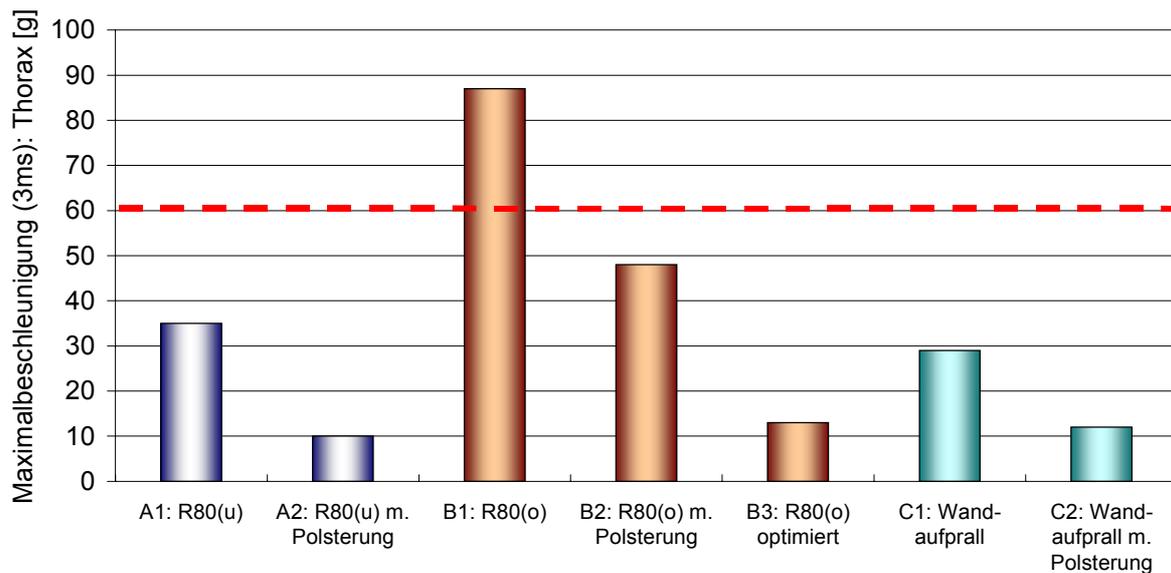


Abbildung 10.4: Vergleich der Maxima der resultierenden Brustbeschleunigung (a_{3ms} : Thorax)

Wie sich bereits aus der Ermittlung der SI-Werte vermuten lässt, wird der zulässige Grenzwert für die resultierende, translatorische Thorax-Beschleunigung nur bei Variante B1 (ECE-R 80: obere Grenzkurve) überschritten. Bei allen anderen Varianten wird die als Grenzwert festgelegte Beschleunigung von $a_{3ms} = 60$ g eingehalten, wobei der positive Einfluss einer zusätzlichen Polsterung des lokalen Kopf- und Knieanprallbereiches und einer nachgiebigen Sitzlehne deutlich erkennbar ist.

10.2.5 Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Pelvis (a_{3ms})

Nach den Belastungs- und Schutzkriterien für den Abdominalbereich und das Becken (Pelvis), die zur Zeit in der Kraftfahrzeugsicherheit diskutiert werden, ist für die resultierende, translatorische Beschleunigung, die auf das Becken (Pelvis) wirkt, folgender Grenzwert festgelegt: $a_{3ms} = 80 \text{ g}$.

Die Maxima der resultierenden, translatorischen Beckenbeschleunigung für die Varianten A1 bis C2 sind in Abbildung 10.5 dargestellt.

Der zulässige Grenzwert für die resultierende, translatorische Beschleunigung des Pelvis wird bei keiner Variante überschritten. Bei den Varianten mit einer zusätzlichen Polsterung des lokalen Knieanprallbereiches und einer nachgiebigen Sitzlehne ist der positive Einfluss auf die Beckenbelastungen erkennbar.

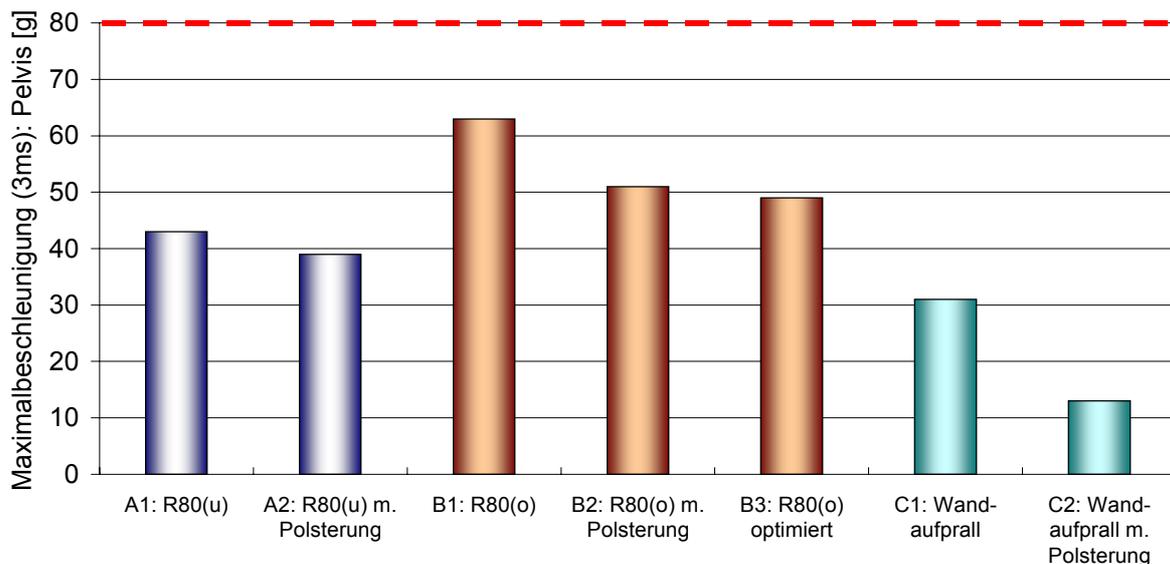


Abbildung 10.5: Vergleich der Maxima der resultierenden Beckenbeschleunigung (a_{3ms} : Pelvis)

10.2.6 Ermittlung der maximalen Oberschenkel-Längsdruckkräfte

Nach US-Standard FMVSS 208 ist für die maximal zulässige Oberschenkel-Längsdruckkraft ein Grenzwert von 10.000 N festgelegt.

Abbildung 10.6 zeigt einen Vergleich der maximalen Oberschenkel-Längsdruckkräfte für alle Varianten.

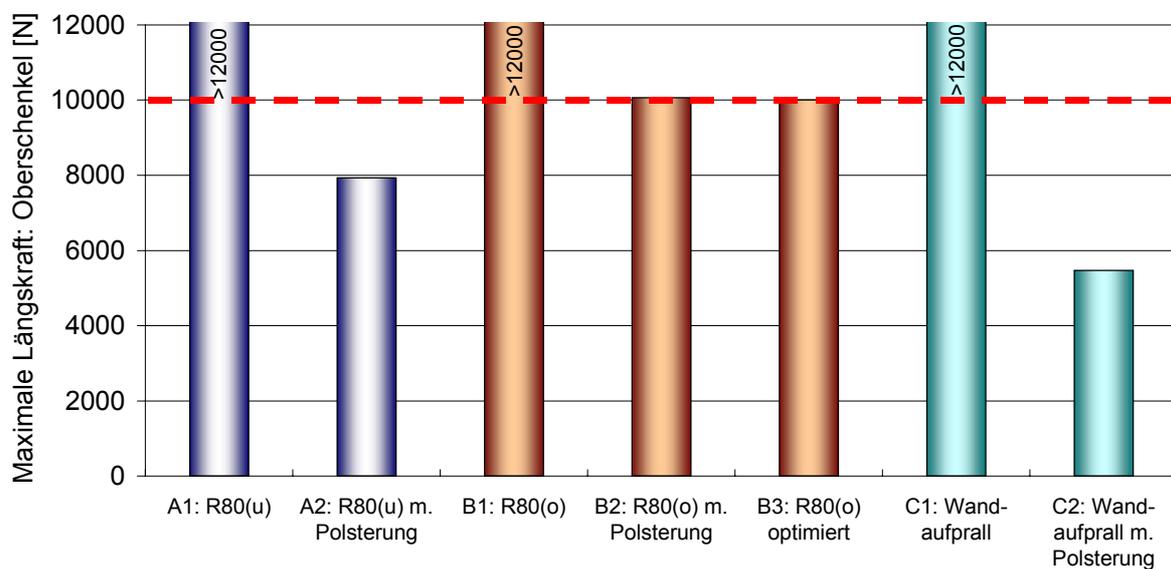


Abbildung 10.6: Vergleich der maximalen Oberschenkel-Längsdruckkräfte

Der zulässige Grenzwert von 10.000 N wird bei den Varianten ohne zusätzliche Polsterung im Bereich des Knieanpralls deutlich überschritten. Durch eine lokale Polsterung können die Oberschenkelbelastungen auch bei großen Fahrzeugverzögerungen derart reduziert werden, dass die zulässigen Grenzwerte einzuhalten sind.

10.3 Ergebnisse für eine Abteilbestuhlung ohne Tisch (vis-à-vis) unter Verwendung der Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Fahrgastbereich

10.3.1 Ermittlung der HIC_{36} -Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen

Die aus den resultierenden, translatorischen Kopfbeschleunigungen ermittelten HIC_{36} -Werte sind für die unterschiedlichen Verzögerungsverläufe und Varianten in Abbildung 10.7 dargestellt.

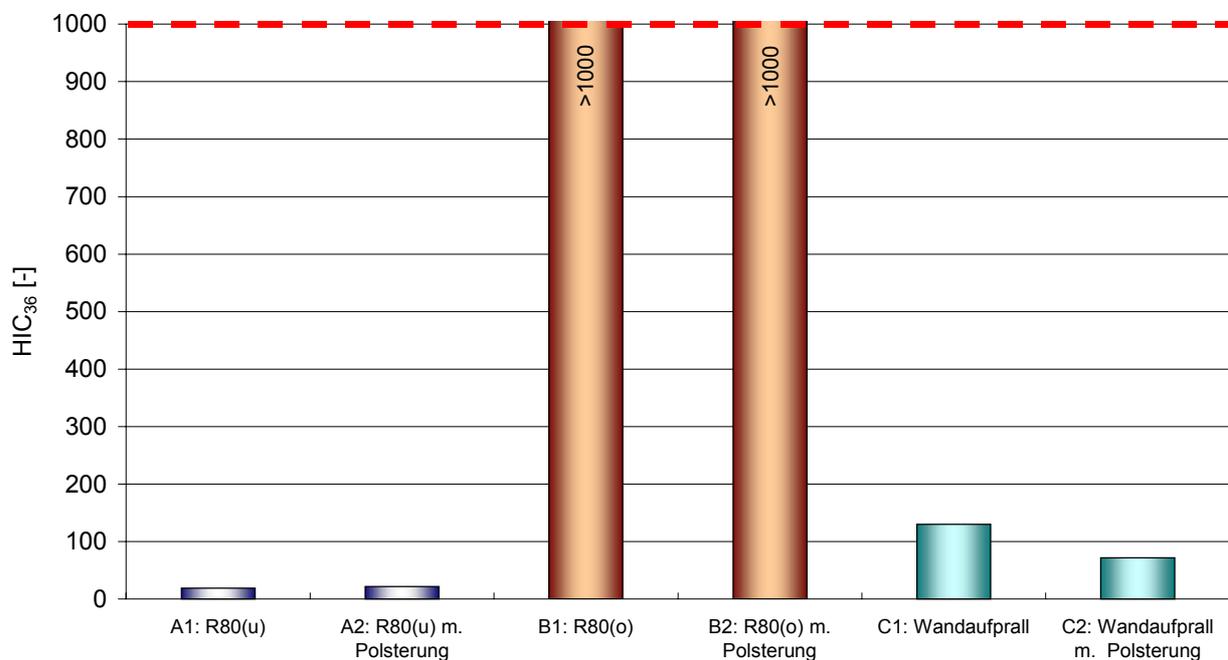


Abbildung 10.7: Vergleich der berechneten HIC_{36} -Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen

Der Grenzwert des HIC_{36} von 1.000 wird bei der Beschleunigung-Zeit-Charakteristik gemäß ECE-R 80 (obere Grenzkurve - Varianten B1 und B2) mit und ohne zusätzliche Polsterung des Bereiches des Kopfanpralls überschritten. Die HIC_{36} -Werte der anderen Varianten sind wesentlich kleiner und liegen deutlich unterhalb des Grenzwertes von 1.000. Dieses Ergebnis lässt auf eine signifikante Abhängigkeit der Kopfbelastungen vom Verzögerungsverlauf aufgrund der großen Vorverlagerung des Insassen und der damit verbundenen großen Relativge-

schwindigkeit zwischen Fahrzeug und Insasse beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz schließen.

10.3.2 Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Kopf (a_{3ms})

In Abbildung 10.8 sind die Maxima der resultierenden, translatorischen Kopfbeschleunigung für die Varianten A1 bis C2 dargestellt.

Der zulässige Grenzwert von 80 g wird bei den Varianten B1 und B2 und beim Wandaufprall ohne Polsterung (Variante C1) überschritten. Bei einer Verzögerung gemäß ECE-R 80 (obere Grenzkurve) reicht eine lokale Polsterung nicht aus, um den Grenzwert einzuhalten. Im Vergleich zur Reihenbestuhlung ist auch hier zu erwarten, dass eine weitere Reduzierung der Kopfverzögerung unter den zulässigen Wert nur durch ein verbessertes Energieabsorptionsvermögen und hinreichender Nachgiebigkeit der Sitzlehne möglich ist. Bei den Varianten A1 und A2 (Verzögerung gemäß ECE-R 80 - untere Grenzkurve) ist die auf den Kopf des Insassen wirkende Belastung unkritisch. Auch hier ist der Zusammenhang zwischen der Fahrzeugverzögerung und der auftretenden Insassenbelastung für den Bereich des Kopfes aufgrund der Vorverlagerung des Insassen bis zum Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz zu erkennen.

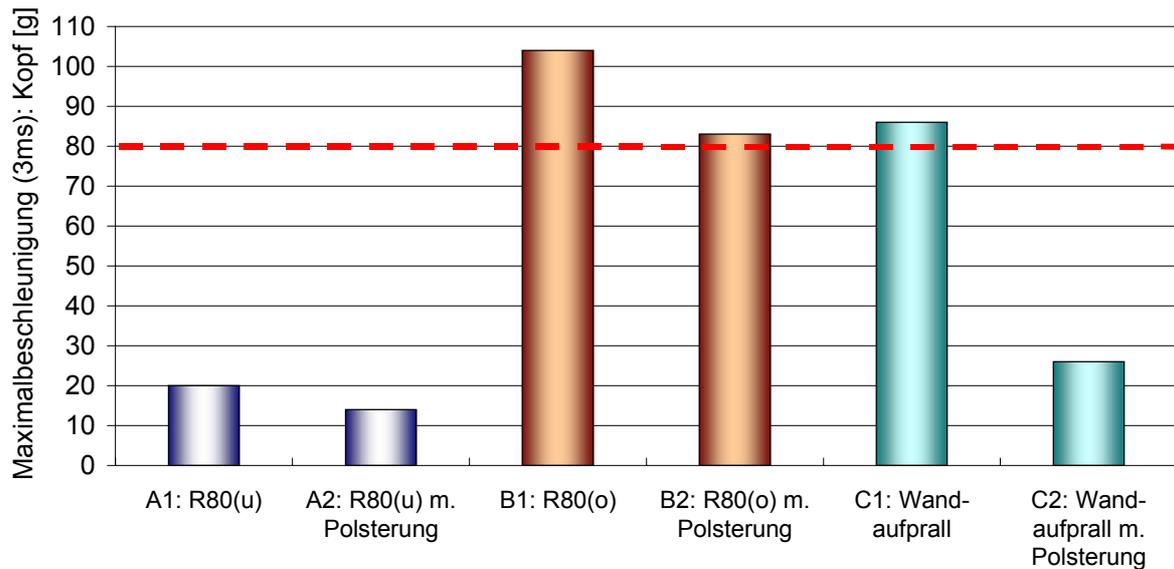


Abbildung 10.8: Vergleich der Maxima der resultierenden Kopfbeschleunigung (a_{3ms} : Kopf)

10.3.3 Ermittlung der SI-Werte aus den resultierenden Beschleunigungen für den Thorax

Die SI-Werte, berechnet aus der resultierenden, translatorischen Brustbeschleunigung, für unterschiedliche Verzögerungsverläufe und Varianten sind in [Abbildung 10.9](#) dargestellt.

Die als Grenzwert definierte Schwelle des SI-Wertes von 1.000 wird bei keiner Variante überschritten. Der größte Wert tritt bei der Variante mit der größten Verzögerung ohne zusätzliche Polsterung bzw. Nachgiebigkeit der Sitzlehne auf (Variante B1: Verzögerungsverlauf gemäß obere Grenzkurve nach ECE-R 80). Wie bereits die ermittelten SI-Werte aus den resultierenden Beschleunigungen des Thorax für die Reihenbestuhlung gezeigt haben, besitzt der SI-Wert als Schutzkriterium für die Bewertung der Insassenbelastungen auch bei vis-à-vis - Sitzanordnung im Fahrgastbereich von Schienenfahrzeugen eine untergeordnete Bedeutung.

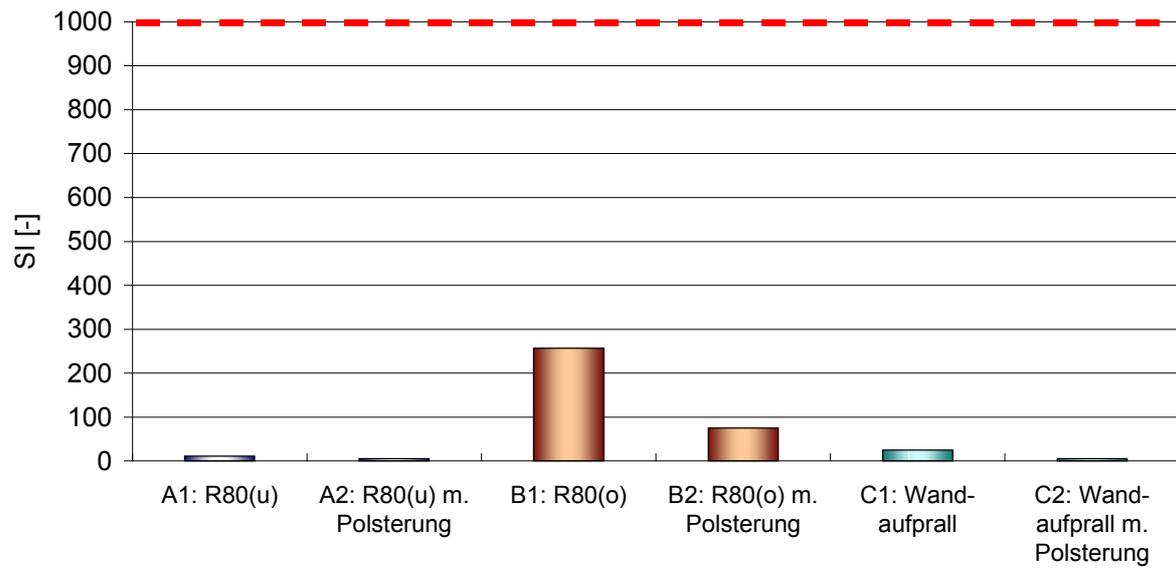


Abbildung 10.9: Vergleich der berechneten SI-Werte aus der resultierenden Brustbeschleunigung

10.3.4 Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Thorax (a_{3ms})

Abbildung 10.10 zeigt die Maxima der resultierenden, translatorischen Brustbeschleunigung für die Varianten A1 bis C2.

Der zulässige Grenzwert für die resultierende, translatorische Thorax-Beschleunigung von 60 g wird bei keiner Variante überschritten. Der positive Einfluss einer zusätzlichen Polsterung des lokalen Kopf- und Knieanprallbereiches und einer nachgiebigen Sitzlehne ist deutlich erkennbar (Varianten A2, B2 und C2).

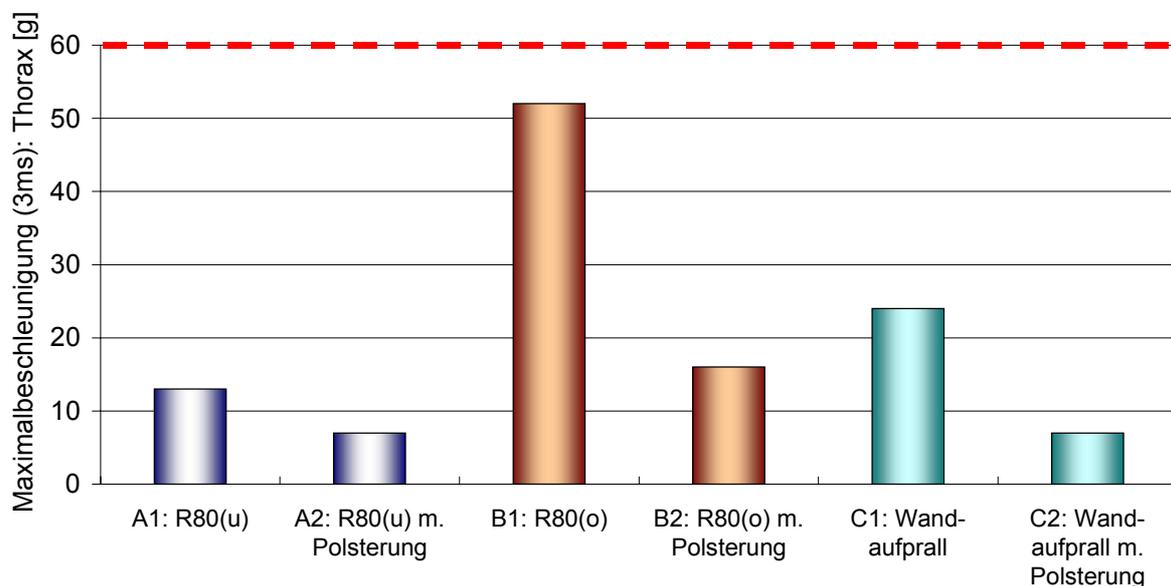


Abbildung 10.10: Vergleich der Maxima der resultierenden Brustbeschleunigung (a_{3ms} : Thorax)

10.3.5 Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Pelvis (a_{3ms})

In Abbildung 10.11 sind die Maxima der resultierenden, translatorischen Beckenbeschleunigung für die Varianten A1 bis C2 dargestellt.

Der zulässige Grenzwert für die resultierende, translatorische Beschleunigung des Pelvis wird bei den Varianten B1 und B2 (Verzögerungsverlauf ECE-R 80 - obere Begrenzung, mit und ohne zusätzliche Polsterung und Nachgiebigkeit der Sitzlehne) deutlich überschritten. Die Krafteinleitung in das Becken erfolgt über den linken und rechten Oberschenkel und resultiert aus dem Knieanprall auf die Vorderkante des Sitzkissens des gegenüberliegenden Sitzes. Aufgrund der aus der Vorverlagerung des Insassen resultierenden großen Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Insasse treten dabei hohe Belastungen des Beckens auf. Der positive Einfluss einer zusätzlichen lokalen Polsterung der Sitzvorderkante im Bereich des Knieanpralls ist bei allen Beschleunigung-Zeit-Charakteristiken erkennbar. Bei Variante B2 ist diese Maßnahme nicht ausreichend, um die große Differenzgeschwindigkeit zwischen Sitz und Insasse im Moment des Knieanpralls durch verbessertes Energieabsorptionsvermögen zu kompensieren.

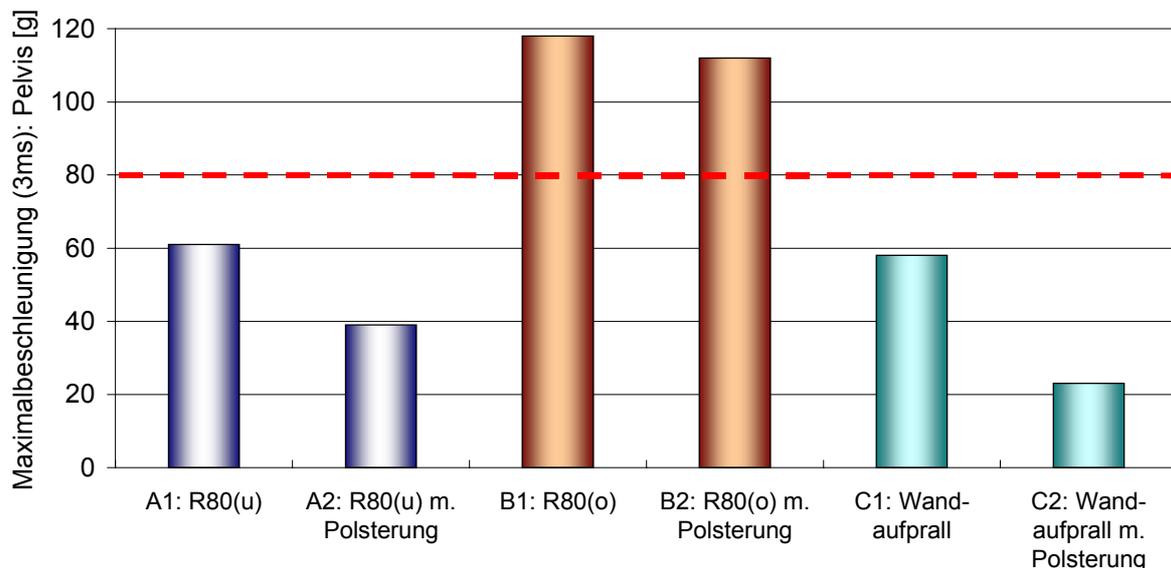


Abbildung 10.11: Vergleich der Maxima der resultierenden Beckenbeschleunigung (a_{3ms} : Pelvis)

10.3.6 Ermittlung der maximalen Oberschenkel-Längsdruckkräfte

Abbildung 10.12 zeigt einen Vergleich der maximalen Oberschenkel-Längsdrücke für die Varianten A1 bis C2.

Wie aufgrund der Auswertung der resultierenden Beckenbeschleunigung zu erwarten war, wird der zulässige Grenzwert von 10.000 N bei allen Varianten ohne zusätzliche Polsterung deutlich überschritten. Durch eine lokale Polsterung der Sitzvorderkante, die im Bereich des Knieanpralls ein verbessertes Energieabsorptionsvermögen besitzt, werden die Oberschenkelbelastungen zumindest bei moderaten Fahrzeugverzögerungen derart reduziert, dass die zulässigen Grenzwerte eingehalten werden. Bei der Beschleunigung-Zeit-Charakteristik gemäß ECE-R 80, obere Begrenzung (Variante B2), treten trotz zusätzlicher Polsterung zu hohe Oberschenkel-Längsdruckkräfte auf, so dass diese Maßnahme nicht geeignet ist, dieses Schutzkriterium für die unteren Extremitäten zu erfüllen.

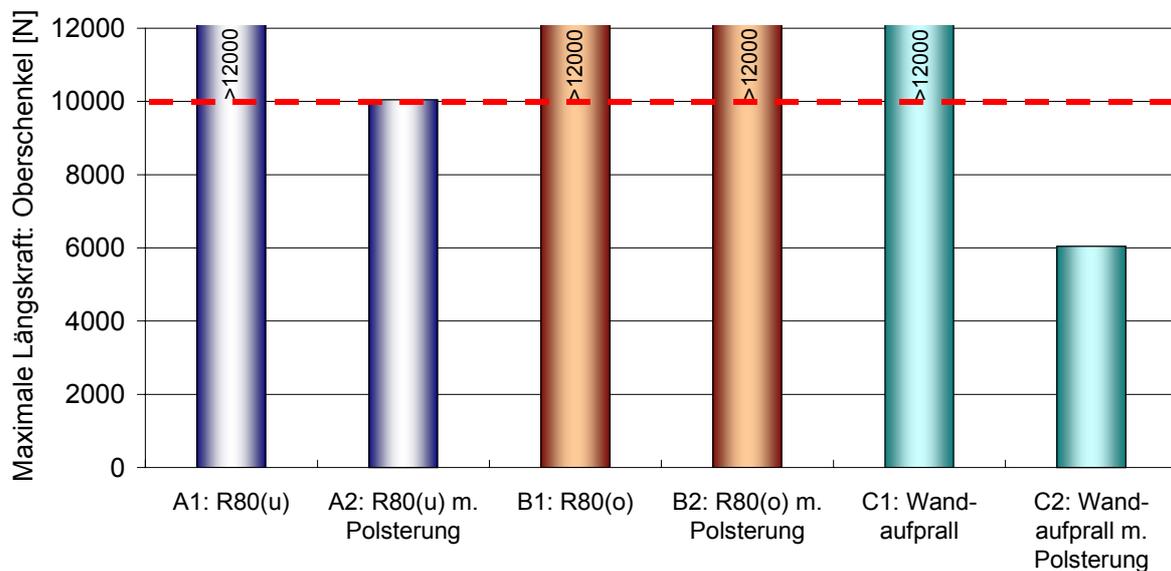


Abbildung 10.12: Vergleich der maximalen Oberschenkel-Längsdruckkräfte

10.4 Ergebnisse für eine Abteilbestuhlung mit Tisch unter Verwendung der Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Fahrgastbereich

10.4.1 Ermittlung der HIC_{36} -Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen

Abbildung 10.13 zeigt die aus den resultierenden, translatorischen Kopfbeschleunigungen ermittelten HIC_{36} -Werte für die Verzögerungsverläufe gemäß ECE-R 80 bzw. des Wandaufpralls und die unterschiedlichen Varianten.

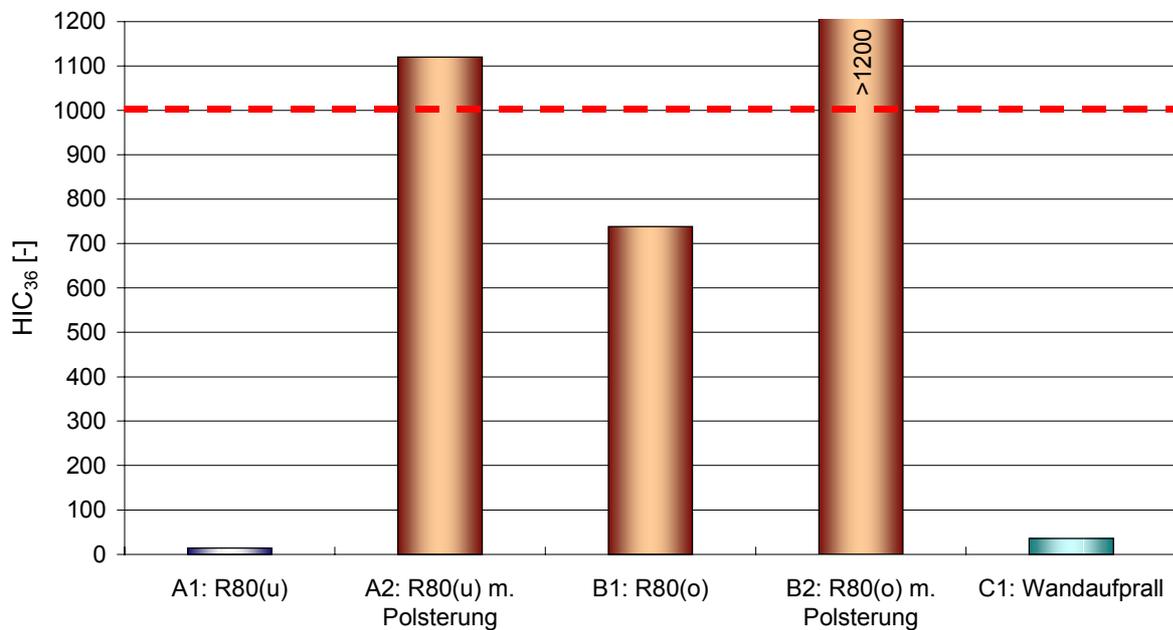


Abbildung 10.13: Vergleich der berechneten HIC_{36} -Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen

Das Schutzkriterium des HIC_{36} von 1.000 wird bei den Varianten mit einer Beschleunigung-Zeit-Charakteristik des Fahrzeuges gemäß ECE-R 80 (obere Grenzkurve) ohne Berücksichtigung zusätzlicher Maßnahmen (Variante B1: Statusvariante) und mit verbreiteter Tischfläche (Variante B3) überschritten. Der HIC_{36} -Wert der Variante mit einer verbesserten Energieabsorptionsfähigkeit des Tisches (Variante B2) liegt unterhalb des Grenzwertes von 1.000. Die HIC_{36} -Werte der anderen Varianten A1 und C1 sind deutlich kleiner.

Die Ergebnisse der Kopfbelastungen aus den Insassensimulationsrechnungen für die vis-à-vis-Bestuhlung mit Tisch zeigen, dass die Größe der Kopfbelastungen unmittelbar vom Verzögerungsverlauf und damit von der Vorverlagerung des Insassen abhängt. Der Fahrgast wird primär infolge des Beckenanpralls gegen die Tischplatte verzögert. Sekundär erfolgt der Kopfkontakt mit der Tischplatte, bei dem die Kopfbeschleunigungen maximal sind. Aus einer Verbreiterung der Tischplatte, als alleinige Maßnahme zur Reduzierung der Vorverlagerung des Insassen und damit der Beckenbeschleunigungen (Variante B3) resultieren offenbar höhere HIC₃₆-Werte.

10.4.2 Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Kopf (a_{3ms})

In Abbildung 10.14 sind die Maxima der resultierenden, translatorischen Kopfbeschleunigung für die Varianten A1, B1 bis B3 und C1 dargestellt.

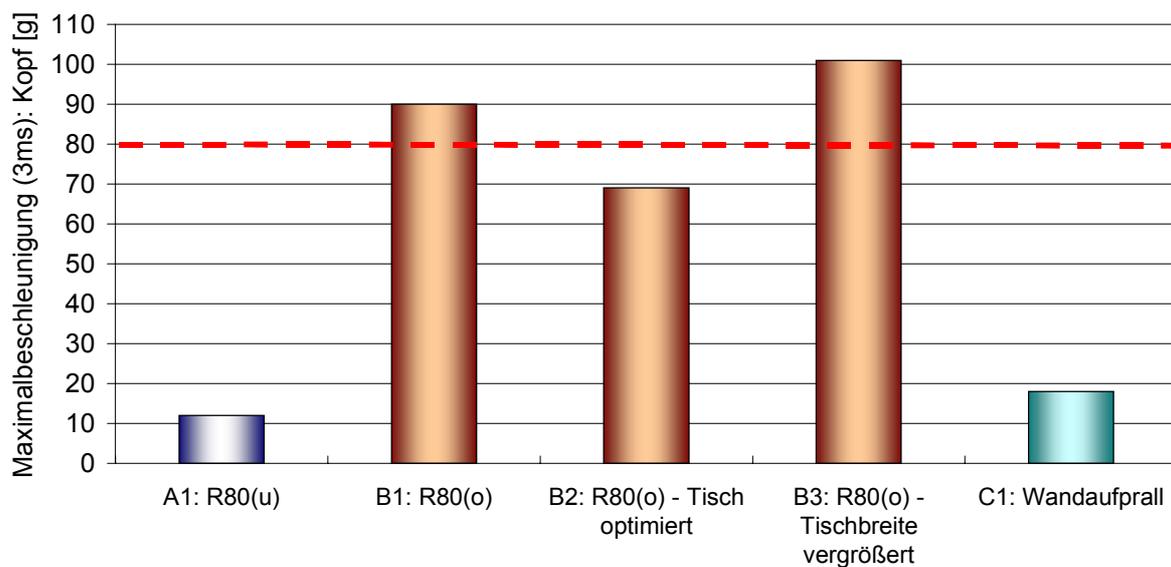


Abbildung 10.14: Vergleich der Maxima der resultierenden Kopfbeschleunigung (a_{3ms} : Kopf)

Analog zu den berechneten HIC₃₆-Werten wird der zulässige Grenzwert von 80 g bei den Varianten B1 und B3 überschritten. Bei einer Verzögerung gemäß ECE-R 80 (obere Grenzkurve) kann eine hinreichende Reduzierung der Kopfbelastungen nur durch eine verbesserte Energieabsorptionsfähigkeit des Tisches hinsichtlich des Kopfanpralls erzielt werden. Eine vergrößerte

te Breite des Tisches führt dagegen zu einem höheren Maximalwert der Kopfbeschleunigung gegenüber der Ausgangsvariante. Bei den Varianten A1 und C1 (Verzögerung gemäß ECE-R 80 - untere Grenzkurve und Wandaufprall) ist die auf den Kopf des Insassen wirkende Belastung unkritisch. Der Zusammenhang zwischen Fahrzeugverzögerung und auftretender Insassenbelastung aufgrund der Geschwindigkeit des Insassen relativ zum Interieur zum Zeitpunkt des Beckenanpralls auf die Tischkante ist auch hier deutlich zu erkennen.

10.4.3 Ermittlung der SI-Werte aus den resultierenden Beschleunigungen für den Thorax

In Abbildung 10.15 sind die aus den resultierenden, translatorischen Brustbeschleunigungen berechneten SI-Werte für unterschiedliche Verzögerungsverläufe und Varianten dargestellt.

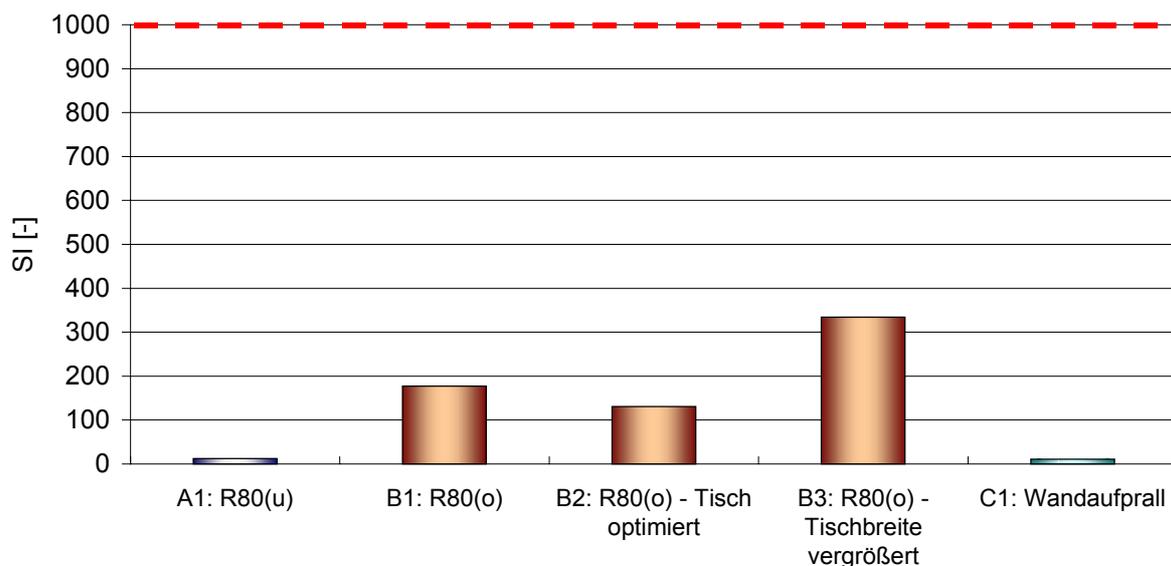


Abbildung 10.15: Vergleich der berechneten SI-Werte aus der resultierenden Brustbeschleunigung

Die aus den resultierenden Beschleunigungen des Thorax ermittelten SI-Werte für die vis-à-vis-Bestuhlung ohne Tisch haben bereits gezeigt, dass der SI-Wert als Schutzkriterium für die Bewertung der Insassenbelastungen eine untergeordnete Bedeutung besitzt. Alle SI-Werte liegen erwartungsgemäß deutlich unterhalb der als Grenzwert definierten Schwelle von 1.000. Äquivalent zu den Kopfbeschleunigungen tritt der größte SI-Wert bei der Variante mit ver-

größerer Tischfläche auf (Variante B3). Die SI-Werte der Varianten mit kleinerer Fahrzeugverzögerung sind zu vernachlässigen.

10.4.4 Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Thorax (a_{3ms})

In Abbildung 10.16 sind die Maximalwerte der resultierenden, translatorischen Brustbeschleunigung für die Varianten A1, B1 bis B3 und C1 dargestellt.

Analog zu den berechneten SI-Werten wird die als Grenzwert für die resultierende, translatorische Beschleunigung des Thorax definierte Schwelle von 60 g bei keiner Variante überschritten. Erwartungsgemäß tritt der größte Maximalwert der Brustbeschleunigung bei Variante B3 (Tischbreite vergrößert) auf. Gegenüber dem Verzögerungsverlauf gemäß ECE-R 80 (obere Grenzkurve) liegen die Maxima der Thorax-Beschleunigung für die Varianten mit kleinerer Verzögerungscharakteristik deutlich niedriger.

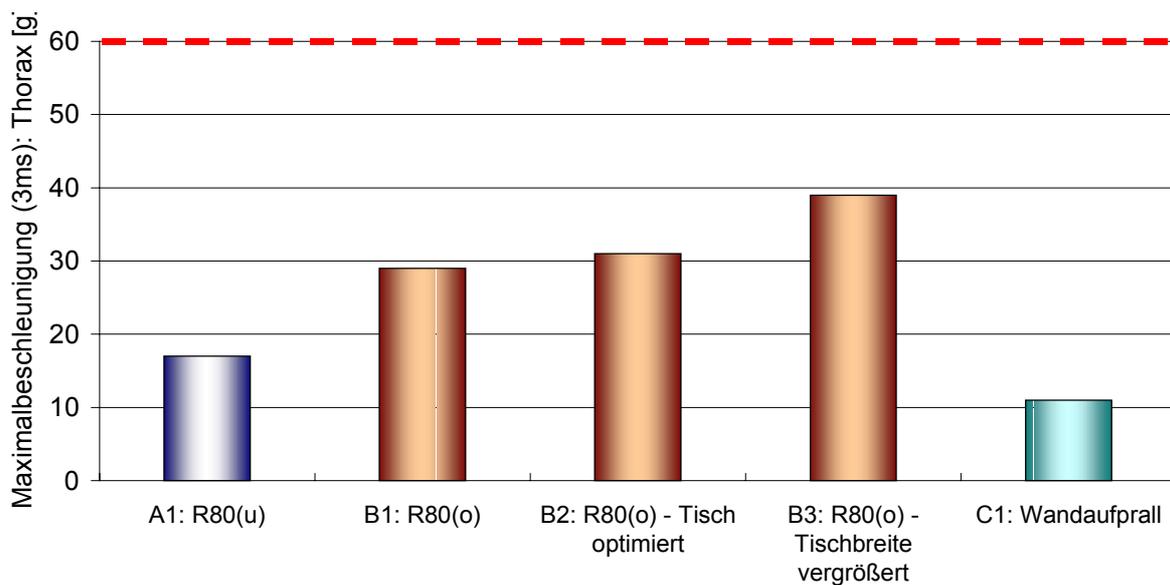


Abbildung 10.16: Vergleich der Maxima der resultierenden Brustbeschleunigung (a_{3ms} : Thorax)

10.4.5 Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Pelvis (a_{3ms})

Abbildung 10.17 zeigt die Maximalwerte der resultierenden, translatorischen Beckenbeschleunigung für die Varianten A1, B1 bis B3 und C1.

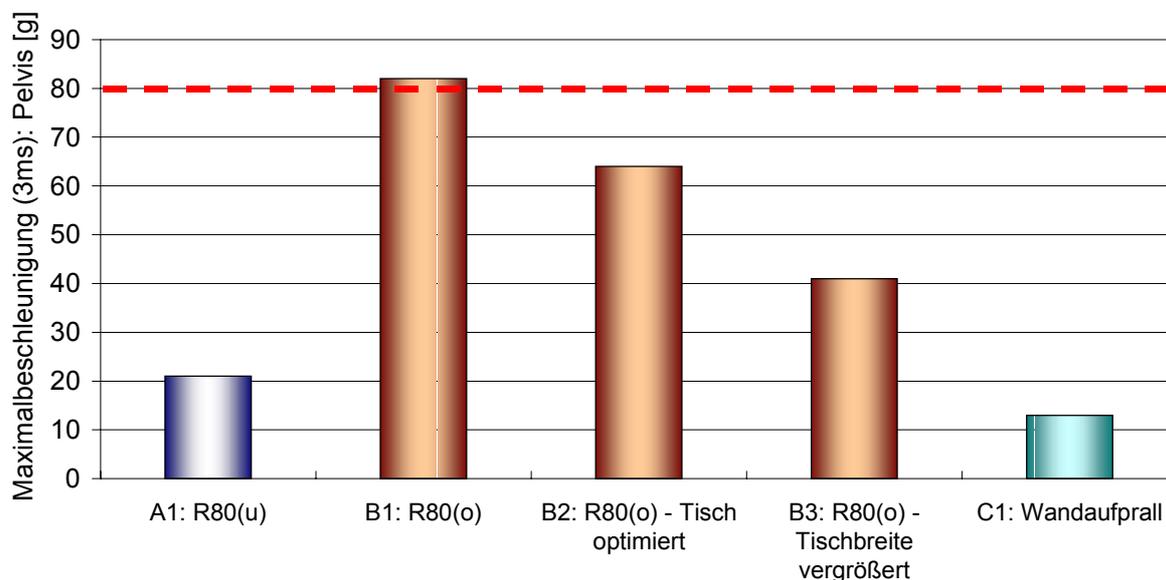


Abbildung 10.17: Vergleich der Maxima der resultierenden Beckenbeschleunigung (a_{3ms} : Pelvis)

Der als Schutzkriterium definierte zulässige Schwellwert für die resultierende, translatorische Beschleunigung des Pelvis wird bei der Variante B1 (Verzögerungsverlauf ECE-R 80 - obere Begrenzung, Statusvariante) überschritten. Eine verbesserte Fähigkeit zur Energieaufnahme des Tisches führt zu einer deutlichen Reduzierung der Belastungen des Pelvis beim Tischanprall. Die Krafteinleitung in das Becken erfolgt dabei direkt über die Tischkante, so dass deren Gestaltung eine besondere Bedeutung zukommt. Insbesondere ist zu verhindern, dass der Anprall des Insassen auf den Tisch über den Abdominalbereich erfolgt, da hier die zulässigen Maximalkräfte und die ertragbare Flächenpressung hinsichtlich der Belastung der inneren Organe (Leber, Niere) vergleichsweise gering sind.

Durch eine Vergrößerung der Tischbreite kann eine weitere Reduzierung der aus der Vorverlagerung des Insassen resultierenden Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Insasse und damit der Belastungen des Beckens beim Tischanprall erzielt werden. Hier ist zu prüfen,

ob eine derartige Maßnahme mit den Komfortanforderungen hinsichtlich der Gestaltung von vis-à-vis-Sitzbereichen in Schienenfahrzeugen zu vereinbaren ist.

10.4.6 Ermittlung der resultierenden Maximalkräfte beim Anprall des Pelvis auf den Tisch

Da die Krafteinleitung in das Becken bei den Varianten der vis-à-vis-Bestuhlung mit Tisch nicht über die Oberschenkel erfolgt, sondern direkt über die Tischkante infolge des Beckenanpralls auf den Tisch, werden hier die dabei auf das Becken wirkenden Maximalkräfte miteinander verglichen (Abbildung 10.18). Hierfür gibt es keinen gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwert. Vielmehr soll der Vergleich der Kraftmaxima für die untersuchten Varianten als Grundlage für eine Abschätzung des Gefahrenpotentials und der zu erwartenden Verletzungsschwere infolge des Beckenanpralls gegen den Tisch dienen.

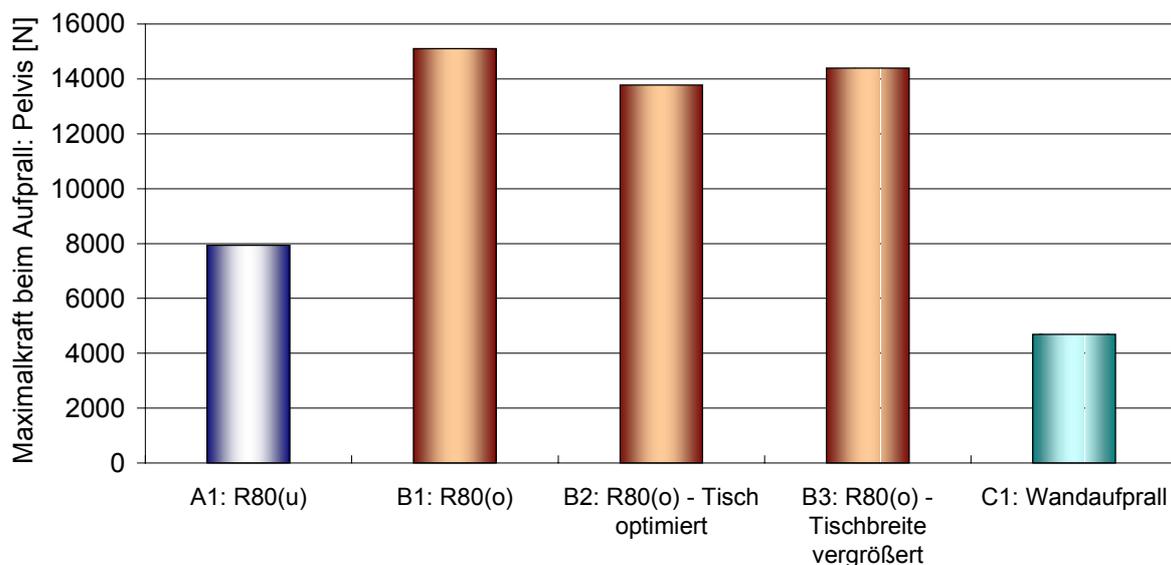


Abbildung 10.18: Vergleich der resultierenden Maximalkräfte beim Beckenanprall auf den Tisch

Die aus dem Tischenprall resultierenden Beckenkräfte werden signifikant von der Verzögerungscharakteristik des Fahrzeuges und von der Tischkantengestaltung beeinflusst. Erwartungsgemäß treten die größten Beckenbelastungen bei der Fahrzeugverzögerung gemäß ECE-R 80 (obere Begrenzung, Varianten B1 bis B3) auf. Durch eine Verbesserung der Energieab-

sorptionsfähigkeit des Tisches ist eine Reduzierung der Beckenkräfte möglich, aber im Fall der höheren Verzögerung nicht in zufriedenstellendem Maße. Dagegen ist bei moderaten Fahrzeugverzögerungen und einer weiteren Optimierung der Energieaufnahme durch den Tisch zu erwarten, dass die Belastungen auf das Becken hinreichend reduziert werden können.

10.5 Ergebnisse der Belastungen für den Triebfahrzeugführer unter Verwendung der Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für das Führerstandsmodul

10.5.1 Ermittlung der HIC_{36} -Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen

In [Abbildung 10.19](#) sind die aus den resultierenden, translatorischen Kopfbeschleunigungen ermittelten HIC_{36} -Werte für die Variante 1 (Statusvariante) und die verschiedenen Maßnahmen zur Reduzierung der Insassenbelastungen (Varianten 2 bis 4) dargestellt. Für die Simulationsrechnungen wurde der in Abschnitt 9.3 aufgeführte Verzögerungsverlauf des Führerstandsmoduls verwendet.

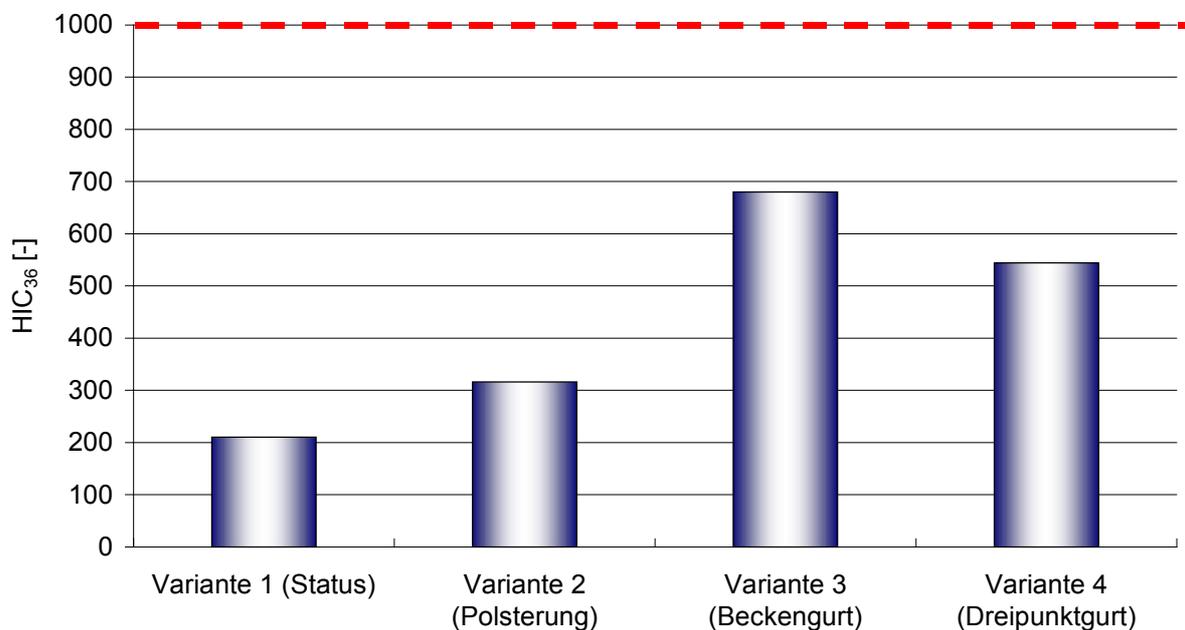


Abbildung 10.19: Vergleich der berechneten HIC_{36} -Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen

Das Schutzkriterium des HIC_{36} von 1.000 wird bei keiner Variante überschritten. Höhere HIC_{36} -Werte ergeben sich für die Varianten, bei denen ein Becken- bzw. Dreipunktgurt zur Rückhaltung des Insassen verwendet wird. Die größte Kopfbelastung tritt für den Fall der Verwendung eines Beckengurtes auf. Hier führen die ausschließlich im Bereich des Beckens über die Gurtbänder eingeleiteten Rückhaltekräfte zu einer Drehbewegung des Oberkörpers einschließlich des Hals- und Kopfbereiches sowie der oberen und unteren Extremitäten um das Becken (sog. "Klappmessereffekt"). Der Anprall des Insassen auf den Führerstandstisch wird dadurch nur über den Oberkörper abgefangen, so dass große Kontaktkräfte im Bereich des Kopfanpralls verbunden mit höheren Kopfbeschleunigungen auftreten.

10.5.2 Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Kopf (a_{3ms})

In [Abbildung 10.20](#) sind die Maxima der resultierenden, translatorischen Kopfbeschleunigung für die Varianten 1 bis 4 dargestellt.

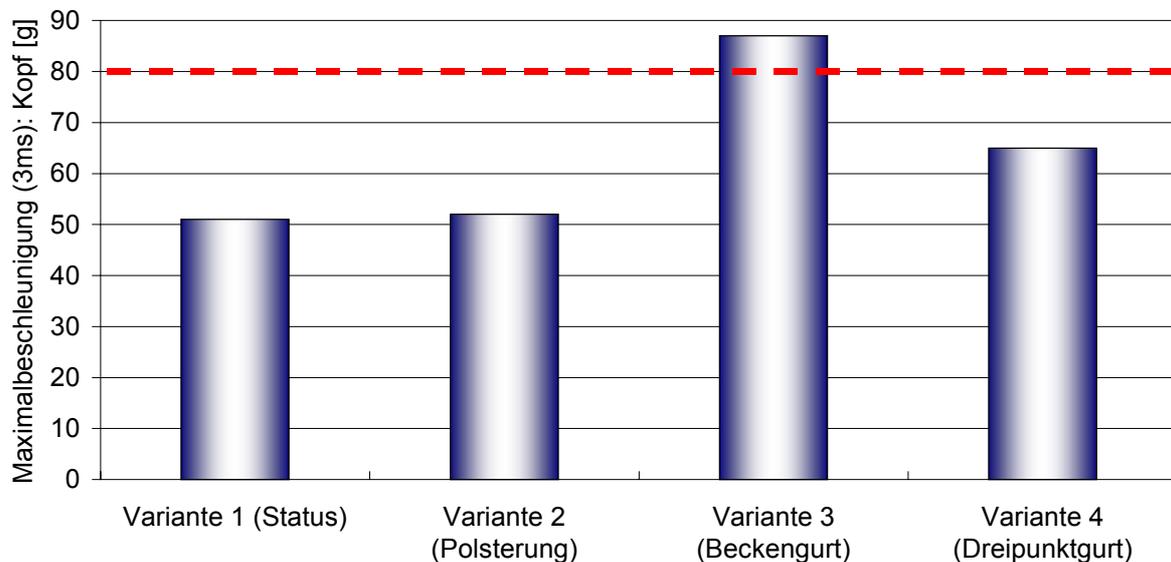


Abbildung 10.20: Vergleich der Maxima der resultierenden Kopfbeschleunigung (a_{3ms} : Kopf)

Wie sich bereits aus den berechneten HIC_{36} -Werten vermuten lässt, wird der zulässige Grenzwert von 80 g nur bei Varianten 3 (Verwendung eines Beckengurtes) überschritten. Dies ist auf den in Abschnitt 10.5.1 beschriebenen "Klappmessereffekt" zurückzuführen, in dessen

Folge der Anprall des Oberkörpers des Insassen auf den Führerstandstisch zu unzulässig hohen Kopfbeschleunigungen führt. Durch die Verwendung eines Dreipunktgurtes kann bereits eine hinreichende Reduzierung der Kopfbelastungen erzielt werden, da hier durch den Schultergurt die Rotationsbewegung des Oberkörpers deutlich vermindert und der Kontakt von Oberkörper/Kopf mit dem Führstandsmodul verhindert wird.

Für die Bewertung der Insassenbelastungen bei den Varianten 1 und 2 sind die ermittelten Kopfbeschleunigungen nicht maßgebend, da die Bewegung des Insassen relativ zum Führstandsmodul im wesentlichen durch das Becken und den Abdominalbereich abgefangen wird.

10.5.3 Ermittlung der SI-Werte aus den resultierenden Beschleunigungen für den Thorax

Abbildung 10.21 zeigt den Vergleich der aus den resultierenden, translatorischen Brustbeschleunigungen berechneten SI-Werte für die untersuchten Varianten 1 bis 4.

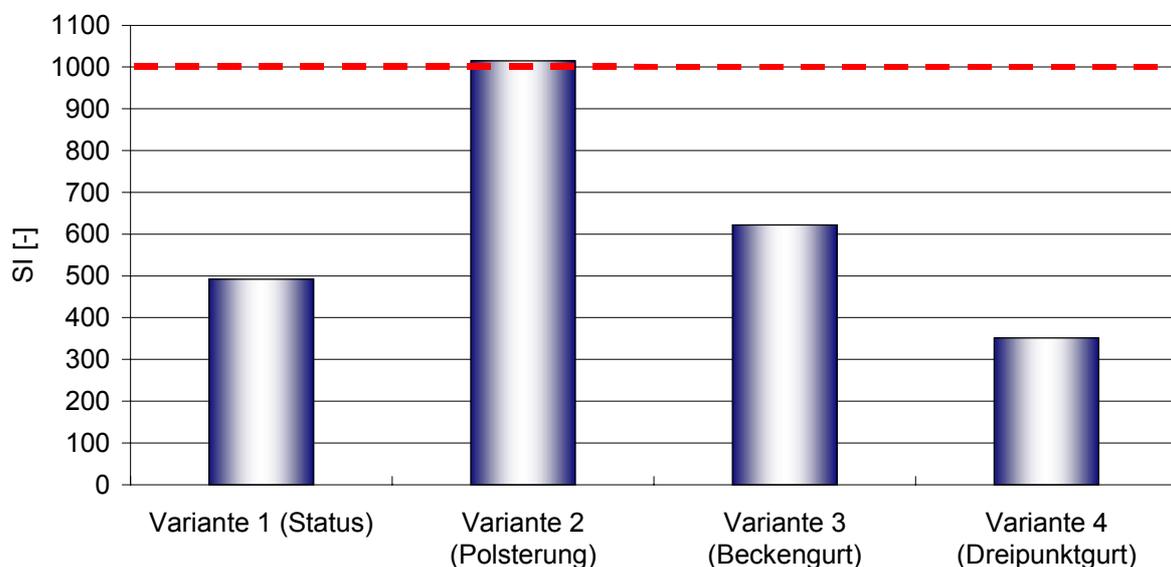


Abbildung 10.21: Vergleich der berechneten SI-Werte aus der resultierenden Brustbeschleunigung

Die als Grenzwert definierte Schwelle des SI-Wertes von 1.000 wird nur bei Variante 2 (zusätzliche Polsterung im Bereich des Anpralls von Becken/Abdomen) überschritten. Hier wirkt

sich die Polsterung im Becken-/Abdominalbereich negativ auf die Belastung des Thorax aus, da die daraus resultierende Drehbewegung des Oberkörpers zu großen Kontaktkräften beim Anprall des Thorax an das Führerstandsmodul führt. Damit verbunden sind hohe Brustbeschleunigungen.

Für die anderen untersuchten Varianten stellt sich das SI-Schutzkriterium für die Bewertung der Brustbelastungen als unkritisch dar. Der kleinste SI-Wert wird bei Verwendung eines Dreipunktgurtes erreicht, da hier der Oberkörper durch den Schultergurt bzw. die obere Gurtbandbefestigung zurückgehalten wird.

10.5.4 Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Thorax (a_{3ms})

In [Abbildung 10.22](#) sind die Maximalwerte der resultierenden, translatorischen Brustbeschleunigung für die Varianten 1 bis 4 dargestellt.

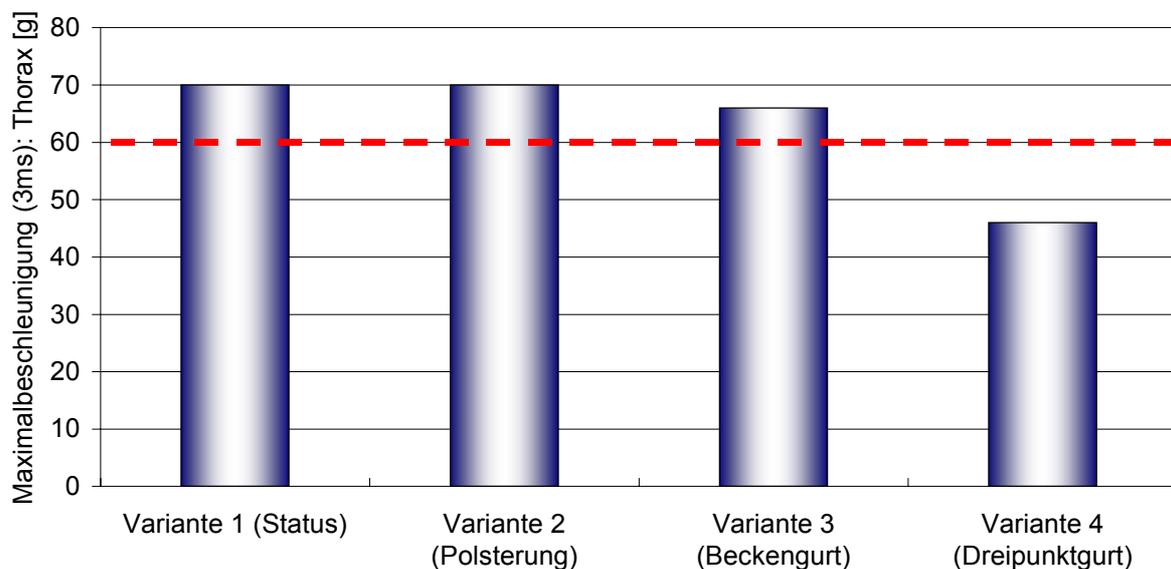


Abbildung 10.22: Vergleich der Maxima der resultierenden Brustbeschleunigung (a_{3ms} : Thorax)

Die als Grenzwert für die resultierende, translatorische Beschleunigung des Thorax definierte Schwelle von 60 g wird bei allen Varianten, außer bei Variante 4 (Verwendung eines Dreipunktgurtes) überschritten. Die Verwendung einer zusätzlichen Polsterung im Anprallbereich

des Beckens und eines Beckengurtes führt aufgrund der induzierten Drehbewegung des Oberkörpers einschließlich der Arme und anschließendem Anprall auf den Führerstandstisch nicht zu einer hinreichenden Reduzierung des Maximalwertes der Thoraxbeschleunigung. Erst die Rückhaltung des Oberkörpers durch den Schultergurt bzw. die obere Gurtbefestigung reduziert die Brustbeschleunigung unterhalb des zulässigen Grenzwertes.

10.5.5 Ermittlung der maximalen Beschleunigungswerte: Pelvis (a_{3ms})

In [Abbildung 10.23](#) sind die Maximalwerte der resultierenden, translatorischen Beckenbeschleunigung für die untersuchten Varianten dargestellt.

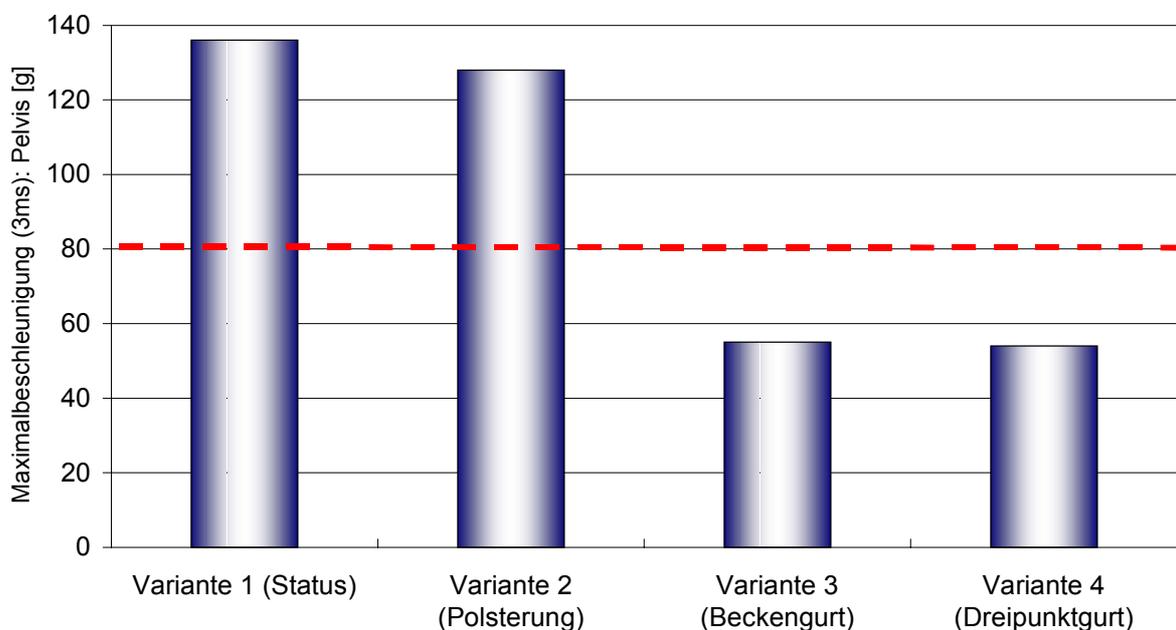


Abbildung 10.23: Vergleich der Maxima der resultierenden Beckenbeschleunigung (a_{3ms} : Pelvis)

Der als Schutzkriterium definierte zulässige Schwellwert von 80 g für die resultierende, translatorische Beschleunigung des Pelvis wird bei den Variante 1 (Statusvariante) und 2 (mit Polsterung) deutlich überschritten. Der große Maximalwert der Beckenbeschleunigungen bei diesen Varianten ist auf die Vorverlagerung des Insassen und die daraus resultierende große Relativgeschwindigkeit zwischen Führerstandsmodul und Insassen zum Zeitpunkt des Anpralls von Becken/Abdomen auf den Führerstandstisch zurückzuführen. Da nicht auszuschließen ist, dass die Krafteinleitung beim Anprall nicht nur über das Becken sondern auch über den Ab-

dominalbereich erfolgt, ist davon auszugehen, dass die daraus resultierenden Kontaktkräfte und die Flächenpressung zu einer unzulässigen Belastung der inneren Organe (Leber, Niere) und in der Folge zu schwersten intra-abdominalen Verletzungen (Rupturen und Lacerationen) führen. Die Verwendung einer zusätzlichen Polsterung im Becken-/Abdominalbereich (Variante 2) führt in diesem Fall nicht zu einer hinreichenden Reduzierung der Belastungen des Becken- und Abdominalbereiches.

Mit Hilfe eines Becken- oder Dreipunktgurtes mit Gurtkraftbegrenzung (Varianten 3 und 4) können die maximalen Beckenbeschleunigungen unterhalb des zulässigen Grenzwertes reduziert werden. Voraussetzung für die Minderung des Verletzungsrisikos im Becken-/ Abdominalbereich ist jedoch, dass die Gurtkräfte durch den stabilen Beckengürtel aufgenommen werden, da in den Abdominalbereich nur wesentlich kleinere Kräfte ohne erhöhtes Verletzungsrisiko eingeleitet werden können.

Wesentliche Bedingungen, die verhindern, dass der Beckengurt über die Beckenkämme in den Abdominalbereich rutscht bzw. das Becken unter das Gurtband taucht (sog. „Submarining“-Effekt), sind u. a.:

- höhere Steifigkeit der Sitzkissenpolsterung,
- geeignete Befestigungspunkte für die Beckengurtschlinge,
- Verwendung eines Gurtstraffers zur Eliminierung eines nicht straffen Gurtbandes und
- ordnungsgemäße Handhabung des Gurtes.

10.5.6 Ermittlung der resultierenden Maximalkräfte auf den Pelvis infolge des Anpralls auf den Führerstandstisch bzw. der wirkenden Gurtkräfte

Abbildung 10.24 zeigt einen Vergleich der beim Anprall auf den Führerstandstisch bzw. infolge der Gurtkräfte auf das Becken wirkenden Maximalkräfte.

Sehr große resultierende Beckenkräfte treten bei den Varianten 1 und 2 auf, bei denen kein Becken- bzw. Dreipunktgurt verwendet wird. Gegenüber der Statusvariante können die auf das Becken wirkenden Kräfte durch Verwendung einer zusätzlichen Polsterung im Bereich des Beckenanpralls signifikant, aber nicht hinreichend reduziert werden. Bei Verwendung eines Becken- bzw. Dreipunktgurtes mit Gurtkraftbegrenzung ist eine weitere deutliche Reduzierung der Beckenkräfte zu erzielen. Jedoch können die Ergebnisse nicht als zufriedenstellend bezeichnet werden, so dass hier weitere Untersuchungen hinsichtlich einer Optimierung des zu verwendeten Gurtsystems, ggf. unter Verwendung integrierter Energieabsorptionselemente, notwendig sind.

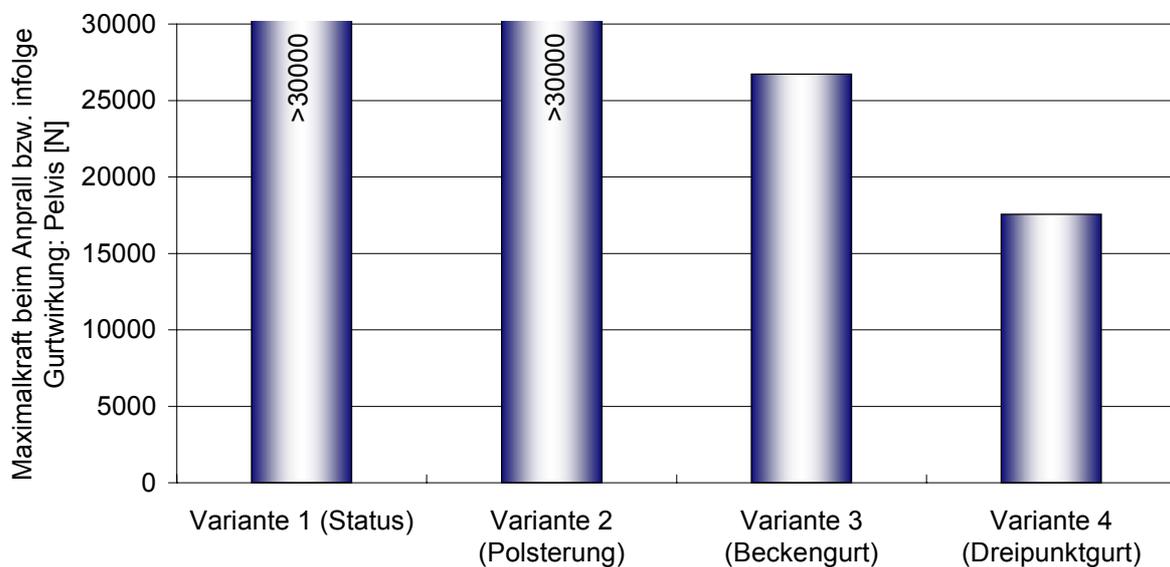


Abbildung 10.24: Vergleich der resultierenden Maximalkräfte beim Beckenanprall auf den Tisch

11 Zusammenfassung der Ergebnisse aus der rechnerischen Simulation zur Bewertung der Insassenbelastungen

Aus den Ergebnissen der rechnerischen Simulation zur Ermittlung der Belastungen der Fahrgäste und des Triebfahrzeugführers im Kollisionsfall unter verschiedenen Randbedingungen können folgende Erkenntnisse für unterschiedliche Sitzanordnungen (Reihenbestuhlung sowie vis-à-vis - Sitzanordnung ohne und mit Tisch) und geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Insassenbelastungen abgeleitet werden:

11.1 Ergebnisse aus den Insassensimulationsrechnungen für den Fahrgastbereich

11.1.1 Reihenbestuhlung

Bedingt durch den Knie- und Kopfanprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes und abhängig von der Verzögerungscharakteristik des Fahrzeuginterieurs treten bei der Reihenbestuhlung große Insassenbelastungen im Bereich der unteren Extremitäten sowie im Thorax- und Kopfbereich auf.

Der Anprall der Knie, Unter- und Oberschenkel auf die Struktur der Rückenlehne des Vordersitzes verursacht große Längsdruckkräfte im **Oberschenkelbereich**, wobei die damit verbundenen Beschleunigungen im **Beckenbereich** nicht den als Schutzkriterium definierten Grenzwert von 80 g überschreiten. Durch eine lokale Polsterung der Sitzrückenlehne mit einer Dicke von 30 mm und annähernd trapezförmiger Kraft-Weg-Kennung der Deformationscharakteristik im Bereich des Knieanpralls in Verbindung mit einer nachgiebigen Sitzlehne können die Oberschenkelkräfte hinreichend reduziert werden, dass das als Schutzkriterium definierte Belastungslevel von 10000 N auch bei größeren Fahrzeugverzögerungen entsprechend ECE-R80 eingehalten wird.

Die aus dem Anprall des Insassen auf den Vordersitz resultierende translatorische **Thoraxverzögerung** kann bereits durch eine lokale Polsterung im Bereich des Knie- und Kopfanpralls deutlich unterhalb des zulässigen Grenzwertes von 60 g reduziert werden. Eine zusätzli-

che Nachgiebigkeit der Rückenlehne führt zu einer weiteren Verringerung der auf den Thorax wirkenden Belastungen. Der SI-Schwellwert von 1.000 wird bei keiner Variante überschritten.

Problematisch erweist sich der Bereich des **Kopfanpralls** auf die vordere Sitzlehne. Auch bei Verwendung einer zusätzlichen Kopfstützen-Polsterung mit einer Dicke von 50 mm und annähernd trapezförmiger Kraft - Weg - Charakteristik der Deformation werden die zulässigen Grenzwerte des HIC₃₆ von 1.000 und der resultierenden translatorischen Kopfbeschleunigung von 80 g überschritten. Erst in Verbindung mit einer nachgiebigen Rückenlehne ist eine Reduzierung der Kopfbelastungen unterhalb der definierten Grenzwerte möglich.

Die Ergebnisse zeigen, **dass es bei Reihenbestuhlung grundsätzlich möglich ist, Fahrgast-sitze in Schienenfahrzeuge als Rückhaltesysteme zu gestalten**, um die aus dem Anprall auf den Vordersitz resultierenden Insassenbelastungen zu reduzieren, dass die biomechanischen Schutzkriterien für verschiedene Körperregionen eingehalten werden. Eine hinreichende Reduzierung der beim Anprall auf den Vordersitz auftretenden hohen Kopfbelastungen kann mit einer lokalen Polsterung mit einer Polsterdicke von bis zu 50 mm in Verbindung mit einer nachgiebigen Sitzlehne erzielt werden. Die aufgrund der notwendigen hohen Energieabsorptionsfähigkeit annähernd trapezförmige oder rechteckige Kraft - Weg - Charakteristik der Verformung ist z. B. mit Hilfe von hinterschäumten Lochblechen zu realisieren.

Die Gestaltung der Sitzlehne muss in Abhängigkeit der Beschleunigung-Zeit-Charakteristik des Fahrzeuges ("Crashpulses") abgestimmt werden. Große Fahrzeugverzögerungen bedingen zusätzliche Maßnahmen an der Gesamtstruktur des Sitzes, einschließlich der Sitzbefestigung, um die aus der Massenträgheit des Sitzes und dem Insassenaufprall resultierenden Kräfte aufnehmen zu können. Das **Energieabsorptionskonzept** (lokale Polsterungen, Sitzlehnenachgiebigkeit) ist zudem an die sich aus der Relativgeschwindigkeit von Fahrgast und Interieur beim Aufprall ergebenden Erfordernisse hinsichtlich der Einhaltung der biomechanischen Schutzkriterien anzupassen.

11.1.2 Abteilbestuhlung (vis-à-vis - Sitzanordnung) ohne Tisch

In Abhängigkeit von der Verzögerungscharakteristik des Fahrzeuginterieurs resultieren aus dem Anprall des Insassen auf die Vorderkante des gegenüberliegenden Sitzes bei vis-à-vis - Sitzanordnung ohne Tisch insbesondere hohe Belastungen der unteren Extremitäten und des Becken-/ Abdominalbereiches. Bedingt durch die Vorverlagerung des Insassen und der damit verbundenen großen Relativgeschwindigkeit zwischen Insasse und Interieur zum Zeitpunkt des Aufpralls, insbesondere bei großen Fahrzeugverzögerungen, treten hohe Beschleunigungsmaxima sowohl im Becken-/Abdominalbereich, als auch beim Kopfanprall auf die Sitzlehne des gegenüberliegenden Sitzes auf.

Die ermittelten Längsdruckkräfte in den **Oberschenkeln** und die resultierenden translatorischen **Beckenbeschleunigungen** überschreiten insbesondere bei großer Fahrzeugverzögerung und daraus resultierender Differenzgeschwindigkeit zwischen Fahrgast und Fahrzeugsitz beim Anprall die zulässigen Grenzwerte der biomechanischen Schutzkriterien. Besondere Bedeutung für die Insassenbelastungen besitzt deshalb der Knieanprall auf die Sitzstruktur der Vorderkante des gegenüberliegenden Sitzes. Eine Polsterung dieses Bereiches z. B. mit hintergeschäumten Deformationsblechen ist aus Komfortgründen nur eingeschränkt möglich, so dass diese Maßnahme bei großen Relativgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt des Anpralls selbst bei idealer trapezförmiger oder rechteckiger Kraft - Weg - Kennung der Verformung nicht zu einer hinreichenden Reduzierung der Oberschenkel- und Beckenbelastungen führt.

Die aus dem Anprall des Insassen auf den gegenüberliegenden Sitz resultierenden translatorischen Maxima der Beschleunigung des **Thorax** überschreiten bei keiner Variante den zulässigen Grenzwert von 60 g. Die berechneten SI-Werte liegen ebenfalls unterhalb des als Schutzkriterium definierten Schwellwertes von 1.000.

Neben den Oberschenkel- und Beckenbelastungen besitzt der **Kopfanprall** auf den gegenüberliegenden Sitz und die daraus resultierenden Kopfbeschleunigungen eine herausragende Bedeutung. Abhängig vom Verzögerungsverlauf des Fahrzeuginterieurs treten infolge des Kopfanpralls auf die Sitzstruktur große Beschleunigungsmaxima auf, die nicht durch zusätzliche Energieabsorptionselemente kompensiert werden können. Die zulässigen Grenzwerte des HIC_{36} von 1.000 und der resultierenden translatorischen Kopfbeschleunigung von 80 g wer-

den auch unter Berücksichtigung dieser Maßnahmen zumindest bei einem Verzögerungsverlauf des Fahrzeuginterieurs gemäß ECE-R 80 (obere Grenzkurve) überschritten.

Aufgrund der großen Vorverlagerung des Insassen bis zum Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz und der damit verbundenen Belastungen, insbesondere im Bereich der unteren Extremitäten und im Becken-/Abdominalbereich sowie aufgrund der auftretenden Kopfbeschleunigungen ist davon auszugehen, **dass bei vis-à-vis - Sitzanordnung ohne Tisch keine den biomechanischen Schutzkriterien genügende Rückhaltung des Insassen möglich ist.** Eine Polsterung der Sitzvorderkante und eine nachgiebige Gestaltung der Sitzlehne ist aus Komfortgründen und anderen Anforderungen an die Sitzstruktur (Vandalismus) nur in begrenztem Umfang möglich, so dass die dabei zu erzielende Energieabsorption nicht die große Relativgeschwindigkeit von Insassen und Fahrzeuginterieur zum Zeitpunkt des Sitzanpralls kompensieren kann.

11.1.3 Abteilbestuhlung (vis-à-vis - Sitzanordnung) mit Tisch

Innerhalb der Untersuchung der Insassenbelastungen bei vis-à-vis - Sitzanordnung mit Tisch sind insbesondere die zu erwartenden Belastungen im Becken-/Abdominalbereich infolge des Insassenanpralls auf den Tisch und die resultierenden Beschleunigungen aus dem Kopfanprall von Interesse. Da die Vorverlagerung des Insassen und die damit verbundene Relativgeschwindigkeit von Insasse und Interieur zum Zeitpunkt des Aufpralls durch die Anordnung eines Tisches zwischen den gegenüberliegenden Sitzen wesentlich reduziert werden kann, sind entsprechend geringere translatorische **Beckenbeschleunigungen** zu erwarten. Die Ergebnisse der Insassensimulationsrechnungen bestätigen diese Hypothese, wobei die resultierende Beschleunigung für den **Pelvis** in starkem Maße von der Tischbreite, der Gestaltung der Tischkante und vom Beschleunigung-Zeit-Verlauf des Fahrzeuginterieurs abhängig ist.

Um das Verletzungsrisiko der inneren Organe (Leber, Niere, Milz etc.) im **Abdominalbereich** gering zu halten, kommt der Höhe der Tischplatte über dem Fußboden und der Gestaltung der Tischkante eine besondere Bedeutung zu. Soweit es mit den Komfortanforderungen vereinbar ist, muss gewährleistet sein, dass die Krafteinleitung beim Tischenanprall des Insassen über den stabilen Beckengürtel erfolgt, da durch den Abdominalbereich nur geringe Kräfte

aufgenommen werden können (nach [36]: Belastungskraft für Niere und Leber: $F_{\max} = 500$ bis 1.700 N) und eine Überschreitung der zulässigen Flächenpressung (nach [36]: 35 N/cm²) zu erwarten ist. Problematisch ist dabei, dass unterschiedliche Körpergrößen zu berücksichtigen sind, die durch eine geeignete Gestaltung des Tisches abgedeckt werden müssen. Insbesondere bleibt zu prüfen, bis zu welcher Höhe die Tischplatte abgesenkt werden kann, ohne dass der Komfort in nicht vertretbarem Maße beeinträchtigt wird.

Unter Verwendung einer zusätzlichen Polsterung der Tischkante evtl. in Kombination mit einer begrenzten Nachgiebigkeit der Tischplatte (in Abhängigkeit von der Tisch- bzw. Tischplattenbefestigung) können die resultierenden **Beckenbeschleunigungen** reduziert werden, dass der als Schutzkriterium definierte Grenzwert von 80 g auch bei großer Fahrzeugverzögerung nicht überschritten wird.

Die aus dem Tischenprall des Insassen resultierenden translatorischen Maximalwerte der **Thorax-Beschleunigung** überschreiten bei keiner Variante den zulässigen Grenzwert von 60 g. Die berechneten SI-Werte liegen ebenfalls unterhalb des als Schutzkriterium definierten Schwellwertes von 1.000 .

Neben den Belastungen des Becken- und Abdominalbereiches sind der **Anprall des Kopfes** auf die Tischplatte und die daraus resultierenden Kopfbeschleunigungen für die Bewertung des Tisches als Rückhaltesystem von Bedeutung. Insbesondere bei großer Verzögerung des Fahrzeuginterieurs nach ECE-R 80 (obere Grenzkurve) treten infolge des Kopfanpralls auf die Tischplatte große Beschleunigungsmaxima auf, die durch eine zu optimierende Energieabsorptionsfähigkeit zu reduzieren sind. Unter der Voraussetzung einer annähernd trapezförmigen oder rechteckigen Deformationscharakteristik der Tischplatte in Verbindung mit einer relativ großen Initialkraft, um den Komfort- und Vandalismusanforderungen zu genügen, ist eine hinreichende Reduzierung der Kopfbelastungen möglich. Denkbar ist auch hier ein beschichtetes Deformationsblech, unter dem sich z. B. Aluminiumschaum mit sehr guten Energieabsorptionseigenschaften befindet.

Die zulässigen Grenzwerte des HIC_{36} von 1.000 und der resultierenden translatorischen **Kopfbeschleunigung** von 80 g werden unter Berücksichtigung dieser Maßnahme auch bei

anspruchsvollem Verzögerungsverlauf des Fahrzeuginterieurs gemäß ECE-R 80 (obere Grenzkurve) eingehalten.

Aus den Ergebnissen der Insassensimulationsrechnungen für die vis-à-vis - Sitzanordnung mit Tisch ist abzuleiten, **dass ein zwischen den Sitzen angeordneter Tisch als Rückhaltesystem geeignet ist, um den Anforderungen entsprechend der biomechanischen Schutzkriterien zu genügen.** Durch eine geeignete Gestaltung des Tisches und der Tischkantenhöhe in Verbindung mit einer energieabsorbierenden Tischplatte kann eine deutliche Reduzierung der Belastungen im Becken-/Abdominalbereich und des Kopfes erzielt werden.

Unter Berücksichtigung der Komfort- und Vandalismusanforderungen und in Abhängigkeit des Verzögerungsverlaufes des Fahrzeuges ("Crashpuls") ist die Gestaltung des Tisches und der Tisch- bzw. Tischplattenbefestigung abzustimmen. Um die aus der Massenträgheit des Tisches und dem Insassenanprall resultierenden Kräfte aufnehmen zu können, müssen gegebenenfalls zusätzliche Maßnahmen an der Tischbefestigung und ein optimiertes Energieabsorptionskonzept in Bezug auf den Insassenanprall (Pelvis/Abdomen, Kopf) Berücksichtigung finden, so dass die Grenzwerte der biomechanischen Belastungsgrößen eingehalten werden.

11.2 Ergebnisse aus den Insassensimulationsrechnungen für das Führerstandsmodul

Ausschlaggebend für die Bewertung der relevanten Belastungen, denen der Triebfahrzeugführer im Kollisionsfall ausgesetzt ist, sind die auf den Thorax und den Becken-/ Abdominalbereich wirkenden Beschleunigungen und Kräfte, die aus dem Anprall des Insassen auf den Führerstandstisch bzw. aus der Rückhaltung des Insassen durch den Gurt resultieren. Mit der Verwendung eines Beckengurtes sind außerdem höhere Kopfbeschleunigungen verbunden.

Bei vorgegebener Verzögerung des Führerstandsmoduls gewährleistet allein die Verwendung eines Dreipunktgurtes (Variante 4) die Einhaltung der Grenzwerte, die in der Kraftfahrzeugtechnik als Schutzkriterien verwendet werden. Hierbei ergibt sich aber zusätzlicher Optimierungsbedarf hinsichtlich der infolge Gurtkraftwirkung auftretenden Beckenbelastungen.

Ohne zusätzliches Rückhaltesystem verringert eine **Polsterung** im Aufprallbereich von **Abdomen/Pelvis** (Variante 2) zwar die Beckenbelastung, der zulässige Grenzwert für die resultierende Beckenbeschleunigung wird aber ebenso überschritten, wie der für die resultierende Brustbeschleunigung und den zugehörigen SI-Wert.

Der Anprall des Insassen auf den Führerstandstisch ist aufgrund der Vorverlagerung des Insassen und der damit verbundenen großen Relativgeschwindigkeit von Insasse und Interieur zum Zeitpunkt des Anpralls äußerst problematisch. Die hierbei auftretenden Kontaktkräfte stellen ein erhebliches Verletzungsrisiko für die inneren Organe (Leber, Niere, Milz etc.) des **Abdominalbereiches** dar, da nicht sichergestellt werden kann, dass die Krafteinleitung beim Tischenprall über den stabilen Beckengürtel erfolgt. Wie weiter oben bereits ausgeführt (Abschnitt 11.1.3), können durch den Abdominalbereich nur geringe Kräfte aufgenommen werden, so dass insbesondere bei höherer Relativgeschwindigkeit von Insasse und Führerstandsmodul zum Zeitpunkt des Anpralls eine Überschreitung der zulässigen Kräfte und der Flächenpressung bezogen auf die Bauchdecke und die inneren Organe zu erwarten ist.

Das auf den **Abdominal-/Beckenbereich** wirkende Beschleunigungsmaximum kann durch die Verwendung eines **Beckengurtes mit Gurtkraftbegrenzung** (Variante 3) gegenüber Variante 2 weiter reduziert werden. Unter der Voraussetzung einer ordnungsgemäßen Handhabung des Gurtes und zusätzlicher Maßnahmen aus der Kraftfahrzeugtechnik zur Vermeidung des "Submarining"-Effektes (hinreichende Steifigkeit des Sitzpolsters, Verwendung eines Gurtstraffers, Deformationsrohr im Bereich der Sitzvorderkante etc.) kann weitestgehend sichergestellt werden, dass die Gurtkräfte durch das Becken aufgenommen werden. Damit ist eine wesentliche Verminderung des Verletzungsrisikos für den Abdominalbereich verbunden. Demgegenüber werden bei Variante 3 die zulässigen Grenzwerte von 80 g für die resultierende **Kopfbeschleunigung** und 60 g für die resultierende **Brustbeschleunigung** infolge der Drehbewegung des Oberkörpers und des nachfolgenden Anpralls auf den Führerstandstisch überschritten.

Die Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der Insassenbelastungen bei Verwendung eines **Dreipunktgurtes mit Gurtkraftbegrenzung** (Variante 4) zeigen, dass die resultierende **Brustbeschleunigung** in der Weise verringert werden kann, dass der zulässige Grenzwert von

60 g nicht überschritten wird. Auch das Maximum der resultierenden **Kopfbeschleunigung** liegt unterhalb des zulässigen Schwellwertes von 80 g.

Aus den Insassensimulationsergebnissen für das Führerstandsmodul ist abzuleiten, dass ein **Rückhaltesystem in Form eines Dreipunktgurtes mit Gurtkraftbegrenzung als Mindestanforderung an ein Schutzsystem für den Triebfahrzeugführer anzusehen ist**. Zu berücksichtigen sind dabei der für die Insassensimulationsrechnungen verwendete Beschleunigungs-Zeit-Verlauf und die Gestaltung des Führerstandsmoduls (Fahrsitz, Führerstandstisch etc.), die unmittelbaren Einfluss auf die Vorverlagerung des Insassen und die resultierende Relativgeschwindigkeit von Insassen und Führerstandsmodul haben. Allein mit einem zusätzlichen Rückhaltesystem kann realisiert werden, dass der Insasse frühestmöglich zusammen mit dem Führerstandsmodul verzögert, so dass die relevanten Schutzkriterien aus dem Kraftfahrzeugbereich eingehalten werden. Gegebenenfalls ist der Einsatz eines Dreipunktgurtes durch zusätzliche Maßnahmen, bspw. eine Gurtkraftbegrenzung mittels Integration eines Deformationselementes in das Gurtsystem zu ergänzen.

12 Zusammenfassung und Ausblick

Der Schienenverkehr bietet ein systemimmanent großes Potential an aktiver Sicherheit, das es gilt, noch effizienter zu nutzen. Ergänzend zur aktiven Sicherheit sind Maßnahmen der passiven Sicherheit sinnvoll, um das Unfallrisiko weiter zu reduzieren.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, grundlegende Zusammenhänge sowie Möglichkeiten und Grenzen hinsichtlich eines verbesserten Insassenschutzes im Kollisionsfall in Fahrzeugen des Schienenfernverkehrs darzustellen. Insbesondere wird der Einfluss der Fahrzeug - Verzögerungscharakteristik im Crashfall und der Einsatz von Schutzsystemen auf die Insassenbelastungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Sitzkonfigurationen im Fahrgastraum untersucht. Dabei werden sowohl in die vorhandenen Inneneinrichtungskomponenten integrierbare Schutzsysteme (z. B. lokale Polsterung) berücksichtigt, als auch Rückhaltesysteme, die in der Kraftfahrzeugsicherheit Stand der Technik sind (z. B. Dreipunktgurt mit Kraftbegrenzung). Die Ergebnisse der Arbeit sollen dazu beitragen, ein integriertes Sicherheitskonzept für Kollisionen von Schienenfahrzeugen zu entwickeln.

Eine Auswertung der vom Statistischen Bundesamt in Deutschland erfassten Schienen- und Straßenverkehrsunfälle und der lang- und mittelfristige Vergleich spezifischer Unfallkennzahlen zeigen, dass die Unfallsicherheit im Straßenverkehr deutlich verbessert werden konnte. Wird die Zahl der Verkehrstoten in Relation zu der Zahl der Unfälle mit Personenschaden gesetzt, weist der Straßenverkehr in den zurückliegenden Jahren teilweise sogar eine höhere Sicherheit auf.

Unter den Kollisionsereignissen, die innerhalb einer Analyse von Bahnbetriebsunfällen im Zeitraum von 1991 bis 1995 erfasst wurden, besitzt die Kategorie "Zusammenstoß von Schienenfahrzeugen" sowohl bei den getöteten, als auch bei den verletzten Reisenden und Bahnbediensteten eine herausragende Bedeutung. Die durchgeführte Risikoklassifikation der ausgewählten Bahnbetriebsunfälle bestätigt diese Aussage: Der Risikoklassifikationsmatrix für die Ereignisart "Zusammenstoß" zufolge sind 40 % der Schienenfahrzeugkollisionen als "unerwünschtes" Risiko zu klassifizieren. Der hohe Anteil der in die Kategorien "katastrophal" und

"kritisch" einzuordnenden Personenschäden rechtfertigt Maßnahmen der passiven Sicherheit, um den Insassenschutz zu verbessern.

Als Bewertungsgrundlage für Maßnahmen im Innenbereich können die in der Kraftfahrzeugsicherheit geltenden biomechanischen Toleranzgrenzen und Schutzkriterien verwendet werden. Sie lassen Aussagen hinsichtlich der beim Insassenanprall auftretenden Belastungen der relevanten Körperteile wie Kopf, Thorax, Becken und Oberschenkel zu. Zusätzlich können bspw. für die Reihenbestuhlung in Schienenfahrzeugen auch Erkenntnisse aus der Sicherheit gegen Frontalaufprall von Kraftomnibussen genutzt werden. Die Ergebnisse von Untersuchungen zeigen, dass das Sitzteilermaß einen erheblichen Einfluss auf die Insassenbelastungen, insbesondere auf die resultierenden Kopfverzögerungsmaxima hat.

Ein Vergleich der in der Kraftfahrzeugsicherheit angewandten Verfahren zur Verifikation von passiven Sicherheitsmaßnahmen zeigt, dass die dort durchgeführten umfangreichen experimentellen Verfahren in Form von Crashtests nicht oder nur sehr beschränkt auf Schienenfahrzeuge übertragbar sind. Die in der Vergangenheit durchgeführten Fullscale - Crashversuche werden in der Schienenfahrzeugtechnik Einzelfälle bleiben. Der Nachweis der Kollisionssicherheit wird sich auf die rechnerische Simulation (FEM und MKS), ergänzt durch experimentelle Verfahren (Komponententests), konzentrieren.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird die rechnerische Simulation mit Hilfe von MKS - Modellen als Methode zur Verbesserung des Insassenschutzes in Schienenfahrzeugen verwendet. Die durchgeführten Untersuchungen beschränken sich dabei auf das Kollisionsszenario "Frontalzusammenstoß" bzw. "Frontalaufprall". Als Verzögerungscharakteristik für die Inneneinrichtung werden zum einen Grenzkurven als synthetische Beschleunigung-Zeit-Charakteristiken entsprechend der Prüfung von Fahrgastsitzen in Kraftomnibussen nach ECE-R 80 verwendet. Zum anderen sind den Untersuchungen Verzögerungscharakteristiken als Ergebnis rechnerischer Simulation zugrunde gelegt, die den Einfluss von fahrzeugseitigen Energieabsorptionseinrichtungen berücksichtigen.

Zur Ermittlung der Insassenbelastungen in Abhängigkeit von der Sitzkonfiguration im Fahrgastbereich werden die Reihenbestuhlung sowie die vis-à-vis - Bestuhlung mit und ohne Tisch

untersucht. Die Belastungen des Triebfahrzeugführers sind unter Verwendung eines repräsentativen Führerstandsmoduls ermittelt worden.

Für die **Reihenbestuhlung** zeigen die Simulationsergebnisse, dass mit Hilfe einer energieabsorbierenden Rückenlehne unter Verwendung von lokalen Polsterungen im Bereich des Kopf- und Knieanpralls Fahrgastsitze in Schienenfahrzeuge gezielt als Rückhaltesysteme genutzt werden können, um die Insassenbelastungen zu reduzieren.

Bei der **vis-à-vis - Sitzanordnung ohne Tisch** ist ein hinreichender Schutz des Fahrgastes beim Anprall auf die Inneneinrichtung mit lokalen Polsterungen nicht zu erzielen. Die große Insassenvorverlagerung führt zu unzulässig hohen Belastungen, insbesondere der unteren Extremitäten und des Becken-/Abdominalbereiches sowie des Kopfes. Die biomechanischen Schutzkriterien werden auch bei Integration von Energieabsorptionselementen in die Sitzstruktur überschritten.

Mit Hilfe eines zwischen den Sitzen angeordneten Tisches können bei der **vis-à-vis - Sitzanordnung mit Tisch** die Insassenbelastungen derart reduziert werden, dass die Grenzwerte der biomechanischen Schutzkriterien eingehalten werden. Die Integration von energieabsorbierenden Strukturen führt zu einer signifikanten Reduzierung der Belastungen des Becken- und Abdominalbereiches und des Kopfes. Hinsichtlich unterschiedlicher Körpergrößen sind Tisch- und Tischplattengeometrie zu optimieren. Hier besteht zusätzlicher Untersuchungsbedarf.

Die Ergebnisse der Insassensimulationsrechnungen für das **Führerstandsmodul** zeigen, dass unter Berücksichtigung der Fahrzeugcharakteristik ein hinreichender Schutz des Triebfahrzeugführers nur mit Hilfe eines Dreipunktgurtes mit Gurtkraftbegrenzung gegeben ist. Der Einsatz eines derartigen Rückhaltesystems begrenzt die Vorverlagerung des Insassen und damit auch die resultierenden Belastungen, insbesondere des Kopfes und des Becken- und Abdominalbereiches.

Das Thema "Insassenschutz bei Kollisionen von Schienenfahrzeugen des Personenfernverkehrs" kann durch die vorliegende Arbeit sicherlich nicht erschöpfend behandelt werden. Auf diesem Gebiet besteht noch erheblicher Forschungsbedarf sowohl hinsichtlich der Fahrgastsicherheit als auch der Sicherheit des Triebfahrzeugführers.

Grundsätzlich bedürfen die mit Hilfe der rechnerischen Simulation gewonnenen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit einer Verifikation und Validation durch experimentelle Verfahren (z. B. Schlittentests). Zukünftig sollten anerkannte numerische Simulationsverfahren und Versuche als Basis für eine international einheitliche Methodik hinsichtlich verifizierbarer Kriterien in Bezug auf die Insassensicherheit im Kollisionsfall dienen.

Das Ziel, durch geeignete Maßnahmen die Fahrgastsicherheit bei Kollisionen zu erhöhen, darf nicht zu einem Attraktivitätsverlust des Verkehrsträgers "Schiene" führen. Eine Einschränkung des Komforts und der Mobilität beim Reisen mit der Bahn wird von den Fahrgästen nicht akzeptiert. Maßnahmen des Insassenschutzes im Innenbereich müssen deshalb in die bestehenden Inneneinrichtungskomponenten integriert werden. Der Einsatz von Becken- oder Dreipunktgurten ist als problematisch anzusehen, selbst wenn ein Großteil der Fahrgäste aufgrund anderer Verkehrsmittel (Auto, Flugzeug, Bus) an das Rückhaltesystem „Gurt“ derart gewöhnt ist, dass es nicht mehr als störend empfunden wird.

Ein integriertes Sicherheitskonzept zur Verbesserung des Insassenschutzes bei Kollisionen muss neben hinreichender Fahrzeugstrukturfestigkeit und gezielter Energieabsorption zur Gewährleistung relevanter Schutzbereiche als „Überlebensräume“ für Fahrgäste und Triebfahrzeugführer auch zwingend Maßnahmen in den Innenbereichen zur Reduzierung der Insassenbelastungen beim Anprall auf die Inneneinrichtung berücksichtigen. Das Interieur ist deshalb bei der crashgerechten Gestaltung von Schienenfahrzeugen und ihrer Verifikation und Validation hinsichtlich Fahrgastsicherheit im Kollisionsfall einzubeziehen.

Die Implementierung von Sitzen und Tischen im Fahrgastbereich in das Energieabsorptionsmanagement des Gesamtsystems Fahrzeug bietet die Chance, sowohl technisch als auch wirtschaftlich realisierbare Lösungen zur Verbesserung der Crashesicherheit von Schienenfahrzeugen einzuführen. Dabei sind die aus dem Insassenanprall/–rückhalt resultierenden Festigkeits-

anforderungen zu beachten. Für die Umsetzung von Energieabsorptionskonzepten (lokale Polsterungen, Tisch als Rückhaltesystem) sind zudem weiterführende Untersuchungen hinsichtlich konstruktiver Gestaltung, zu verwendender Werkstoffe, Einhaltung der Prüf- und Zulassungskriterien usw. notwendig.

Die Verbesserung der passiven Sicherheit von Schienenfahrzeugen in Form eines integrativen Sicherheitskonzeptes sollte insbesondere bei Fahrzeugneuentwicklungen berücksichtigt werden. Für eine mittelfristige Umsetzung von Maßnahmen im Innenbereich bietet es sich an, die Modernisierung von Altfahrzeugen zu nutzen, die im Sinne der Attraktivitätssteigerung in der Regel mit einer kompletten Neugestaltung des Interieurs verbunden ist. Voraussetzung hierfür ist, dass durch die Zulieferindustrie Inneneinrichtungskomponenten unter Berücksichtigung des Fahrgastsschutzes entwickelt werden.

Diese Entwicklung wird bisher gehemmt durch die sich aus Brandschutz, Vandalismusresistenz, Reinigung etc. ergebenden Anforderungen seitens des Gesetzgebers und der Betreiber sowie die hierzu bestehenden Prüfvorschriften. Das Argument eines im Kollisionsfall verbesserten Fahrgastsschutzes auf hohem Niveau als Wettbewerbskriterium und die diesbezüglich zu erwartenden europäischen Normen und Richtlinien sollten jedoch zu einer Beschleunigung der sicherheitsorientierten Entwicklung von Inneneinrichtungskomponenten beitragen.

Die Verwendung eines Dreipunktgurtes für das Führerstandsmodul steht im Widerspruch zur bisherigen Sicherheitsphilosophie der Bahn, dem Triebfahrzeugführer als alleinige Schutzmaßnahme den "Fluchtweg nach hinten" zu bieten. Doch gerade bei neuen Schienenfahrzeugen mit veränderter Gestaltung des Führerstandes oder fehlendem rückwärtigem "Schutzraum" ist diese Möglichkeit nicht mehr gegeben, so dass sich Probleme bei der Fahrzeugzulassung ergeben können. Hier sind Maßnahmen des Insassenschutzes gefordert, die auf bewährte Rückhaltesysteme der Kraftfahrzeugsicherheit zurückgreifen. Dazu besteht zusätzlicher Untersuchungsbedarf hinsichtlich des Einsatzes eines Airbag - Moduls, um die Belastungen beim Kopfanprall zu reduzieren.

13 Literaturverzeichnis

- [1] Gassebner, L. "Schutzvorrichtungen an Straßenbahnwagen" Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 49 (1894), S.57-58.
- [2] Taschinger, O. "Festigkeits- und Zerstörungsversuche an Wagenkästen" Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 94 (1939) 20, S. 385-397 und 21, S. 403-418
- [3] N.N. "Lastannahmen und Sicherheitsfaktoren für Schienenfahrzeuge" Forschungskreis 1 der Studiengesellschaft "Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge", 2. Auflage (1970)
- [4] Merkblatt UIC-Kodex "Beanspruchungen von Reisezugwagenkästen und deren Anbauteilen" Internationaler Eisenbahnverband UIC, Merkblatt 566VE (1990)
- [5] N. N. Bahnanwendungen: „Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen“ Deutsche Fassung EN 12663, Ausgabe: Oktober 2000
- [6] Bugarcic, H.; Geers, L.; Meyer-Plate, E. "Empfehlungen für die Festigkeitsauslegung von Personenzugwagen nach BOStrab" Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) Schriftenreihe, Nr. 152 (1992)
- [7] Bugarcic, H.; Schneider, F.-M. "Ansätze zur Überarbeitung der Lastannahmen für die Festigkeitsauslegung von Schienenfahrzeugen des BOStrab-Bereiches" DET + ZEV Glasers Annalen 107 (1983) 10, S. 337 - 343
- [8] Bugarcic, H.; Schneider, F.-M. "Beitrag zur Überarbeitung der den Pufferstoß betreffenden Lastannahmen und Konstruktionsgrundsätze für Stadtverkehrs-Schienenfahrzeuge" Verkehr und Technik (1984) 8, S. 283 - 290
- [9] Schneider, F.-M. "Beitrag zur einfachen Bestimmung und Minimierung der den Pufferstoß betreffenden Wagenkasten-Abnahmeprüfkräfte bei Stadtverkehrs-Schienenfahrzeugen" Dissertation (1984) Institut für Straßen- und Schienenverkehr, TU Berlin
- [10] Bugarcic, H.; Müller, Jörg "Konstruktive Umsetzung der den Pufferstoß betreffenden Untersuchungsergebnisse auf Stadtverkehrs-Schienenfahrzeuge am Beispiel des S-Bahn-Triebwagens Berlin" Abschlußbericht 1988 zum BMFT - Projekt, Institut für Straßen- und Schienenverkehr (ISS), TU Berlin

- [11] Kühnel, A. "Vom Prototyp zur Serie - S-Bahn Berlin ET 480" ETR 39 (1990) 10, S. 599-603
- [12] Kurz., H. "Die Technischen Spezifikationen der Interoperabilität (TSI) - neue Anforderungen an die Hochgeschwindigkeitszüge der Zukunft" Vortrag auf der Tagung der DMG, Bezirksgruppe Berlin am 28.04.1997 in Berlin
- [13] Hecht, M.;
Sohr, S. "Passive Safety for passenger vehicles, reasons, criteria, objectives" 14th International Conference "Current problems in rail vehicles" (1999) in Zilina (Slowakei), S. 159-165
- [14] Kramer, R. "Neue S-Bahn-Züge für Berlin" Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 35 (1986) 7/8, S: 521-530
- [15] Müller, F. "Herstellung von Schienenfahrzeugen" Gl. Ann. 123 (1999) 1, S. 9-15
- [16] Hertel, J.;
Goerres, P. "Neuzeitliche Untersuchungen zum Verformungsverhalten von Konstruktionselementen in Eisenbahnfahrzeugen" Gl. Ann. 114 (1990) 11/12, S. 429-434
- [17] Lacôte, F. "Die dritte Generation der Hochgeschwindigkeitszüge der Französischen Staatsbahnen - der zweistöckige TGV" Gl. Ann. 116 (1992) 8/9, S. 249-259
- [18] Cléon, L.-M. "Résistance passive application au TGV 2N" Revue générale des chemins de fer (1993) 11, S. 45-57
- [19] Kurz, H. "ICE3 und ICE-T — Neue Triebwagengeneration für die Deutsche Bahn" ETR 48 (1999) 9, S. 549-559
- [20] Schneider, S.;
Staub, J. "Kombiniertes Puffer- und Deformationselement für Schienenfahrzeuge" Sonderdruck aus Gl. Ann. 9/1999
- [21] Hecht, M. et. al. Taschenbuch für den Maschinenbau / Dubbel, Abschnitt Schienenfahrzeuge. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 20. Auflage 2001, S. Q 76
- [22] Appel, H. "Biomechanik und Kraftfahrzeugsicherheit" Skript zur gleichnamigen Vorlesung (WS 1991/92), Institut für Straßen- und Schienenverkehr (ISS), TU Berlin
- [23] Weigel, E.;
et. Al. "Analyse von Bahnbetriebsunfällen auf der Grundlage der Bahnbetriebsunfallstatistik von DR, DB und DB AG" Bericht 1996 Institut für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr, TU Dresden

- [24] Kratz, G. "Umweltfreundliche Fahrzeuge für den Fernverkehr der Bahn - Veränderung des Modal Split der Verkehrsträger" Gl. Ann. 123 (1999) 3, S. 93-99
- [25] N. N. Verkehr in Zahlen 15. Jahrgang (1986), Deutscher Verkehrsverlag GmbH, Hamburg
- [26] N. N. Verkehr in Zahlen 29. Jahrgang (2000), Deutscher Verkehrsverlag GmbH, Hamburg
- [27] N. N. Statistisches Jahrbuch 1968, Hrsg.: Statistisches Bundesamt Deutschland (Wiesbaden)
- [28] N. N. Statistisches Jahrbuch 1978, Hrsg.: Statistisches Bundesamt Deutschland (Wiesbaden)
- [29] N. N. Statistisches Jahrbuch 1988, Hrsg.: Statistisches Bundesamt Deutschland (Wiesbaden)
- [30] N. N. Statistisches Jahrbuch 1998, Hrsg.: Statistisches Bundesamt Deutschland (Wiesbaden)
- [31] N. N. Online-Zeitreihenservice des Statistischen Bundesamtes, Deutschland (Wiesbaden) für die Jahre 1965 bis 1999 (<http://www.statistik-bund.de>)
- [32] N. N. Bahnanwendungen: „Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (RAMS)“ Deutsche Fassung EN 50126, Ausgabe: März 2000
- [33] N. N. Statistische Jahressammlungen 1991 bis 1998 (Reihe 88: Eisenbahnverkehr) Abschnitt 6: Bahnbetriebsunfälle mit Personenschäden und dabei Verunglückte, Hrsg.: Statistisches Bundesamt Deutschland (Wiesbaden)
- [34] Voß, G.; Füser, S. "Zusammenstoß von Fahrzeugen unterschiedlicher Festigkeit" Gl. Ann. 121 (1997) 10, S. 538-548
- [35] Füser, S. Voß, G. "Zulassung von Leichttriebwagen" ETR 49 (2000) 5, S. 286-294
- [36] Kramer, F. "Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen" Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH Braunschweig/Wiesbaden 1. Auflage 1998
- [37] N. N. "Occupant Protection in Interior Impact" Federal Motor Vehicle Safety Standards, USA (FMVSS) Standard Nr. 201 (1998)

- [38] N. N. "Impact Protection for the Driver from the Steering Control System" Federal Motor Vehicle Safety Standards, USA (FMVSS) Standard Nr. 203 (1971)
- [39] N. N. "Occupant Crash Protection" Federal Motor Vehicle Safety Standards, USA (FMVSS) Standard Nr. 208 (2000)
- [40] N. N. Richtlinie 74/60/EWG des Rates vom 17. Dezember 1973 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Innenausstattung der Kraftfahrzeuge (Teile im Insassenraum, Rückenlehne und hinterer Teil der Sitze)
- [41] N. N. Richtlinie 74/297/EWG des Rates vom 4. Juni 1974 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Innenausstattung von Kraftfahrzeugen (Verhalten der Lenkanlage bei Unfallstößen)
- [42] N. N. Richtlinie 78/932/EWG des Rates vom 16. Oktober 1978 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Kopfstützen für Sitze von Kraftfahrzeugen
- [43] N. N. "Verordnung zur Neufassung der ECE-Regelung Nr. 17 über einheitliche Vorschriften für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit der Sitze und ihrer Verankerungen sowie der Eigenschaften der für diese Sitze vorgeschriebenen Kopfstützen" Bundesgesetzblatt BGBl. II 1992 S. 279
- [44] N. N. "Einheitliche Vorschriften für die Genehmigung der Sitze von Kraftomnibussen [Gesellschaftswagen, Omnibussen] sowie dieser Fahrzeuge hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit der Sitze und ihrer Verankerung" ECE - Regelung Nr. 80 (1990)
- [45] Kramer, F. "Schutzkriterien für den Fahrzeug-Insassen im Falle sagittaler Belastung" Dissertation an der TU Berlin (1989) Fortschritt-Berichte, VDI-Reihe 12, Nr. 137
- [46] Rüter, G. "Wie wirksam sind Sicherheitsgurte für LKW und Busse?" TÜ - Technische Überwachung, Sicherheit und Zuverlässigkeit 23 (1982) 5, S. 186-188
- [47] Krüger, H. J. "Prüfverfahren für Kraftomnibus-Fahrgastsitze als Rückhaltesysteme" Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik. VDI-Verlag Düsseldorf (1984), Heft 287

- [48] Rompe, K. "Aspekte zur Verbesserung der Sicherheit von Omnibussen" Der Nahverkehr 4 (1986) 6, S. 28 - 33
Krüger, H.-J.
- [49] Krüger, H. J. "Insassenschutz und Sitzfestigkeit bei Omnibussen" Kolloquium "Unfallschutz der Fahrzeuginsassen in Europa " in Köln - Poll (1988), Verlag TÜV - Rheinland GmbH Köln
- [50] N. N. "Unfallschutz der Fahrzeuginsassen in Europa" Kolloquium des Inst. für Verkehrssicherheit in Köln (1988), Verlag TÜV Rheinland GmbH
- [51] N. N. "Designing-in coach seat belts for impact-protection" Automotive Engineer 16 (1991) 2, S. 37-38
- [52] Krüger, H. J. "Sicherheitstechnische Anforderungen an die Bestuhlung moderner Reisebusse als Rückhaltesysteme" Bericht 1991 zum Projekt 1.8710 des Bundesministers für Verkehr, Institut für Verkehrssicherheit, TÜV Rheinland GmbH, Köln
- [53] Rüter, G. "Optimierung von Bus-Fahrgastsitzen als Rückhaltesystem bei Frontalaufprall-Unfällen" Forschungsbericht 1995 Fachbereich Maschinenbau/Fahrzeugtechnik, FH Trier
- [54] Appel, H. et. al. "Anforderungen an Gurte in Reisebussen" Abschlußbericht 1995 zum FAT - Projekt, Institut für Straßen- und Schienenverkehr (ISS), TU Berlin
- [55] N. N. "Einheitliche Vorschriften für die Genehmigung von Kraftomnibussen hinsichtlich der Festigkeit ihres Aufbaus" Economic Commission for Europe (ECE) - Regelung Nr. 66 (1988)
- [56] N. N. Richtlinie 96/37/EG der Kommission vom 17. Juni 1996 zur Anpassung der Richtlinie 74/408/EWG des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Innenausstattung der Kraftfahrzeuge (Widerstandsfähigkeit der Sitze und ihrer Verankerung)
- [57] N. N. "Neuer Reisebus von Mercedes-Benz" Die Nahverkehrs-Praxis (1990) 9, S. 331-332
- [58] Rieck, G. "Aktive und passive Sicherheit des neuen MAN Fernreisebusses FRH 422" Automobiltechnische Zeitschrift - ATZ 96 (1994) 1, S. 8-17
- [59] Lee, H. R.; Bartha, E. "Neuer Sicherheitsstandard im Reisebus" ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 98 (1996) 12, S. 672-675

- [60] N. N. "Grundlagen für die Konstruktion und Prüfung von Fahrgastsitzen in Schienenfahrzeugen" Deutsche Bahn AG, FGT 452, Minden (aktualisierter Stand vom 08.06.1994)
- [61] N. N. "Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge hinsichtlich des Schutzes der Insassen bei einem Frontalaufprall" ECE - Regelung Nr. 94 (1998)
- [62] N. N. "Side Impact Protection" FMVSS Standard Nr. 214 (1998)
- [63] N. N. "Verordnung zur Revision 1 der ECE-Regelung Nr. 48 über einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen" Bundesgesetzblatt BGBI. II 1995 S. 899
- [64] N. N. "Fuel System Integrity" Federal Motor Vehicle Safety Standards, USA (FMVSS) Standard Nr. 301 (1975)
- [65] N. N. "Dynamische Festigkeit der Führerstandskabine gegenüber Frontalstößen: Ergebnisse der Aufprallversuche und Vergleich mit den Vorhersagen" Bericht B 165/RP 10 (1991) ORE, Utrecht
- [66] Lewis, J. H. "Development of a structural specification for crashworthy rail vehicles" ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (1995) AMD-Vol. 210, San Franzisko (USA), S: 17-34
- [67] N. N. "Collision test demonstrates crumple zone design" Railway Gazette International (1994) 4, S. 211
- [68] Hérisse, P. "Récit d'une collision programmée" La vie du rail Nr. 2433 (Februar 1994), S. 6-7
- [69] N. N. "Succès complet de collision expérimentale sur TGV 2N" Revue générale des chemins de fer (1994) 4, S. 41-43
- [70] Lacôte, F. "Die Aufprallsicherheit von Eisenbahnfahrzeugen" Gl. Ann. 119 (1995) 9/10, S. 300-309
- [71] Mouly, B. "Vers la fin des crash-tests?" Sécurité (Oktober 1997), S. 6-8
- [72] Huss, P. "Passive safety on DMU TER X73500" Proceedings of the Symposium "Passive safety of rail vehicles" (1999) an der TU Berlin

- [73] Scharf, S.
Marek, H. "Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen - Erfahrungen bei der Entwicklung und Erprobung kollisionsgerechter Fahrzeugstrukturen" Gl. Ann. 121 (1997) 12, S. 604-612
- [74] Erdmann, M. "Entwicklung crashoptimierter Grundmodule für die Tragstruktur in Wagenkästen von Schienenfahrzeugen" Studienarbeit 1996 am Fachgebiet Schienenfahrzeuge, TU Berlin
- [75] Tyrell, D.,
Severson, K. "Crashworthiness Testing of Amtrak's Traditional Coach Seat" Final Report "Safety of High-Speed Ground Transportation Systems" (1996) U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration
- [76] N. N. "Safer seats" Railway Gazette International (2000) 2, S. 280
- [77] N. N. Homepage des Transportation Technology Center Inc. (TTCI), Pueblo (USA) Stand: Mai 2000
- [78] Knothe, K.
Wessels, H. "Finite Elemente - Eine Einführung für Ingenieure" Springer Berlin, 3. Auflage 1999
- [79] N.N. Ergebnis einer Crashsimulation der Fa. ALUSUISSE, Neuhausen (Schweiz), 1999
- [80] N. N. Konstruktionszeichnung für das Führerstandsmodul und Ergebnis einer Crashsimulation für den Führerstandsbereich der Fa. Bombardier Transportation, Berlin, 1999
- [81] N. N. "Using ADAMS/View Function Builder" Dokumentation ADAMS® Version 9 (1997), Mechanical Dynamics, Inc., S. 141-143
- [82] Dittert, Hans J. "Konstruktion von Sitzen für Reisezug- und Triebwagen" Der Eisenbahningenieur 35 (1984) 4, S. 183-189 und 6, S. 299-308

14 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Entwicklung crashfähiger Fahrzeugkonzepte auf der Grundlage einer Grenzbetrachtung	13
Abbildung 3.1:	Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf das Verkehrsaufkommen (Mrd. Beförderte Personen) [25] S. 172; [26] S. 209; [27] S. 366; [28] S. 286; [29] S. 314; [30] S. 325.....	20
Abbildung 3.2:	Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf die Verkehrsleistung (Mrd. Personenkilometer) [25] S. 174; [26] S. 211; [27] S. 366; [28] S. 286; [29] S. 314; [30] S. 325.....	20
Abbildung 3.3:	Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf die Zahl der Unfälle mit Personenschaden [27] S. 366; [28] S. 286; [29] S. 314; [30] S. 325.....	21
Abbildung 3.4:	Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf die Gesamtanzahl an Fahrzeugen (Tausend Fahrzeuge) [27] S. 366; [28] S. 286; [29] S. 314; [30] S. 325; [31].....	23
Abbildung 3.5:	Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf das Verkehrsaufkommen (Mrd. Beförderte Personen) [26] S.209; [30] S. 325; [31].....	24
Abbildung 3.6:	Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr bezogen auf die Verkehrsleistung (Mrd. Personenkilometer) [26] S.211; [30] S. 325; [31].....	25
Abbildung 3.7:	Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr (Schienenverkehr: nur Reisende!) bezogen auf die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden [30] S. 325; [31].....	26
Abbildung 3.8:	Verkehrstote im Straßen- und Schienenverkehr (Schienenverkehr: nur Reisende!) bezogen auf die Gesamtanzahl an Fahrzeugen (Tausend Fahrzeuge) [30] S. 325; [31].....	27
Abbildung 4.1:	Unfälle mit Personenschaden im Schienenverkehr nach Ereignisarten.....	29
Abbildung 4.2:	Getötete Reisende und Bahnbedienstete im Schienenverkehr nach Ereignisarten.....	30
Abbildung 4.3:	Verletzte Reisende und Bahnbedienstete im Schienenverkehr nach Ereignisarten.....	31
Abbildung 5.1:	Zusammenhang zwischen biomechanischer Belastungsgrenze, Verletzungskriterium und Schutzkriterium.....	45

Abbildung 6.1:	Variante der Sitzbefestigung in Kraftomnibussen [48]	57
Abbildung 6.2:	Insassenkinematik beim Sitzanprall [49].....	57
Abbildung 6.3:	Kinematik des Dummy bei unterschiedlichen Sitzteilern (links: 700 mm, rechts: ca. 890 mm) nach [48].....	58
Abbildung 6.4:	Abhängigkeit der resultierenden Kopfbeschleunigung des Dummy und des HIC - Wertes vom Sitzteilermaß nach [49].....	59
Abbildung 7.1:	Für die Auflaufversuche vorbereiteter Steuerwagen	70
Abbildung 7.2:	Plastische Deformation des Führerstandsendes bei einer Geschwindigkeit von 42 km/h.....	70
Abbildung 7.3:	Deformierte Wagenkastenstruktur nach dem Auflaufversuch mit einer Geschwindigkeit von 49 km/h.....	71
Abbildung 7.4:	Gestoßenes Fahrzeug nach dem Aufprallversuch [65].....	72
Abbildung 7.5:	Aufprallender 5-Wagen-Zug mit modifizierten Fahrzeugenden nach dem Versuch 2 [66].....	75
Abbildung 7.6:	Fahrzeugkonfiguration beim Crashversuch mit energieabsorbierenden Wagenkastenstrukturen des TGV 2N [70].....	76
Abbildung 7.7:	Fullscale - Crashversuch mit dem doppelstöckigen TGV2N [67].....	78
Abbildung 7.8:	Fullscale-Crashtest mit der energieabsorbierenden Frontstruktur des Dieseltriebfahrzeuges TER X72500 [71].....	79
Abbildung 7.9:	Komponententest mit einem Kastenprofil aus Stahl in Kombination mit einem Kunststoffwabenkern [73].....	80
Abbildung 7.10:	Vergleich der Ergebnisse aus rechnerischer Simulation und Versuch für ein Kastenprofil aus Stahl mit Kunststoffwabenkern [74].....	81
Abbildung 7.11:	Schlittenversuche mit konventionellen Fahrgastsitzen von Reisezugwagen [75]	82
Abbildung 7.12:	Fullscale-Crashtest mit konventionellen Reisezugwagen [77]	84
Abbildung 7.13:	Beispiel für die rechnerische Simulation von Deformationsstrukturen mit Hilfe von FEM [79].....	87
Abbildung 7.14:	Beispiel für ein Mehrkörpersystem (Modellierung mit der MKS- Simulationssoftware ADAMS [®])	88
Abbildung 8.1:	Zusammenhang zwischen Fahrzeugverzögerung und Insassenbelastung im Crashfall	92

Abbildung 9.1:	Synthetische Beschleunigung-Zeit-Charakteristiken nach der Richtlinie 96/37/EG [56].....	97
Abbildung 9.2:	Beschleunigung-Zeit-Charakteristik beim Aufprall auf eine starre Wand (Zeitausschnitt: 0 bis 0,5 s) - Ergebnis aus Simulationsrechnungen [79]	98
Abbildung 9.3:	Beschleunigung - Zeit - Charakteristik für ein Führerstandsmodul [80].....	99
Abbildung 9.4:	Insassenmodell des 50% - Mannes	102
Abbildung 9.5:	Definition der Federkraft (F_S) innerhalb der IMPACT - Funktion in Abhängigkeit der Funktionsparameter	105
Abbildung 9.6:	Definition der Dämpfungskraft (F_D) innerhalb der IMPACT - Funktion in Abhängigkeit der Funktionsparameter	105
Abbildung 9.7:	MKS-Modell für die Sitzkonfiguration Reihenbestuhlung	106
Abbildung 9.8:	Kraft - Weg - Charakteristik der Rückenschale mit Rückenlehnenpolster (komplett) gemäß Prüfung von Fahrgastsitzen ([82] und [60])	108
Abbildung 9.9:	Kraft - Weg - Charakteristik der Schale mit Polster für die Kopfstütze gemäß Prüfung von Fahrgastsitzen ([82] und [60]).....	108
Abbildung 9.10:	MKS-Modell für die Sitzkonfiguration Abteilbestuhlung ohne Tisch.....	112
Abbildung 9.11:	Kraft - Weg - Charakteristik der Sitzschalenpolsterung gemäß Prüfung von Fahrgastsitzen ([82] und [60]).....	114
Abbildung 9.12:	MKS-Modell für die Sitzkonfiguration Abteilbestuhlung mit Tisch	117
Abbildung 9.13:	MKS-Modell des Führerstandsmoduls und des Triebfahrzeugführers	120
Abbildung 10.1:	Vergleich der berechneten HIC_{36} -Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen.....	127
Abbildung 10.2:	Vergleich der Maxima der resultierenden Kopfbeschleunigung (a_{3ms} : Kopf).....	128
Abbildung 10.3:	Vergleich der berechneten SI-Werte aus der resultierenden Brustbeschleunigung	129
Abbildung 10.4:	Vergleich der Maxima der resultierenden Brustbeschleunigung (a_{3ms} : Thorax).....	130
Abbildung 10.5:	Vergleich der Maxima der resultierenden Beckenbeschleunigung (a_{3ms} : Pelvis).....	131
Abbildung 10.6:	Vergleich der maximalen Oberschenkel-Längsdruckkräfte	132

Abbildung 10.7: Vergleich der berechneten HIC_{36} -Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen.....	133
Abbildung 10.8: Vergleich der Maxima der resultierenden Kopfbeschleunigung (a_{3ms} : Kopf).....	135
Abbildung 10.9: Vergleich der berechneten SI-Werte aus der resultierenden Brustbeschleunigung	136
Abbildung 10.10: Vergleich der Maxima der resultierenden Brustbeschleunigung (a_{3ms} : Thorax)	137
Abbildung 10.11: Vergleich der Maxima der resultierenden Beckenbeschleunigung (a_{3ms} : Pelvis).....	138
Abbildung 10.12: Vergleich der maximalen Oberschenkel-Längsdruckkräfte	139
Abbildung 10.13: Vergleich der berechneten HIC_{36} -Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen.....	140
Abbildung 10.14: Vergleich der Maxima der resultierenden Kopfbeschleunigung (a_{3ms} : Kopf).....	141
Abbildung 10.15: Vergleich der berechneten SI-Werte aus der resultierenden Brustbeschleunigung	142
Abbildung 10.16: Vergleich der Maxima der resultierenden Brustbeschleunigung (a_{3ms} : Thorax).....	143
Abbildung 10.17: Vergleich der Maxima der resultierenden Beckenbeschleunigung (a_{3ms} : Pelvis).....	144
Abbildung 10.18: Vergleich der resultierenden Maximalkräfte beim Beckenanprall auf den Tisch	145
Abbildung 10.19: Vergleich der berechneten HIC_{36} -Werte aus den resultierenden Kopfbeschleunigungen.....	146
Abbildung 10.20: Vergleich der Maxima der resultierenden Kopfbeschleunigung (a_{3ms} : Kopf).....	147
Abbildung 10.21: Vergleich der berechneten SI-Werte aus der resultierenden Brustbeschleunigung	148
Abbildung 10.22: Vergleich der Maxima der resultierenden Brustbeschleunigung (a_{3ms} : Thorax).....	149
Abbildung 10.23: Vergleich der Maxima der resultierenden Beckenbeschleunigung (a_{3ms} : Pelvis).....	150
Abbildung 10.24: Vergleich der resultierenden Maximalkräfte beim Beckenanprall auf den Tisch	152

Abbildung C.1: Reihenbestuhlung, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	190
Abbildung C.2: Reihenbestuhlung, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	190
Abbildung C.3: Reihenbestuhlung, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	191
Abbildung C.4: Reihenbestuhlung, Modellvariante A1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes	191
Abbildung C.5: Reihenbestuhlung, Modellvariante A2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	192
Abbildung C.6: Reihenbestuhlung, Modellvariante A2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	192
Abbildung C.7: Reihenbestuhlung, Modellvariante A2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	193
Abbildung C.8: Reihenbestuhlung, Modellvariante A2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes	193
Abbildung C.9: Reihenbestuhlung, Modellvariante A2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf die Sitzlehne des Vordersitzes	194
Abbildung C.10: Reihenbestuhlung, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	194
Abbildung C.11: Reihenbestuhlung, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	195
Abbildung C.12: Reihenbestuhlung, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	195
Abbildung C.13: Reihenbestuhlung, Modellvariante B1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes	196
Abbildung C.14: Reihenbestuhlung, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	196
Abbildung C.15: Reihenbestuhlung, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	197
Abbildung C.16: Reihenbestuhlung, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	197

Abbildung C.17: Reihenbestuhlung, Modellvariante B2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes	198
Abbildung C.18: Reihenbestuhlung, Modellvariante B2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf die Sitzlehne des Vordersitzes	198
Abbildung C.19: Reihenbestuhlung, Modellvariante B3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	199
Abbildung C.20: Reihenbestuhlung, Modellvariante B3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	199
Abbildung C.21: Reihenbestuhlung, Modellvariante B3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	200
Abbildung C.22: Reihenbestuhlung, Modellvariante B3: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes	200
Abbildung C.23: Reihenbestuhlung, Modellvariante B3: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf die Sitzlehne des Vordersitzes	201
Abbildung C.24: Reihenbestuhlung, Modellvariante B3: Kraft-Weg-Charakteristik für den Kopf-Anprall auf die Sitzlehne des Vordersitzes.....	201
Abbildung C.25: Reihenbestuhlung, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	202
Abbildung C.26: Reihenbestuhlung, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	202
Abbildung C.27: Reihenbestuhlung, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	203
Abbildung C.28: Reihenbestuhlung, Modellvariante C1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes	203
Abbildung C.29: Reihenbestuhlung, Modellvariante C2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	204
Abbildung C.30: Reihenbestuhlung, Modellvariante C2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	204
Abbildung C.31: Reihenbestuhlung, Modellvariante C2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	205
Abbildung C.32: Reihenbestuhlung, Modellvariante C2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes	205

Abbildung C.33: Reihenbestuhlung, Modellvariante C2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf die Sitzlehne des Vordersitzes	206
Abbildung C.34: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	206
Abbildung C.35: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	207
Abbildung C.36: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	207
Abbildung C.37: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz.....	208
Abbildung C.38: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	208
Abbildung C.39: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	209
Abbildung C.40: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	209
Abbildung C.41: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz.....	210
Abbildung C.42: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz	210
Abbildung C.43: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	211
Abbildung C.44: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	211
Abbildung C.45: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	212
Abbildung C.46: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz.....	212
Abbildung C.47: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	213
Abbildung C.48: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	213

Abbildung C.49: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	214
Abbildung C.50: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz.....	214
Abbildung C.51: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz	215
Abbildung C.52: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	215
Abbildung C.53: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	216
Abbildung C.54: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	216
Abbildung C.55: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz.....	217
Abbildung C.56: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	217
Abbildung C.57: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	218
Abbildung C.58: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	218
Abbildung C.59: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz.....	219
Abbildung C.60: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz	219
Abbildung C.61: Abteil mit Tisch, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	220
Abbildung C.62: Abteil mit Tisch, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	220
Abbildung C.63: Abteil mit Tisch, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	221
Abbildung C.64: Abteil mit Tisch, Modellvariante A1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Tischanprall von Becken/Abdomen	221

Abbildung C.65: Abteil mit Tisch, Modellvariante A1: Kraft-Weg-Charakteristik für den Tischanprall von Becken/Abdomen	222
Abbildung C.66: Abteil mit Tisch, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	222
Abbildung C.67: Abteil mit Tisch, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	223
Abbildung C.68: Abteil mit Tisch, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	223
Abbildung C.69: Abteil mit Tisch, Modellvariante B1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Tischanprall von Becken/Abdomen	224
Abbildung C.70: Abteil mit Tisch, Modellvariante B1: Kraft-Weg-Charakteristik für den Tischanprall von Becken/Abdomen	224
Abbildung C.71: Abteil mit Tisch, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	225
Abbildung C.72: Abteil mit Tisch, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	225
Abbildung C.73: Abteil mit Tisch, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	226
Abbildung C.74: Abteil mit Tisch, Modellvariante B2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Tischanprall von Becken/Abdomen	226
Abbildung C.75: Abteil mit Tisch, Modellvariante B2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Tischanprall von Becken/Abdomen	227
Abbildung C.76: Abteil mit Tisch, Modellvariante B3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	227
Abbildung C.77: Abteil mit Tisch, Modellvariante B3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	228
Abbildung C.78: Abteil mit Tisch, Modellvariante B3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	228
Abbildung C.79: Abteil mit Tisch, Modellvariante B3: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Tischanprall von Becken/Abdomen	229
Abbildung C.80: Abteil mit Tisch, Modellvariante B3: Kraft-Weg-Charakteristik für den Tischanprall von Becken/Abdomen	229

Abbildung C.81: Abteil mit Tisch, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	230
Abbildung C.82: Abteil mit Tisch, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	230
Abbildung C.83: Abteil mit Tisch, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	231
Abbildung C.84: Abteil mit Tisch, Modellvariante C1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Tischenprall von Becken/Abdomen	231
Abbildung C.85: Abteil mit Tisch, Modellvariante C1: Kraft-Weg-Charakteristik für den Tischenprall von Becken/Abdomen	232
Abbildung C.86: Führerstandsmodul, Modellvariante 1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	232
Abbildung C.87: Führerstandsmodul, Modellvariante 1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	233
Abbildung C.88: Führerstandsmodul, Modellvariante 1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	233
Abbildung C.89: Führerstandsmodul, Modellvariante 1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Anprall des Beckens gegen den Führerstandstisch	234
Abbildung C.90: Führerstandsmodul, Modellvariante 2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	234
Abbildung C.91: Führerstandsmodul, Modellvariante 2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	235
Abbildung C.92: Führerstandsmodul, Modellvariante 2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	235
Abbildung C.93: Führerstandsmodul, Modellvariante 2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Anprall des Beckens gegen den Führerstandstisch	236
Abbildung C.94: Führerstandsmodul, Modellvariante 2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Anprall des Beckens gegen den Führerstandstisch	236
Abbildung C.95: Führerstandsmodul, Modellvariante 3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf	237
Abbildung C.96: Führerstandsmodul, Modellvariante 3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax	237

Abbildung C.97: Führerstandsmodul, Modellvariante 3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	238
Abbildung C.98: Führerstandsmodul, Modellvariante 3: Kraft-Zeit-Charakteristik für das Becken infolge Gurtkraftwirkung.....	238
Abbildung C.99: Führerstandsmodul, Modellvariante 3: Kraft-Zeit- und Weg-Zeit-Charakteristik für den Beckengurt (Gurtband).....	239
Abbildung C.100: Führerstandsmodul, Modellvariante 4: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf.....	239
Abbildung C.101: Führerstandsmodul, Modellvariante 4: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax.....	240
Abbildung C.102: Führerstandsmodul, Modellvariante 4: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich	240
Abbildung C.103: Führerstandsmodul, Modellvariante 4: Kraft-Zeit-Charakteristik für das Becken infolge Gurtkraftwirkung.....	241
Abbildung C.104: Führerstandsmodul, Modellvariante 4: Kraft-Zeit- und Weg-Zeit-Charakteristik für den Dreipunktgurt (Gurtband).....	241

15 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1:	Szenarien zum Nachweis einer ausreichenden Sicherheit im Kollisionsfall nach Richtlinie 96/48/EG [12]	9
Tabelle 2.1:	Komponenten der aktiven und passiven Sicherheit im Schienenverkehr	16
Tabelle 3.1:	Verunglückte bei Eisenbahnunfällen von 1991 bis 1995 nach Unfallstatistiken der DR, DB und DB AG	17
Tabelle 4.1:	Modifizierte Schadensausmaßkategorien in Anlehnung an DIN EN 50126.....	34
Tabelle 4.2:	Modifizierte Wahrscheinlichkeitsniveaus in Anlehnung an DIN EN 50126.....	35
Tabelle 4.3:	Risikoklassifikationsmatrix nach DIN EN 50126.....	36
Tabelle 4.4:	Verbale Risikoklassifikation nach DIN EN 50126	37
Tabelle 4.5:	Erfasste Bahnbetriebsunfälle mit getöteten und/oder verletzten Reisenden und Bahnbediensteten im Zeitraum von 1991 bis 1995.....	37
Tabelle 4.6:	Risikoklassifikationsmatrix für das Ereignis "Entgleisung" (1991 bis 1995).....	38
Tabelle 4.7:	Risikoklassifikationsmatrix für das Ereignis "Zusammenstoß" (1991 bis 1995)	39
Tabelle 4.8:	Risikoklassifikationsmatrix für das Ereignis "Aufprall auf Gegenstände" (1991 bis 1995).....	40
Tabelle 4.9:	Risikoklassifikationsmatrix für das Ereignis "Zusammenprall mit Wegbenutzern" (1991 bis 1995)	42
Tabelle 5.1:	Ausgewählte biomechanische Belastungsgrenzwerte des Menschen nach [22] und [36] S. 120-132	46
Tabelle 5.2:	Auswahl gesetzlich vorgeschriebener Grenzwerte für den Frontalaufprall	47
Tabelle 6.1:	Vergleich ausgewählter Maßnahmen der passiven Sicherheit in der Kraft- und Schienenfahrzeugtechnik	51
Tabelle 7.1:	Verfahren zur Entwicklung und Bewertung von Sicherheitsmaßnahmen	64
Tabelle 7.2:	Aufprallversuche innerhalb der ORE-Frage B 165.....	73
Tabelle 9.1:	Systemparameter für verschiedene Modellvarianten des Fahrgastbereiches	103
Tabelle 9.2:	Systemparameter für verschiedene Modellvarianten des Führerstandsmoduls	103
Tabelle 9.3:	Systemparameter: Modellvarianten A1, B1 und C1 (Status - Analyse).....	109

Tabelle 9.4:	Systemparameter zur Beschreibung der lokalen Aufprallsteifigkeiten - Modellvarianten A2, B2 und C2 (Verwendung einer zusätzlichen Polsterung).....	110
Tabelle 9.5:	Systemparameter: Modellvarianten A1, B1 und C1 (Status - Analyse).....	115
Tabelle 9.6:	Systemparameter: Modellvarianten A2, B2 und C2 (Verwendung eines in die Sitzpolsterung/ Sitzstruktur integrierten Energieabsorptionselementes)	116
Tabelle 9.7:	Systemparameter: Modellvarianten A1, B1 und C1 (Status - Analyse).....	118
Tabelle 9.8:	Systemparameter: Modellvariante B3 (Optimiertes Energieabsorptionsvermögen des Tisches).....	119
Tabelle 9.9:	Systemparameter zur Beschreibung der lokalen Aufprallsteifigkeiten - Modellvariante 1 (Status - Analyse)	121
Tabelle 9.10:	Systemparameter zur Beschreibung der lokalen Aufprallsteifigkeiten - Modellvariante 2 (zusätzliche Polsterung).....	122
Tabelle 9.11:	Systemparameter zur Beschreibung der lokalen Aufprallsteifigkeiten - Modellvariante 3 (Verwendung eines Beckengurtes mit Gurtkraftbegrenzung)	123
Tabelle 9.12:	Systemparameter zur Beschreibung der lokalen Aufprallsteifigkeiten - Modellvariante 4 (Verwendung eines Dreipunktgurtes mit Gurtkraftbegrenzung).....	123
Tabelle 10.1:	Reihenbestuhlung: Übersicht der ermittelten Beschleunigung-Zeit-, Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Charakteristika im Anhang C	125
Tabelle 10.2:	Abteilbestuhlung ohne Tisch: Übersicht der ermittelten Beschleunigung-Zeit-, Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Charakteristika im Anhang C.....	125
Tabelle 10.3:	Abteilbestuhlung mit Tisch: Übersicht der ermittelten Beschleunigung-Zeit-, Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Charakteristika im Anhang C.....	126
Tabelle 10.4:	Führerstandsmodul: Übersicht der ermittelten Beschleunigung-Zeit-, Kraft-Zeit- und Kraft-Weg-Charakteristika im Anhang C	126

A Erläuterung der spezifischen Kennzahlen zum Vergleich der Unfallstatistiken des Straßen- und Schienenverkehrs

Verkehrsunfälle und Verkehrstote:

Hier werden alle Bahnbetriebsunfälle im Schienenverkehr mit Personenschaden erfasst, bei denen mindestens ein bewegtes - beim Zusammenprall auch haltendes - Eisenbahnfahrzeug im Fahr- und Rangierbetrieb auf den gewidmeten Strecken und Anlagen der Eisenbahnen beteiligt ist. Nicht einbezogen sind z.B.

- Unfälle durch den Aufprall von Straßenfahrzeugen an Bahnschranken und
- Unfälle von Bahnbediensteten
 - in Werkstätten,
 - bei der Unterhaltung von Anlagen und Einrichtungen des Eisenbahnbetriebs (ohne Beteiligung von Zügen oder einzelnen Fahrzeugen),
 - in der Verwaltung und
 - auf dem Weg zu und von der Arbeitsstätte.

Bei den Straßenverkehrsunfälle werden alle von der Polizei registrierten Verkehrsunfälle erfasst, bei denen infolge des Fahrverkehrs auf öffentlichen Wegen und Plätzen entweder Personen getötet oder verletzt werden oder Sachschaden entstanden ist.

Verunglückte Personen im Straßen- und Schienenverkehr:

Verunglückte werden als Getötete nachgewiesen, wenn sie innerhalb von 30 Tagen nach dem Unfall an den Unfallfolgen gestorben sind und als Schwerverletzte, wenn sie stationär in einem Krankenhaus behandelt wurden. Sonstige Verunglückte gelten als leichtverletzt.

Verkehrsaufkommen im Personenverkehr in Milliarden/Jahr:

Das Verkehrsaufkommen im Personenverkehr wird in der Zahl der beförderten Personen/Jahr ausgedrückt.

Verkehrsleistung im Personenverkehr in Milliarden/Jahr:

Die Verkehrsleistung im Personenverkehr wird in der Zahl der Personenkilometer/Jahr ausgedrückt.

- Schienenverkehr: Nah- und Fernverkehr einschl. S-Bahnverkehr, Berufs- und Schülerverkehr sowie Verkehr im Regeltarif bis 50 km Reichweite, jedoch ohne U-Bahn-, Hoch- und Schwebebahn- sowie Straßenbahnverkehr.
- Straßenverkehr: Motorisierter Individualverkehr mit Personen- und Kombinationskraftwagen, Krafträdern und Mopeds, einschl. Taxi- und Mietwagenverkehr, jedoch ohne Öffentlichen Straßenpersonenverkehr mit Kraftomnibussen und Obussen.

Fahrzeuge für die Personenbeförderung:

- Im Schienenverkehr werden erfasst: Elektrische Triebwagen, Dieseltriebwagen, Reisezugwagen, Steuer- und Beiwagen für EBO-Einsatz einschließlich S-Bahn-Verkehr
- Im Straßenverkehr werden erfasst: Krafträder, PKW (einschl. M1 - Fahrzeuge³⁴), Sonderkraftfahrzeuge nicht zur Lastenbeförderung (z. B. Wohnmobile, Krankenkraftwagen, Feuerwehrfahrzeuge), Mofas und Leichtmofas, Mopeds, Mokicks und maschinell angetriebene Krankenfahrräder

Gesamtbestand an Fahrzeugen:

- Im Schienenverkehr werden Triebfahrzeuge, Fahrzeuge für die Personenbeförderung ohne eigenen Antrieb (Reisezugwagen, Steuer- und Beiwagen), Gepäckwagen, Güterwagen (Bahneigene Wagen, Privatbestand, Dienstgüterwagen) dazu gezählt.
- Im Straßenverkehr werden alle motorisierten Fahrzeuge und zugelassenen Kraftfahrzeuganhänger dazu gezählt.

³⁴ Klasse M: Kraftfahrzeuge für die Personenbeförderung mit mindestens 4 Rädern sowie Kraftfahrzeuge für die Personenbeförderung mit drei Rädern und einem Höchstgewicht über 1 t.

Klasse M1 : Fahrzeuge für die Personenbeförderung mit höchstens 8 Sitzplätzen außer dem Fahrersitz.

(Aus: Richtlinie 70/156/EWG des Rates vom 6. Februar 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger)

B Zuordnung der Bahnbetriebsunfälle zu Ereignisarten

Die im Abschnitt 4.2: "Bahnbetriebsunfälle mit Personenschaden in der BRD von 1991 bis 1998" innerhalb der Risikoanalyse betrachteten **Ereignisarten** werden vom Statistischen Bundesamt wie folgt erläutert [74]:

- Entgleisungen: Hier handelt es sich um Unfälle bei Fahrten, bei denen ein Abgleiten oder Abheben eines Eisenbahnfahrzeuges (im Fahr- und/oder Rangierbetrieb) von der Fahrbahn oder der zweispurige Lauf eines Eisenbahnfahrzeuges, vorliegt.
- Zusammenstoß: ist das Auffahren eines Eisenbahnfahrzeuges auf ein anderes Eisenbahnfahrzeug, sei es frontal, von der Seite oder von hinten.
- Aufprall auf Gegenstände: Hier ist das Auffahren eines Eisenbahnfahrzeuges auf einen Gleisabschluss, das Fahren gegen ein Hindernis auf dem Fahrweg selbst (z.B. Steine/Erdrutsch, Bäume, Masten) oder im lichten Raum der Fahrbahn (z.B. Ladungsüberhang, Oberleitung) usw., nicht aber gegen ein anderes Eisenbahnfahrzeug zu melden.
- Zusammenprall mit Wegbenutzern: liegt vor,
 - bei einem Unfall auf einem Bahnübergang zwischen einem bewegten Eisenbahnfahrzeug und einem Straßenbenutzer,
 - bei einem Unfall auf einem Bahnübergang zwischen einem Kraftfahrzeug und einem haltenden Eisenbahnfahrzeug,
 - außerhalb eines Bahnüberganges in den Fällen, in denen die Eisenbahn innerhalb des Straßenraumes verläuft (z.B. Verladeflächen des kombinierten Verkehrs)

Es handelt sich also um Unfälle mit Beteiligung von Eisenbahnfahrzeugen einerseits und Straßenverkehrsteilnehmern (Kraftfahrzeuge, Fahrradfahrer, Fußgänger, Reiter) andererseits.

- Persönliche Unfälle einschl. Rottenunfälle: sind Unfälle von Personen im Zusammenhang mit dem Fahrbetrieb, die durch ein bewegtes Eisenbahnfahrzeug sowie im oder am bewegten Eisenbahnfahrzeug, ohne dass gleichzeitig die Voraussetzung einer anderen Er-

eignisart (Entgleisung, Zusammenstoß usw.) erfüllt ist, zu Schaden kommen (verunglücken). Z. B. beim Ein-/ Aussteigen oder innerhalb von Eisenbahnfahrzeugen beim scharfen Bremsen sowie beim Rangierbetrieb.

Nicht zu melden sind Unfälle, bei denen eindeutig Selbsttötung bzw. Selbsttötungsversuch vorliegen.

- Sonstige Bahnbetriebsunfälle: liegen bei Brand, Explosion oder dgl. – im bewegten oder durch ein bewegtes Eisenbahnfahrzeug – vor.

Das Statistische Bundesamt definiert **Personenschäden** wie folgt:

- Getötete Personen sind Personen, die innerhalb von 30 Tagen infolge der bei dem Ereignis erlittenen Verletzungen versterben.
- Verletzte Personen sind Personen, die infolge eines meldepflichtigen Ereignisses körperliche Schäden erlitten haben, die einer ärztlichen Behandlung (nicht nur Nachschau) bedürfen und die nicht innerhalb von 30 Tagen infolge dieser Körperschäden verstorben sind.

Personengruppen im Sinne der Statistik der Bahnbetriebsunfälle werden wie folgt definiert:

- Reisende sind Personen mit oder ohne Fahrausweis, die einen Zug benutzen, gerade benutzt haben oder unmittelbar zu benutzen beabsichtigen.
- Bahnbedienstete (Mitarbeiter) sind Angehörige der Bahn, auch Aushilfskräfte, während dienstlicher Tätigkeit auf dem Bahngelände oder in Eisenbahnfahrzeugen (einschließlich der für die Eisenbahnen tätigen Unternehmenskräfte).
- Bahnfremde sind alle übrigen, vorstehend nicht erwähnten Personen, insbesondere Straßenverkehrsteilnehmer bei Zusammenprallen zwischen Eisenbahnfahrzeugen und Wegbenutzern aber auch dienstlich Tätige, z.B. Mitarbeiter anderer Verwaltungen wie Post, Zoll u.ä.

C Ergebnisse aus der rechnerischen Simulation mit ADAMS

C.1 Insassensimulationsrechnungen: Reihenbestuhlung

C.1.1 Modellvariante A1

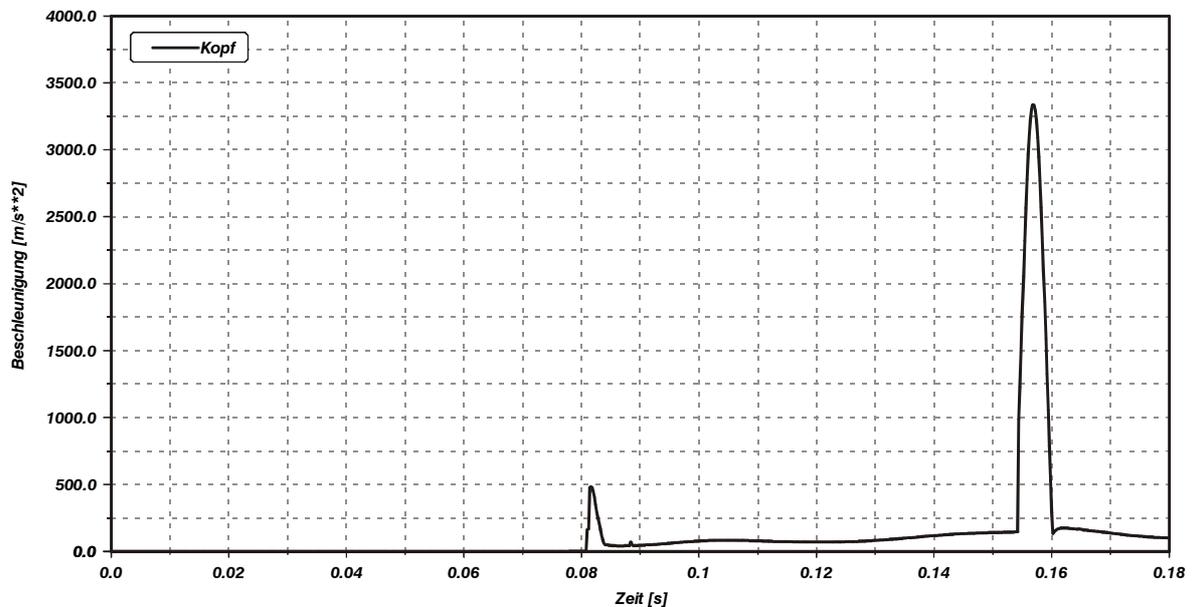


Abbildung C.1: Reihenbestuhlung, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

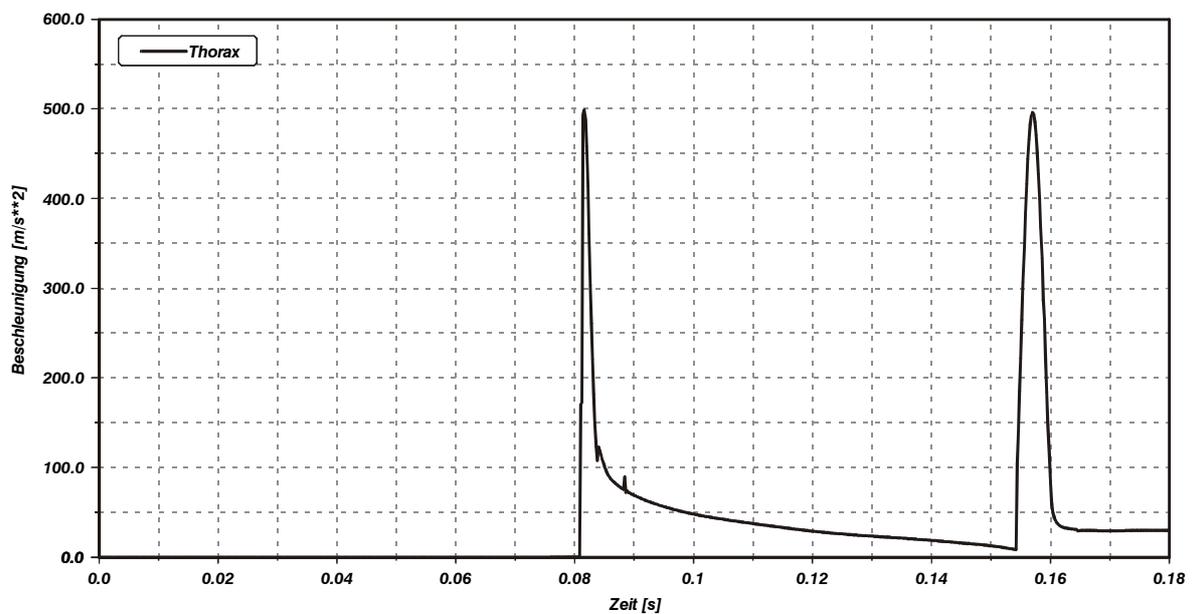


Abbildung C.2: Reihenbestuhlung, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

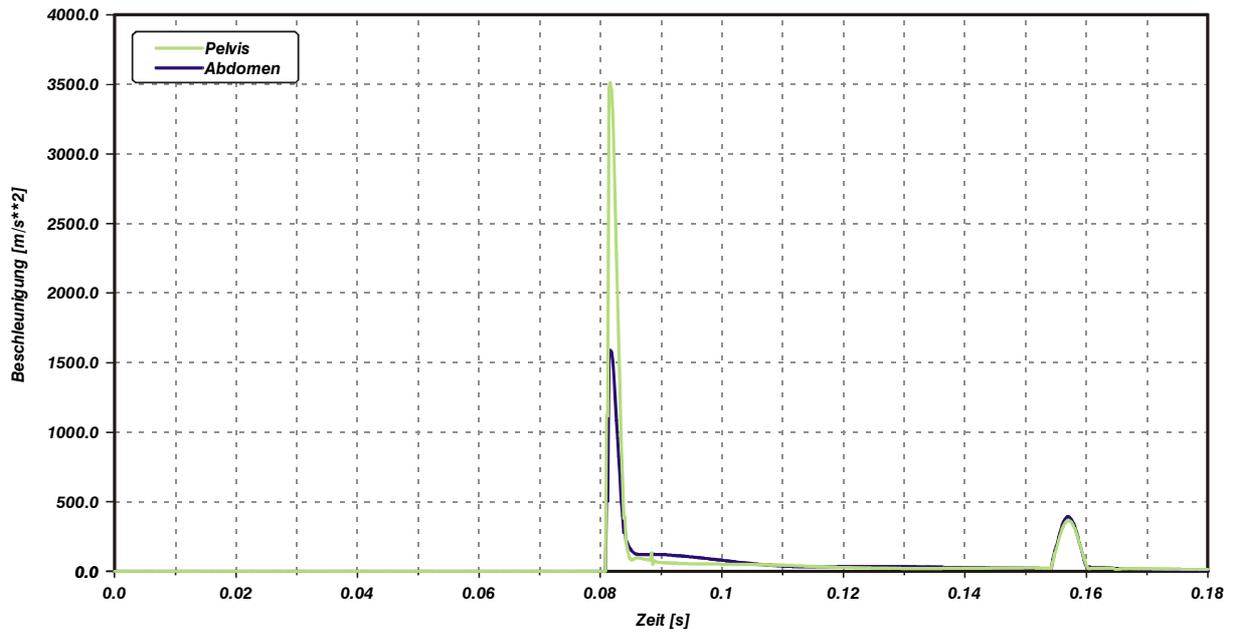


Abbildung C.3: Reihenbestuhlung, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

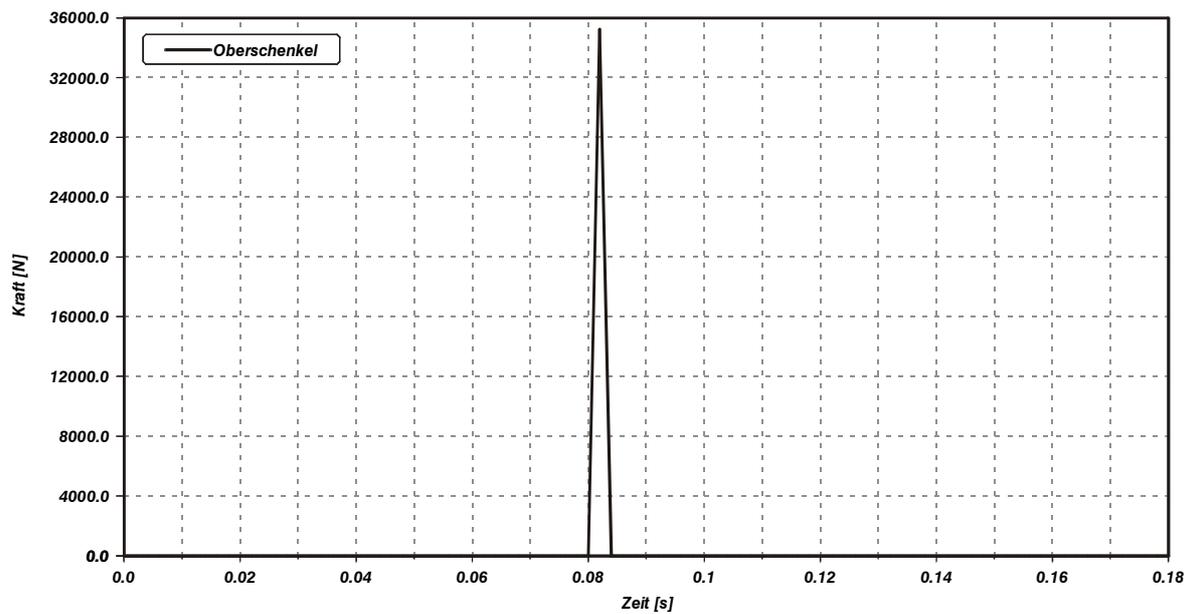


Abbildung C.4: Reihenbestuhlung, Modellvariante A1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes

C.1.2 Modellvariante A2

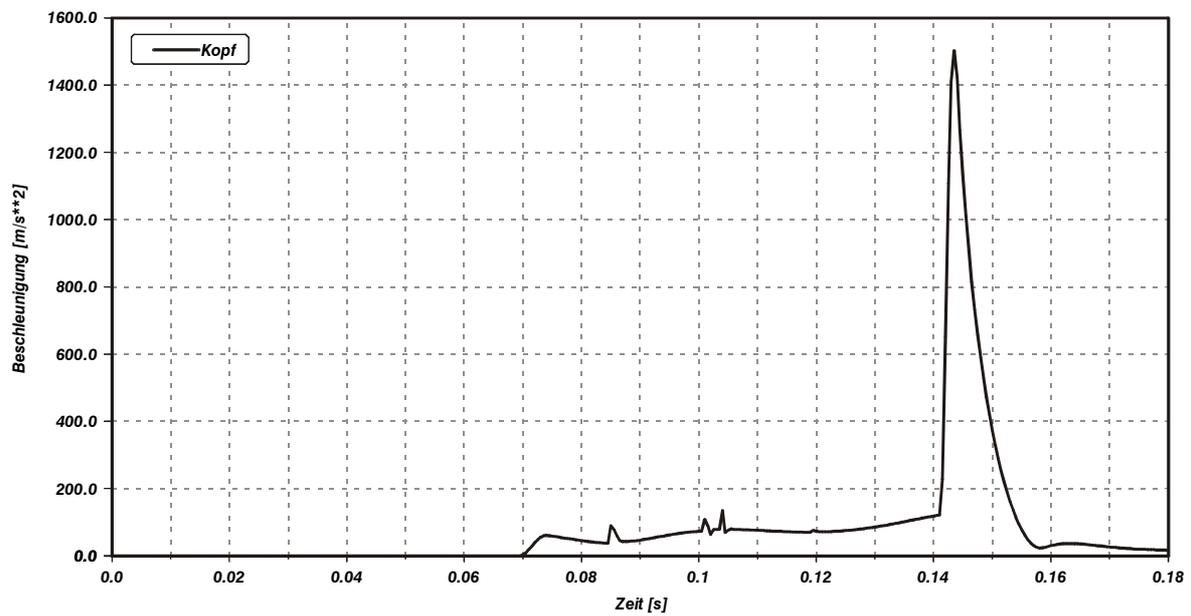


Abbildung C.5: Reihenbestuhlung, Modellvariante A2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

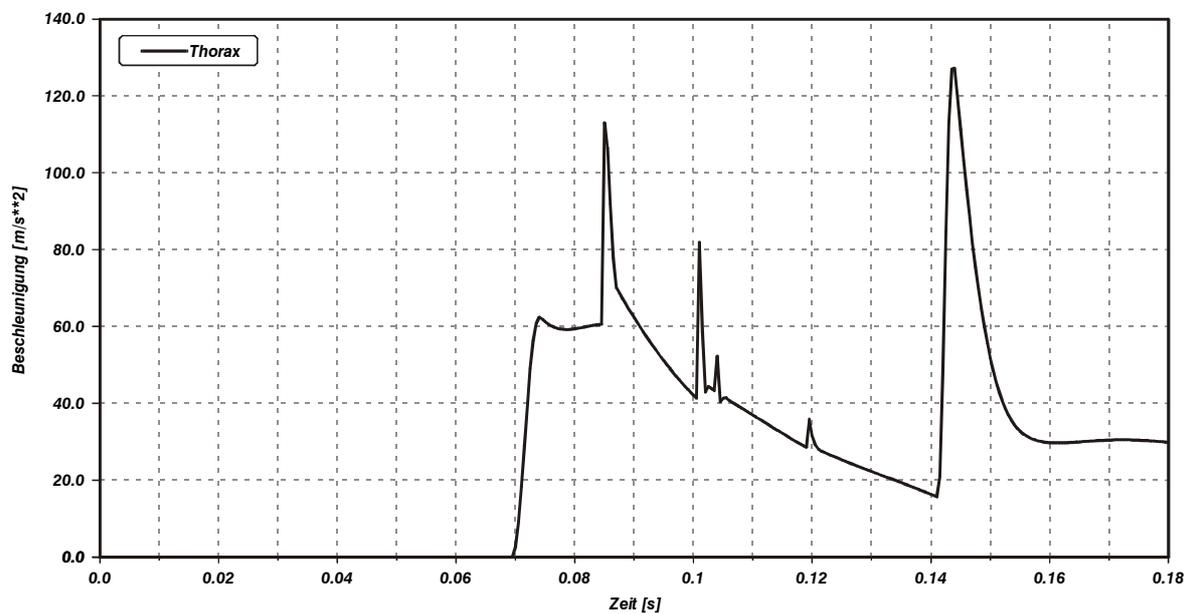


Abbildung C.6: Reihenbestuhlung, Modellvariante A2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

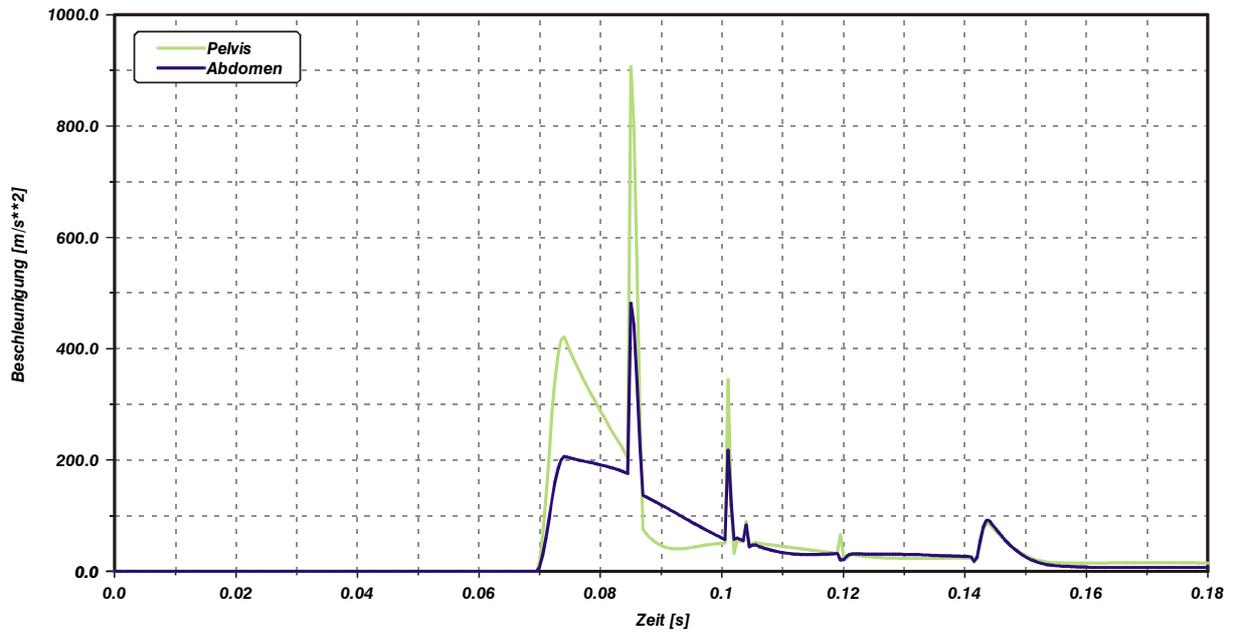


Abbildung C.7: Reihenbestuhlung, Modellvariante A2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

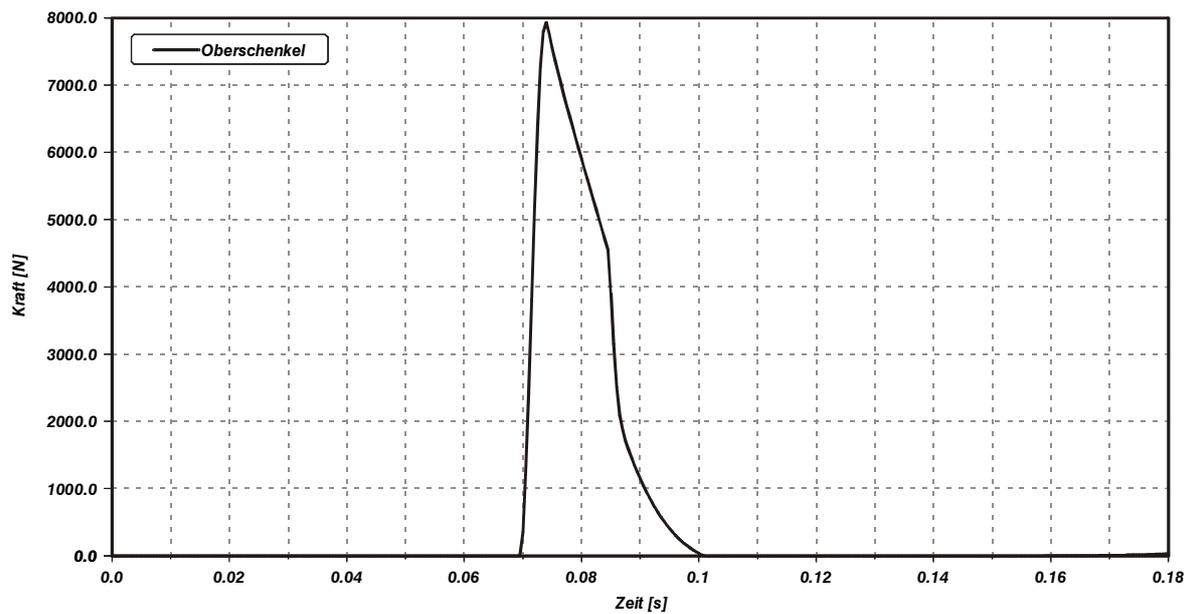


Abbildung C.8: Reihenbestuhlung, Modellvariante A2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes

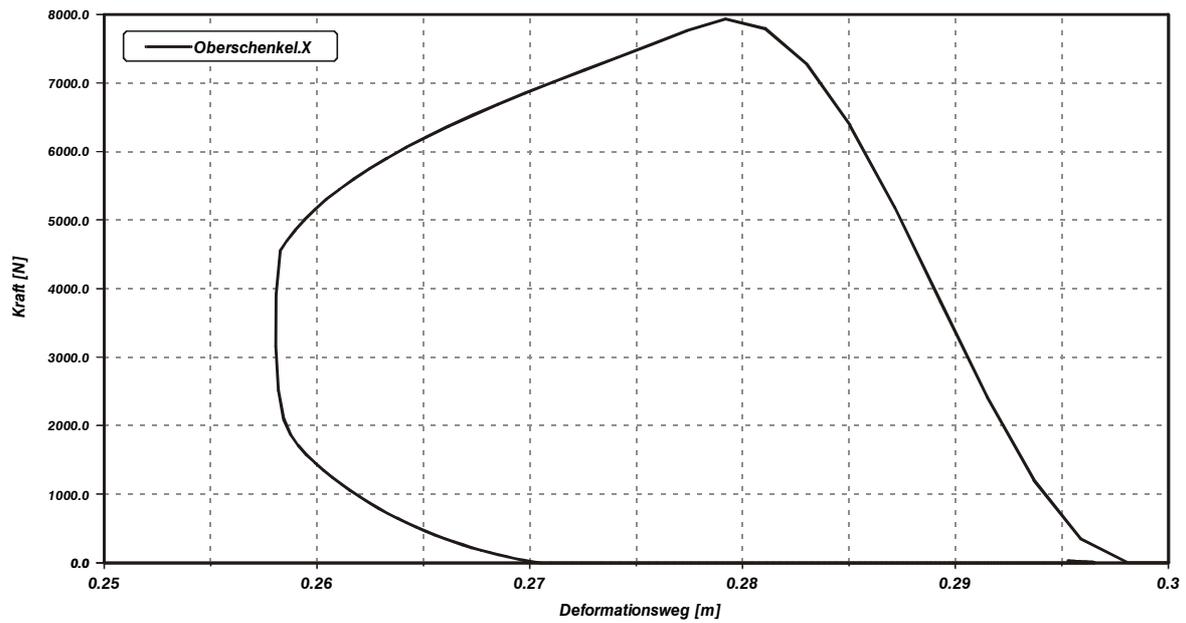


Abbildung C.9: Reihenbestuhlung, Modellvariante A2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf die Sitzlehne des Vordersitzes

C.1.3 Modellvariante B1

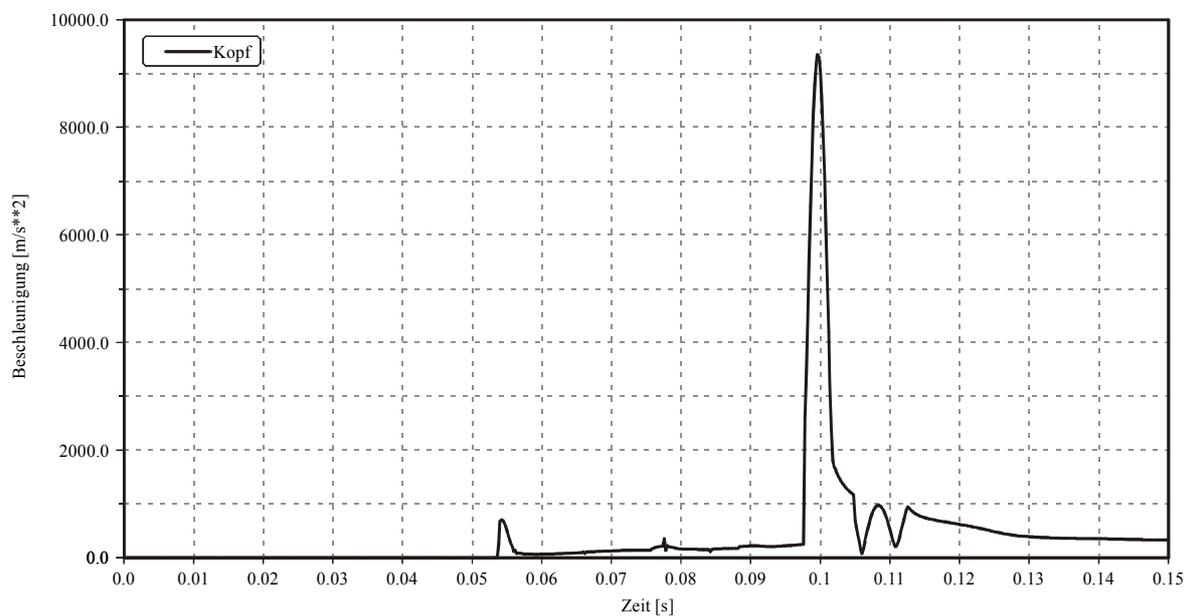


Abbildung C.10: Reihenbestuhlung, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

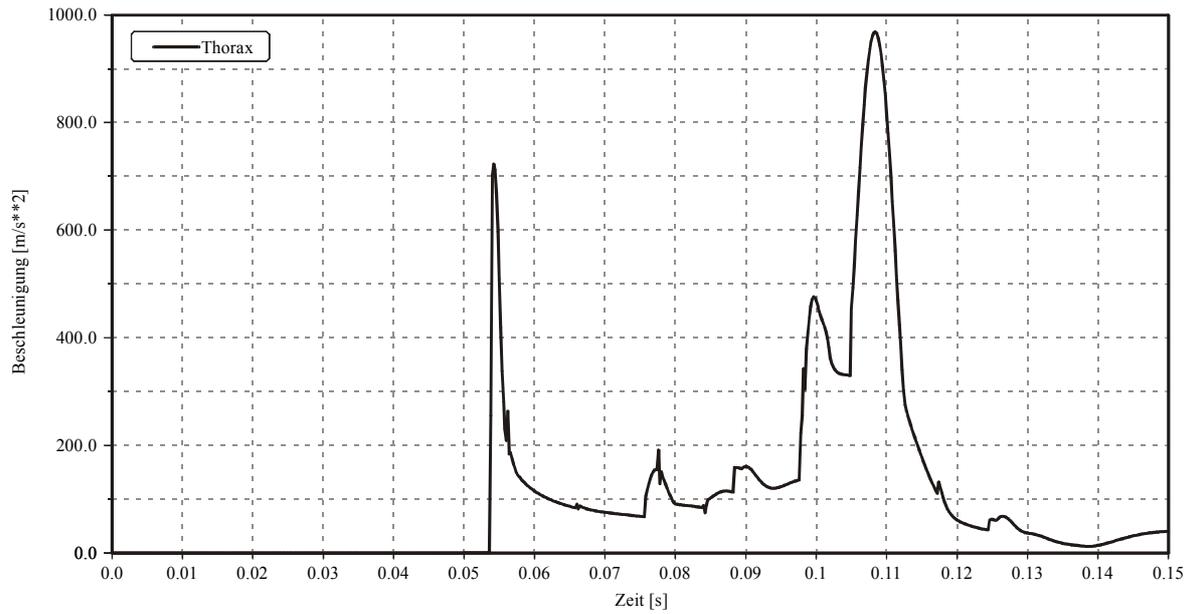


Abbildung C.11: Reihenbestuhlung, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

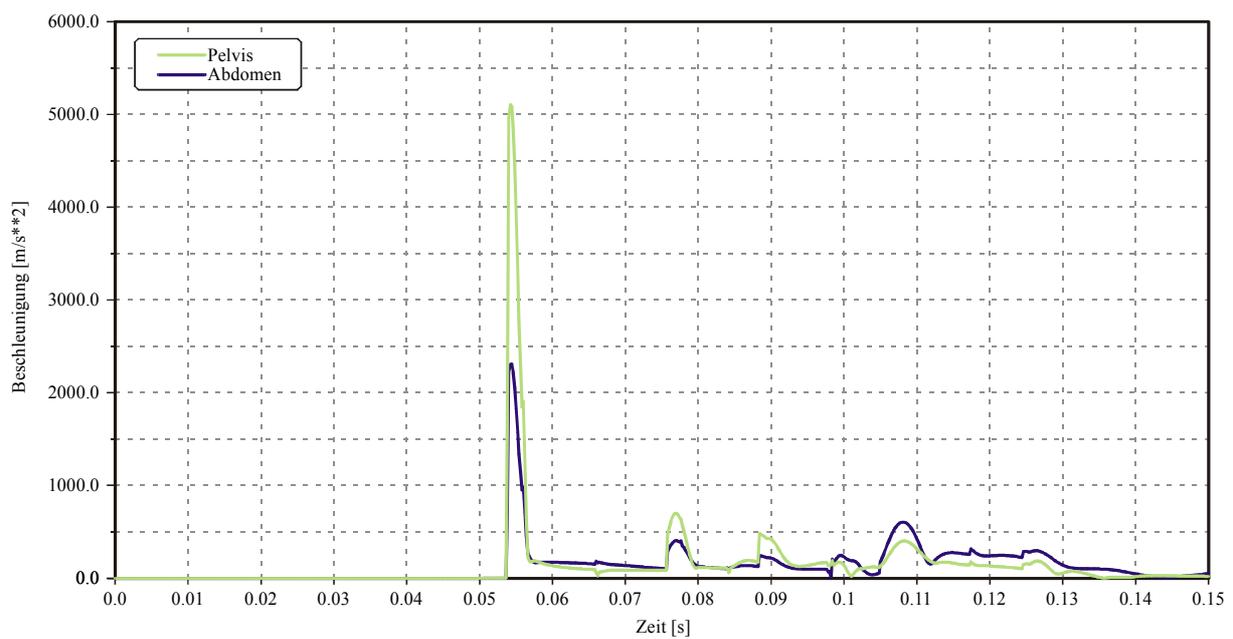


Abbildung C.12: Reihenbestuhlung, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

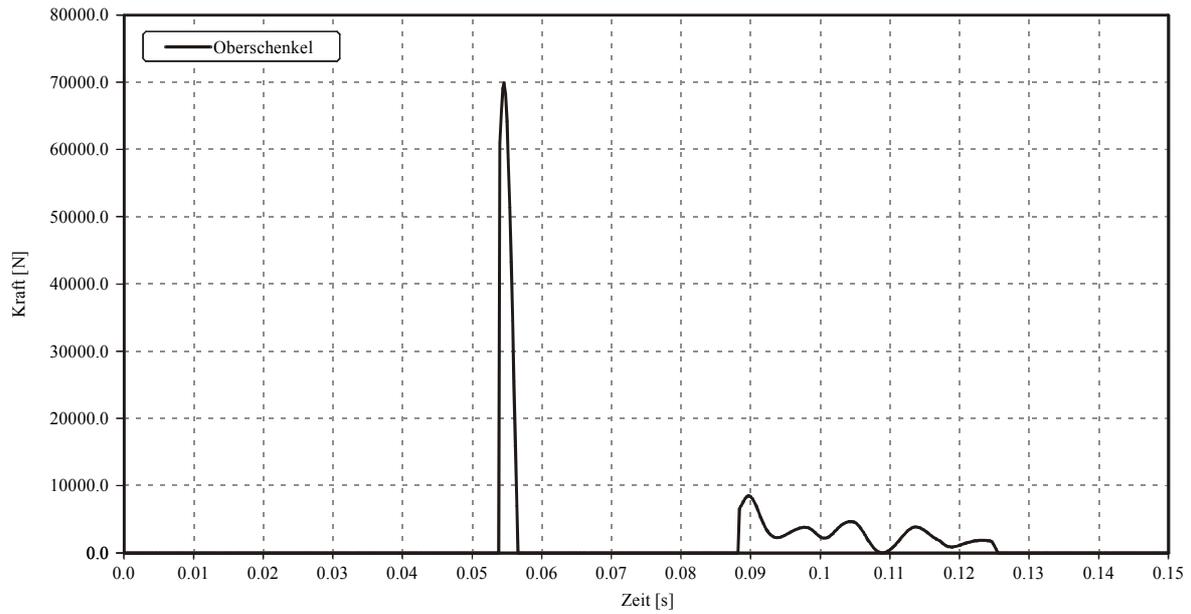


Abbildung C.13: Reihenbestuhlung, Modellvariante B1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes

C.1.4 Modellvariante B2

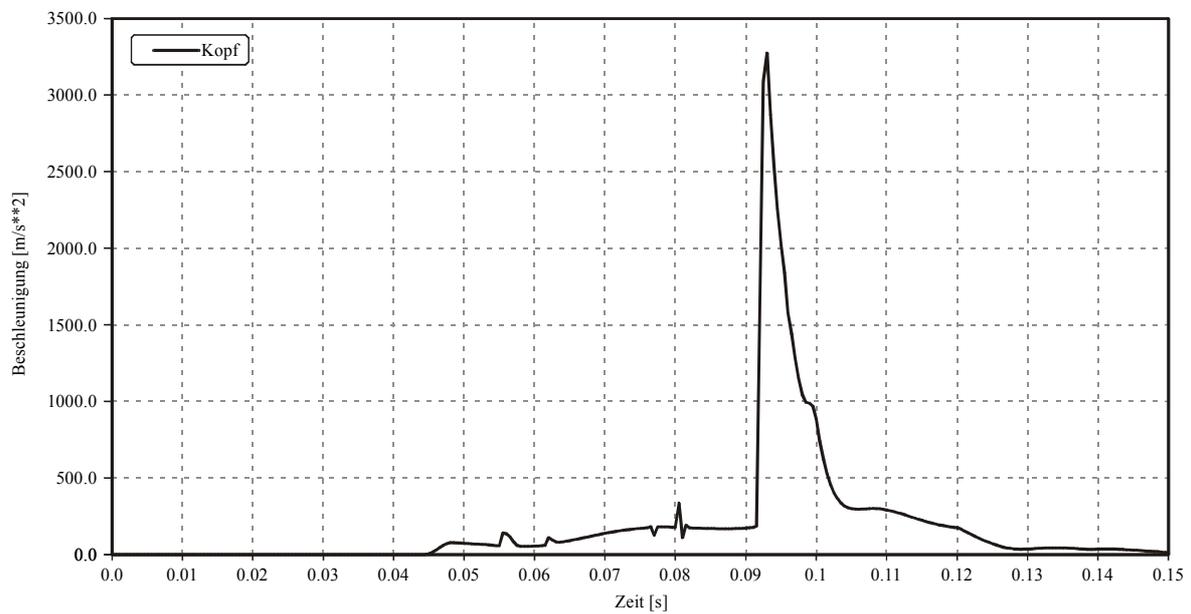


Abbildung C.14: Reihenbestuhlung, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

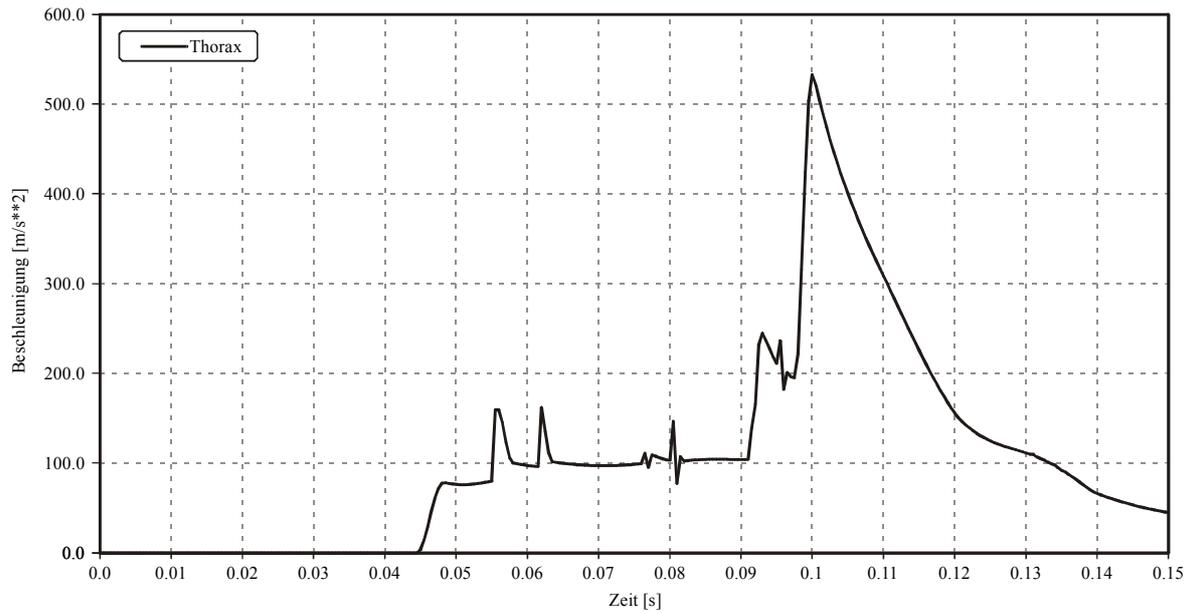


Abbildung C.15: Reihenbestuhlung, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

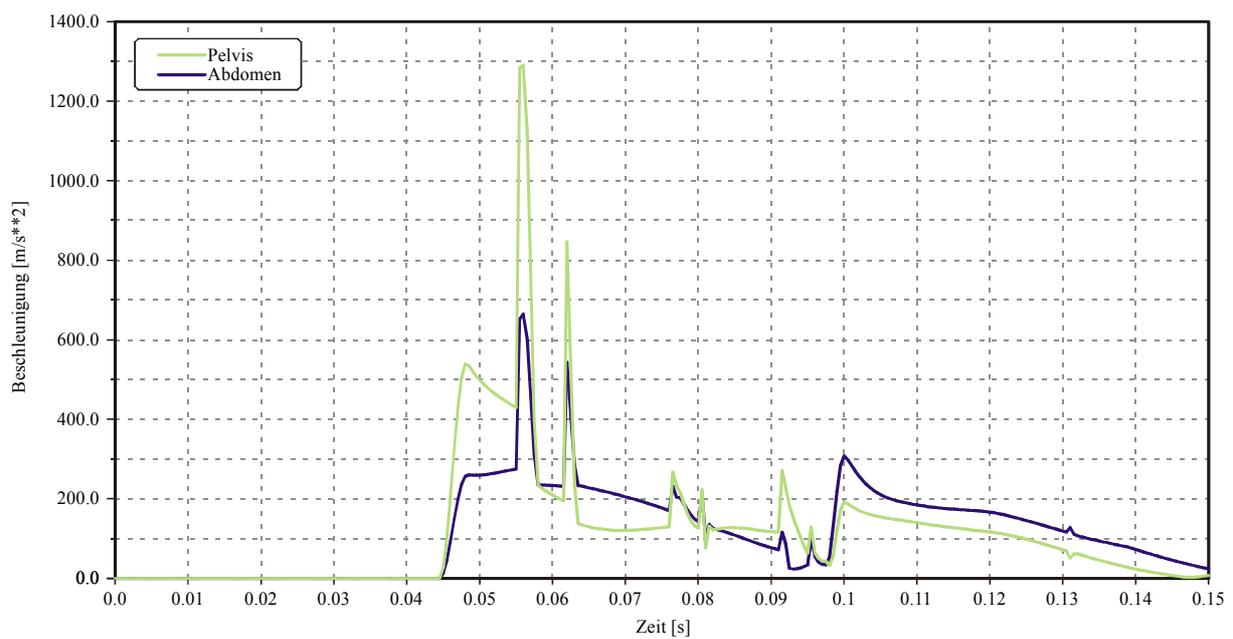


Abbildung C.16: Reihenbestuhlung, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

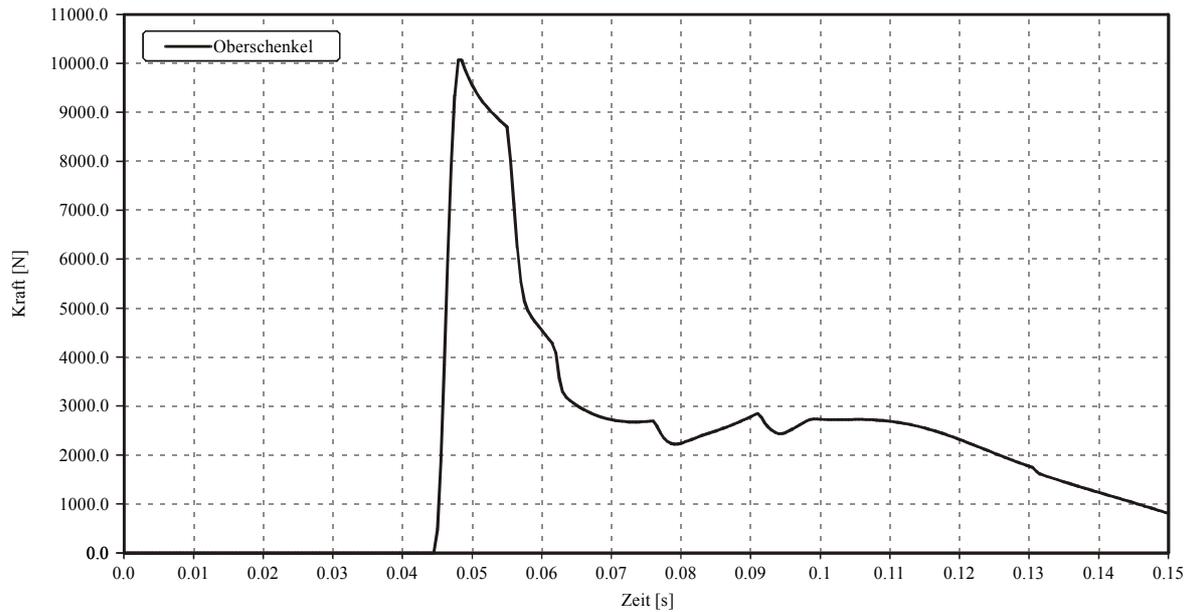


Abbildung C.17: Reihenbestuhlung, Modellvariante B2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes

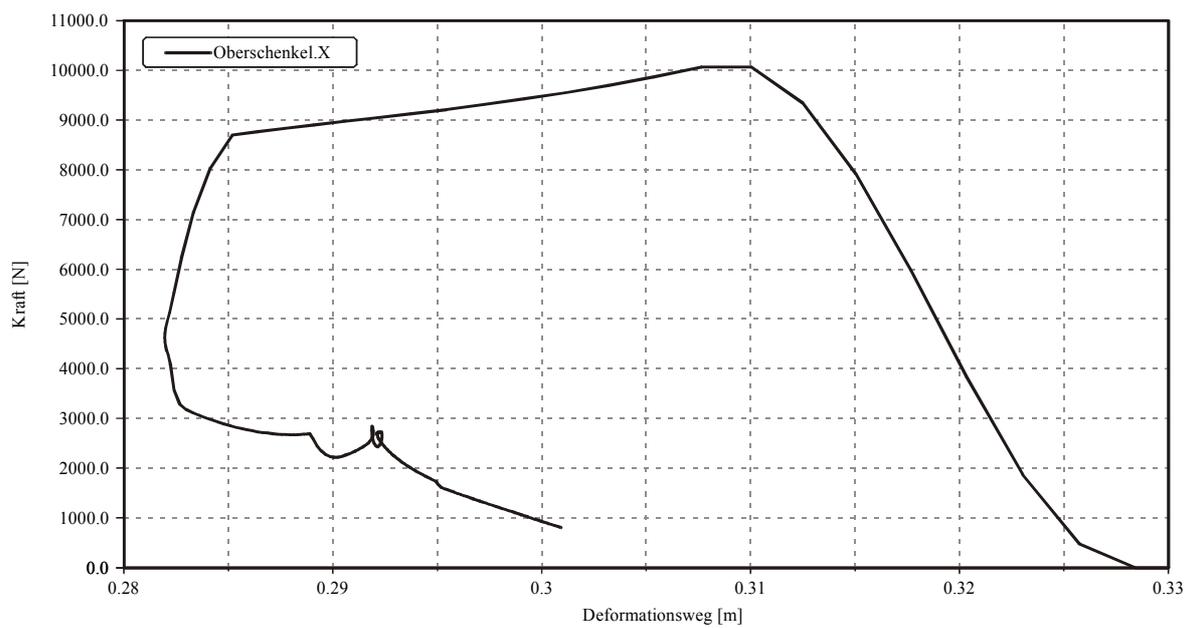


Abbildung C.18: Reihenbestuhlung, Modellvariante B2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf die Sitzlehne des Vordersitzes

C.1.5 Modellvariante B3

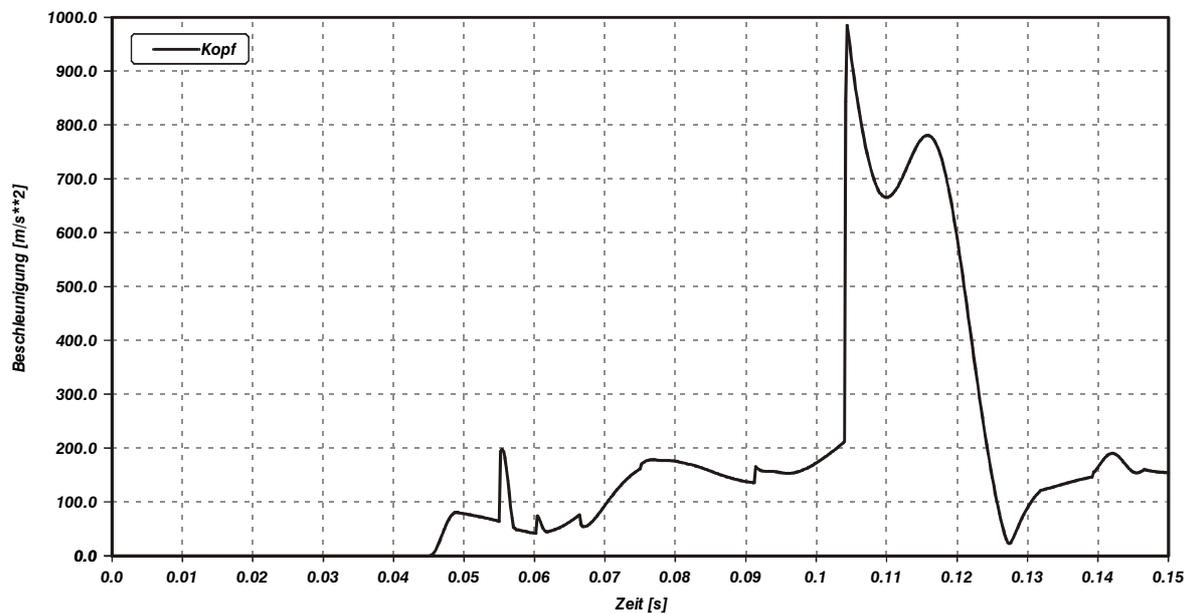


Abbildung C.19: Reihenbestuhlung, Modellvariante B3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

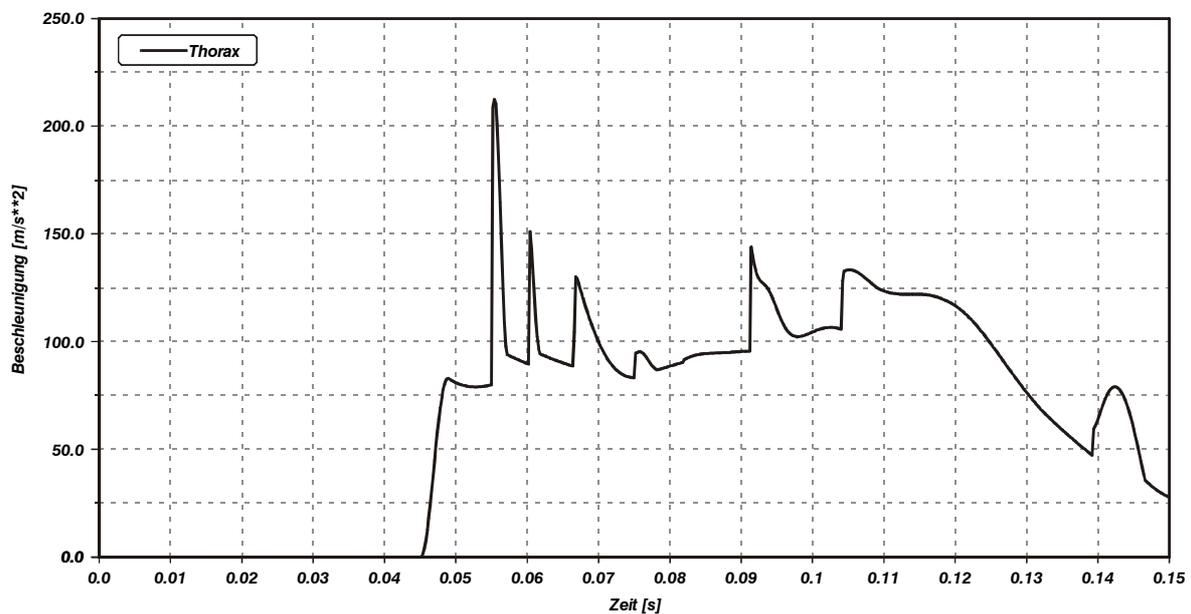


Abbildung C.20: Reihenbestuhlung, Modellvariante B3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

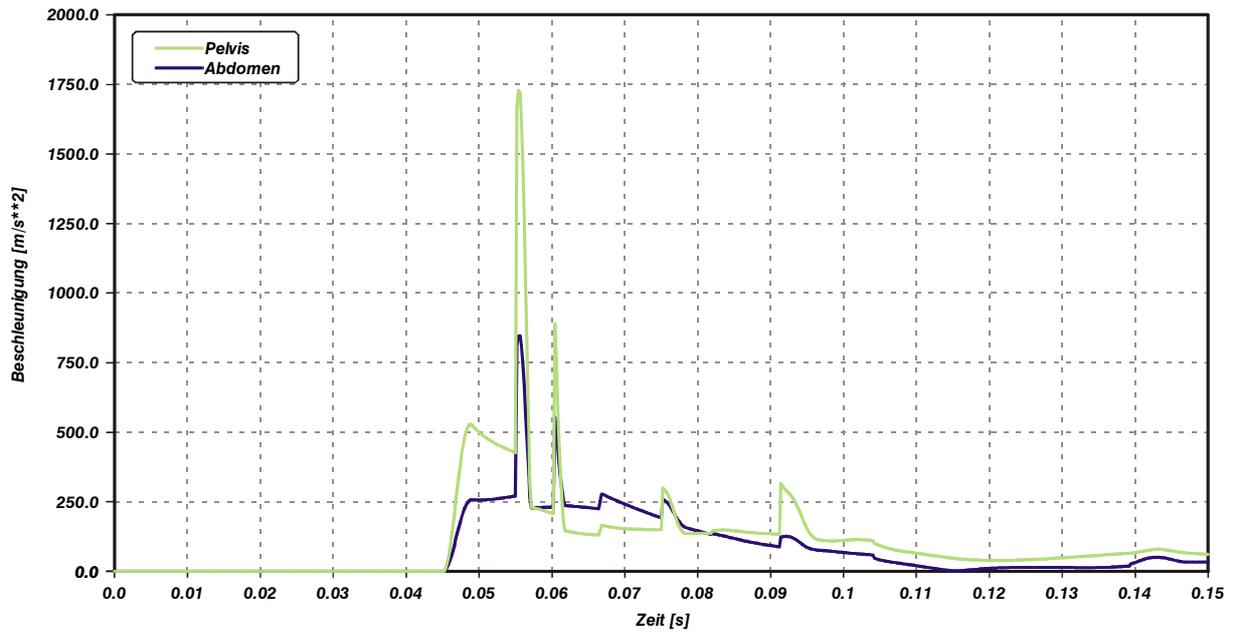


Abbildung C.21: Reihenbestuhlung, Modellvariante B3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

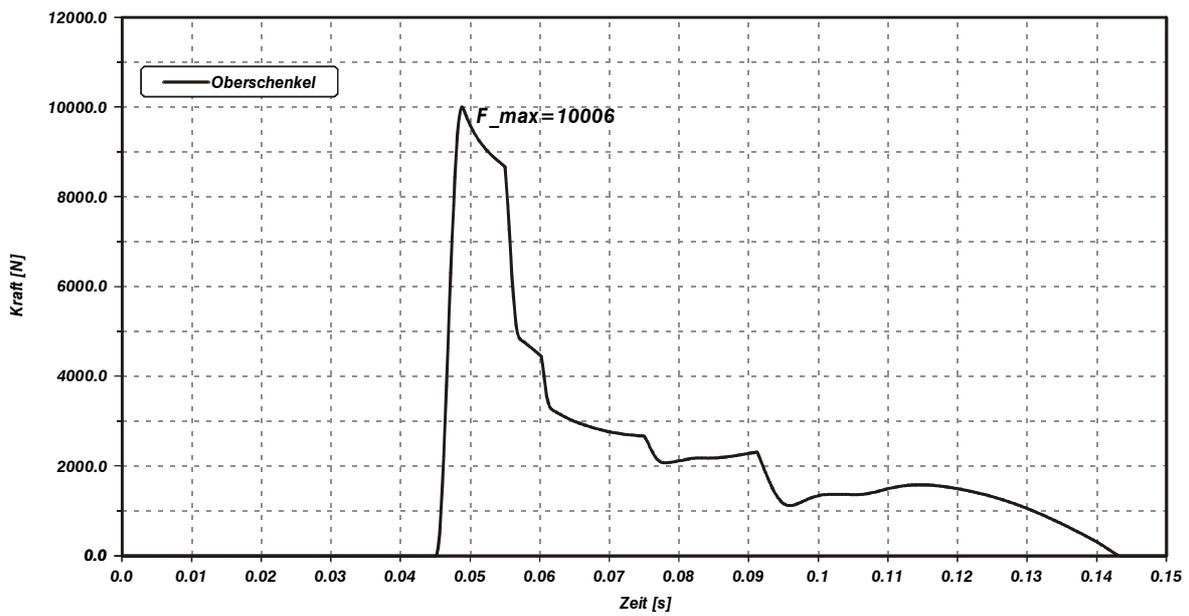


Abbildung C.22: Reihenbestuhlung, Modellvariante B3: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes

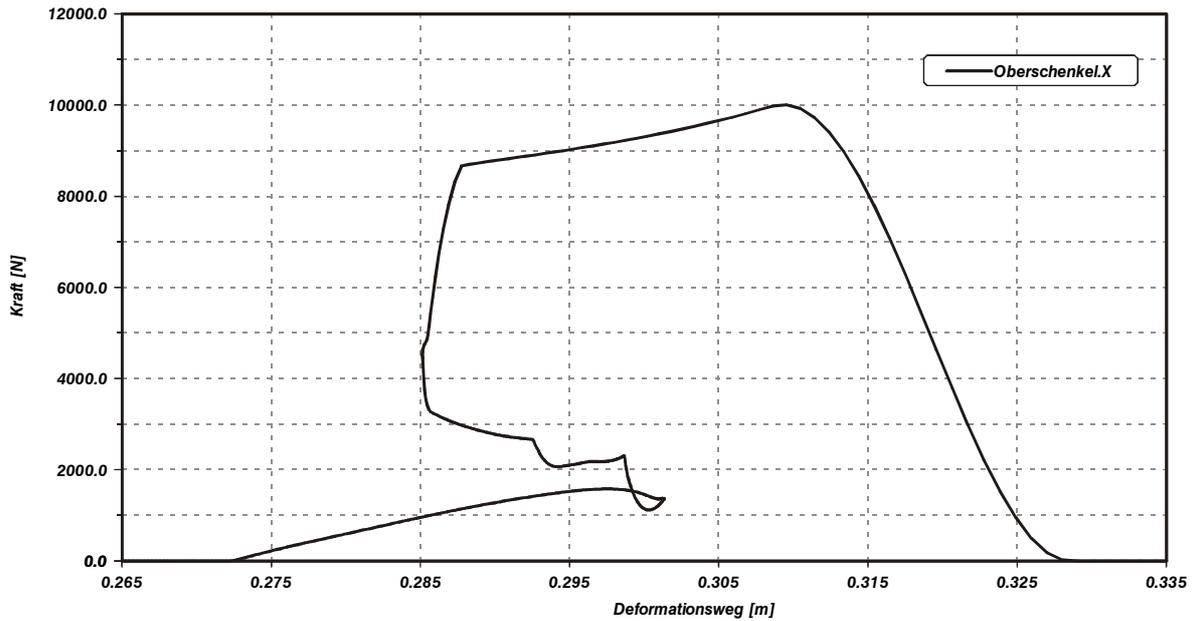


Abbildung C.23: Reihenbestuhlung, Modellvariante B3: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf die Sitzlehne des Vordersitzes

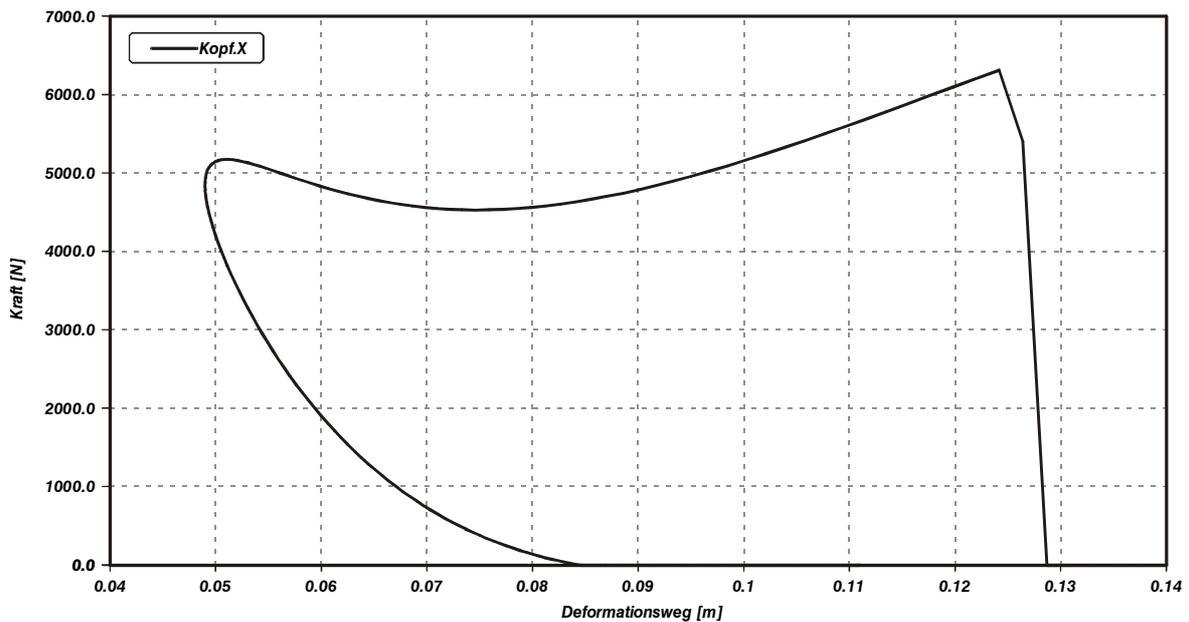


Abbildung C.24: Reihenbestuhlung, Modellvariante B3: Kraft-Weg-Charakteristik für den Kopf-Anprall auf die Sitzlehne des Vordersitzes

C.1.6 Modellvariante C1

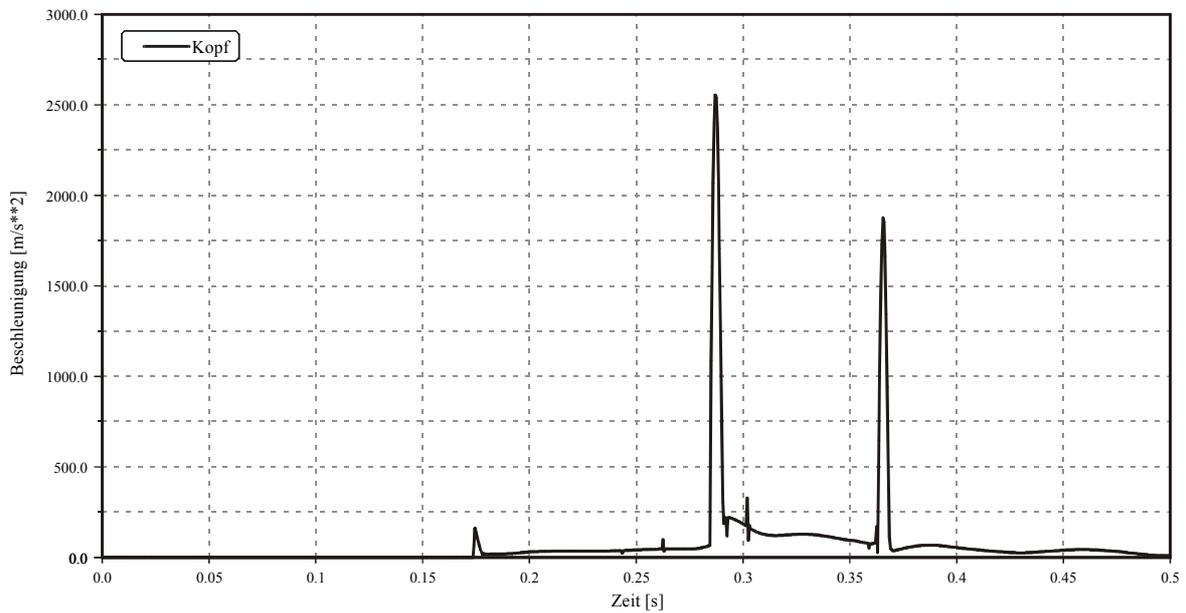


Abbildung C.25: Reihenbestuhlung, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

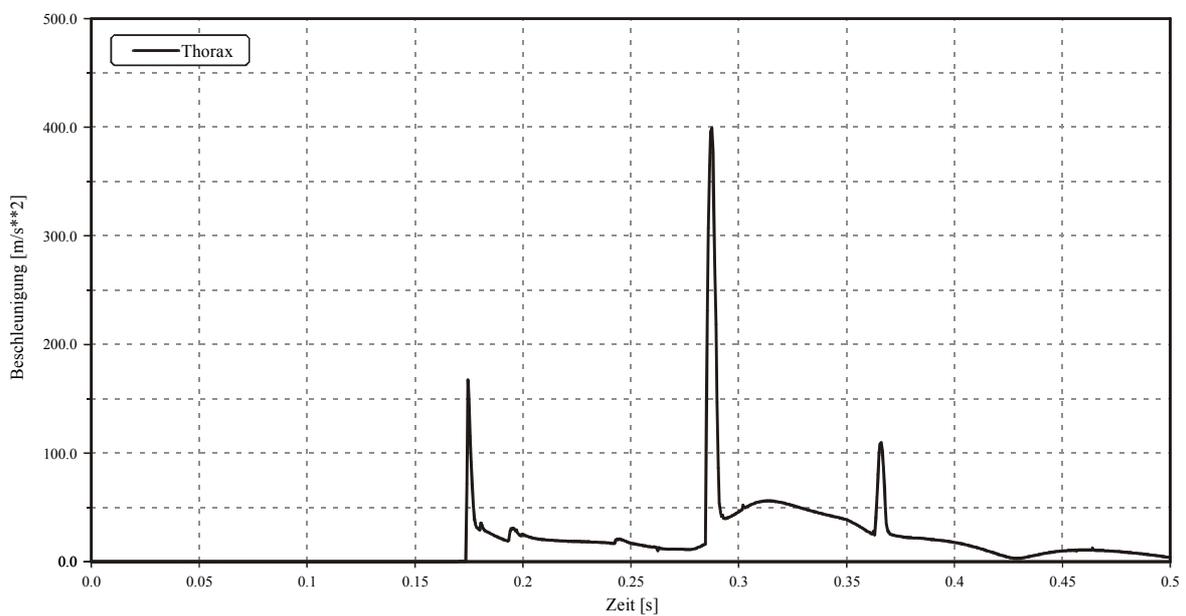


Abbildung C.26: Reihenbestuhlung, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

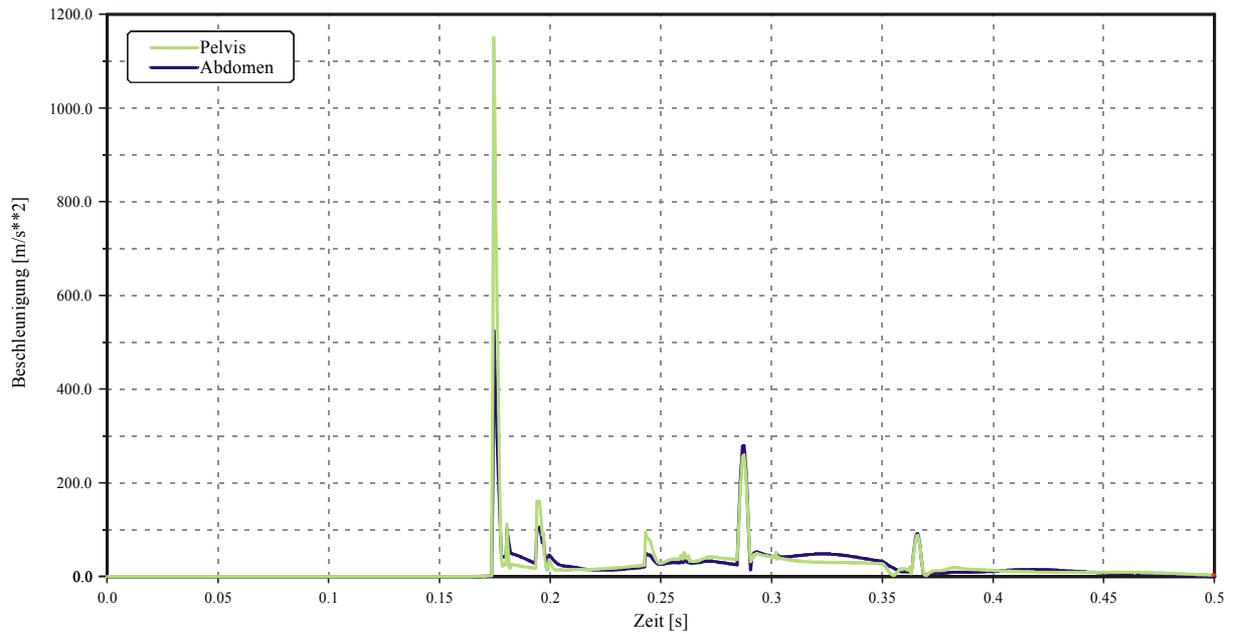


Abbildung C.27: Reihenbestuhlung, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

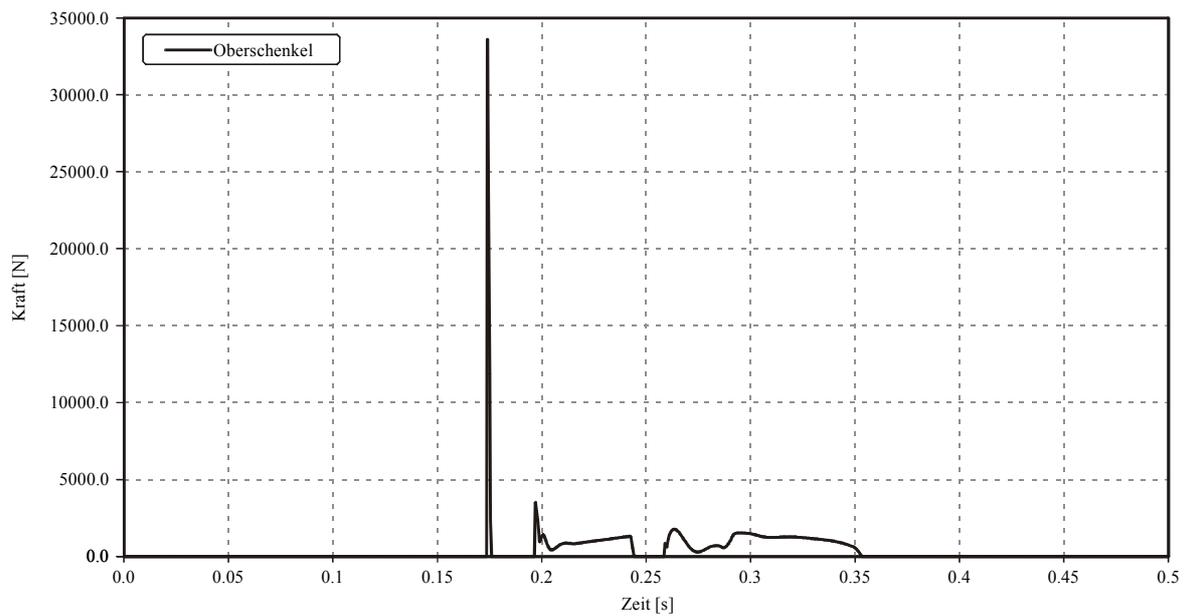


Abbildung C.28: Reihenbestuhlung, Modellvariante C1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes

C.1.7 Modellvariante C2

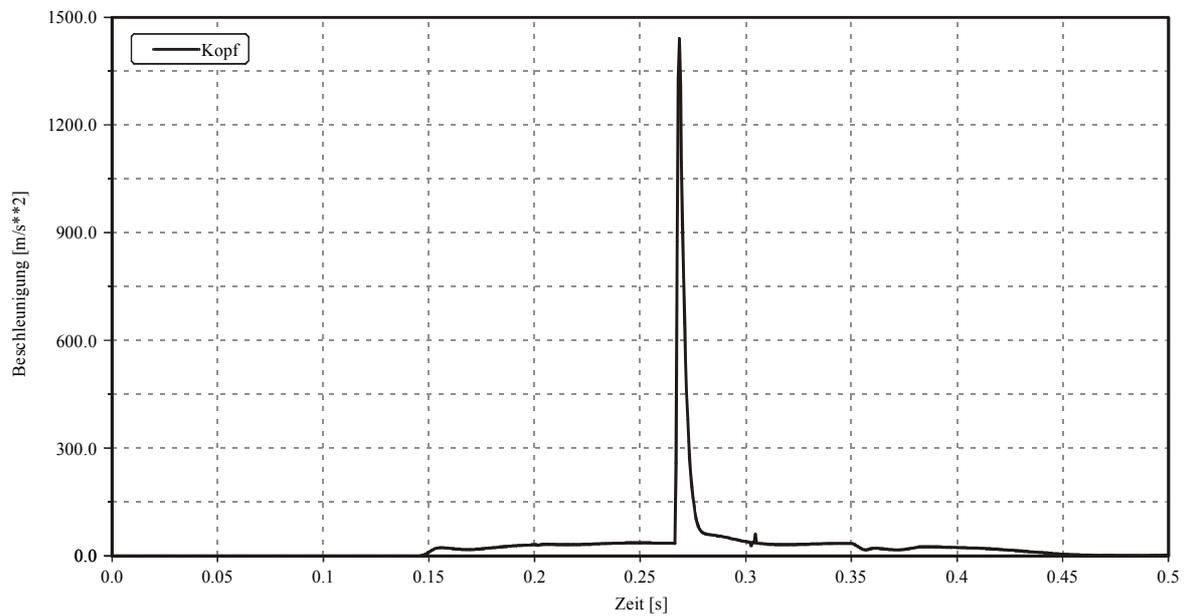


Abbildung C.29: Reihenbestuhlung, Modellvariante C2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

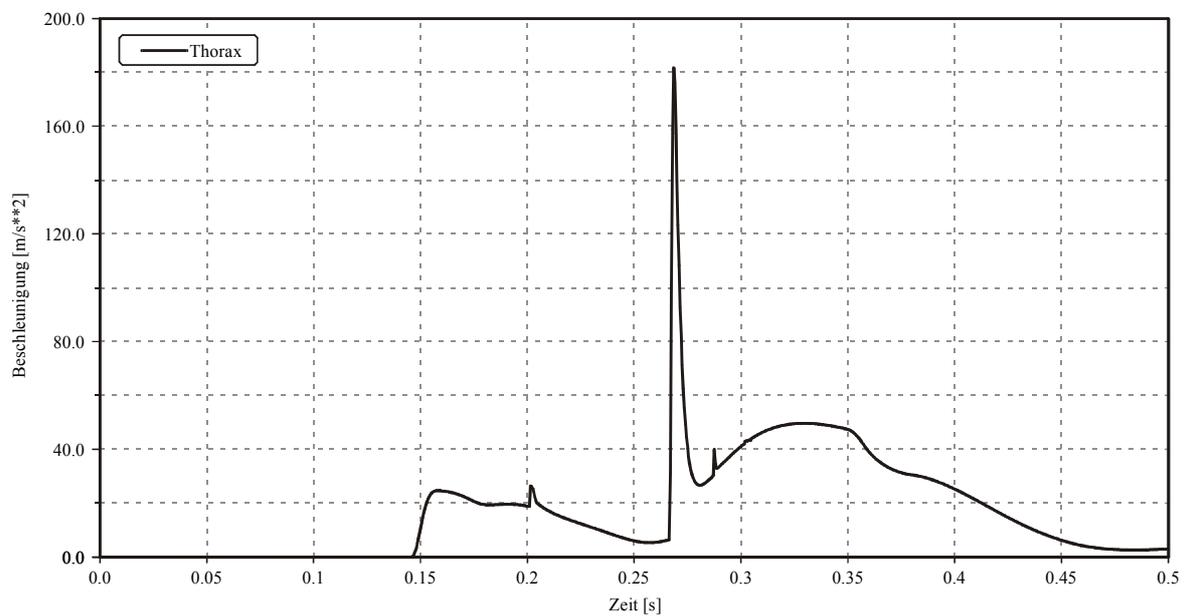


Abbildung C.30: Reihenbestuhlung, Modellvariante C2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

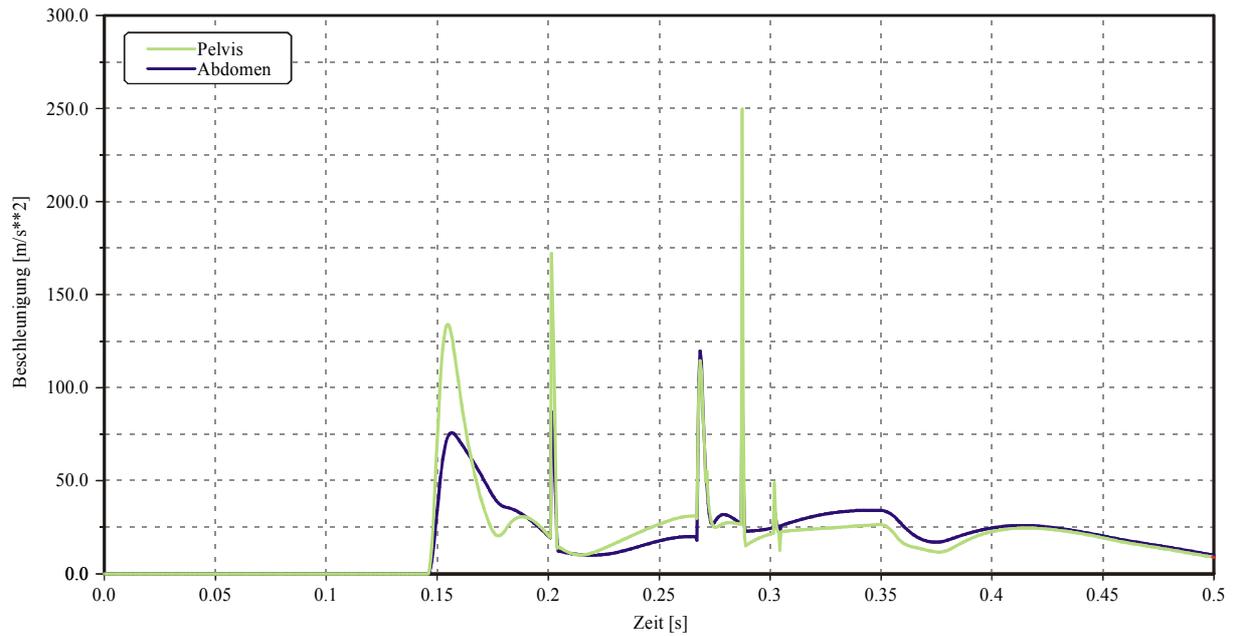


Abbildung C.31: Reihenbestuhlung, Modellvariante C2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

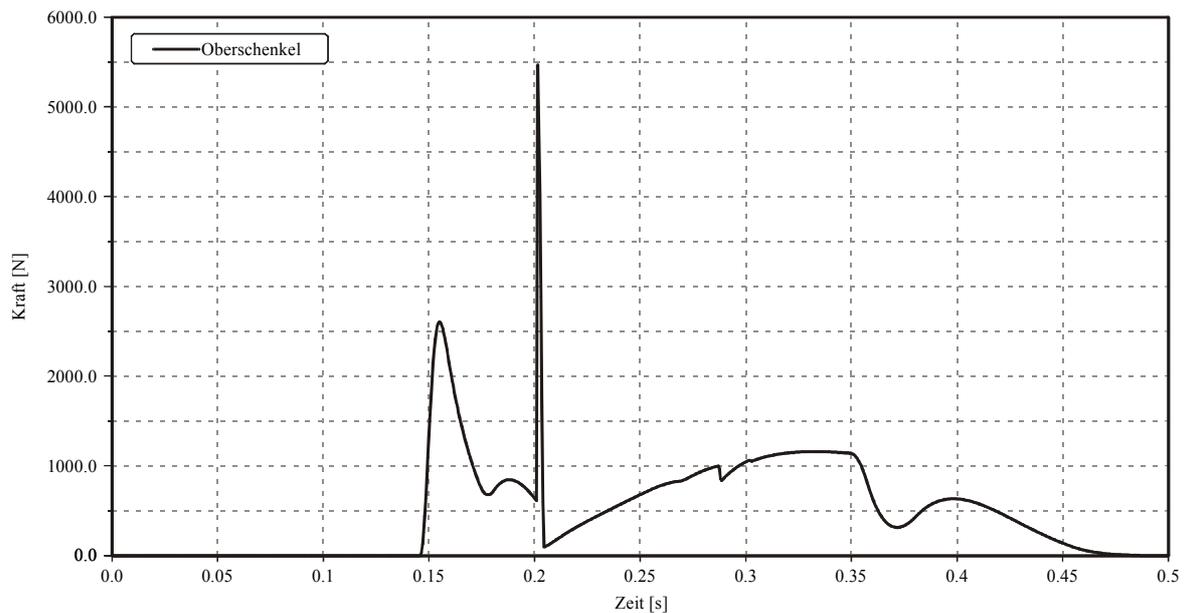


Abbildung C.32: Reihenbestuhlung, Modellvariante C2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf die Rückenlehne des Vordersitzes

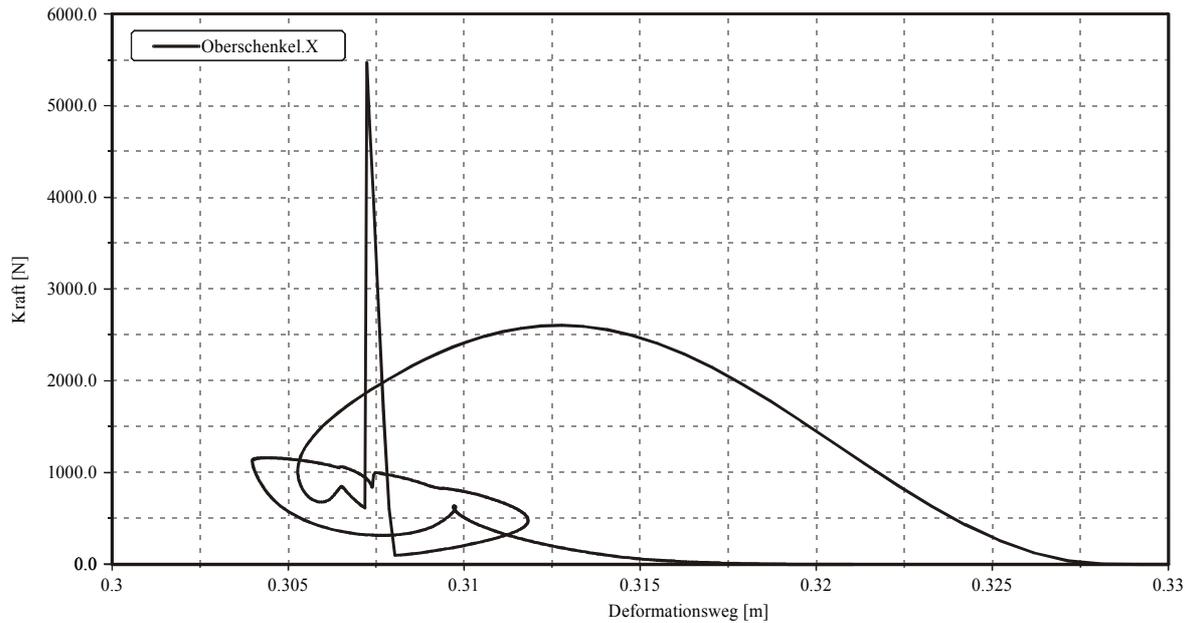


Abbildung C.33: Reihenbestuhlung, Modellvariante C2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf die Sitzlehne des Vordersitzes

C.2 Insassensimulationsrechnungen: Abteilbestuhlung ohne Tisch

C.2.1 Modellvariante A1

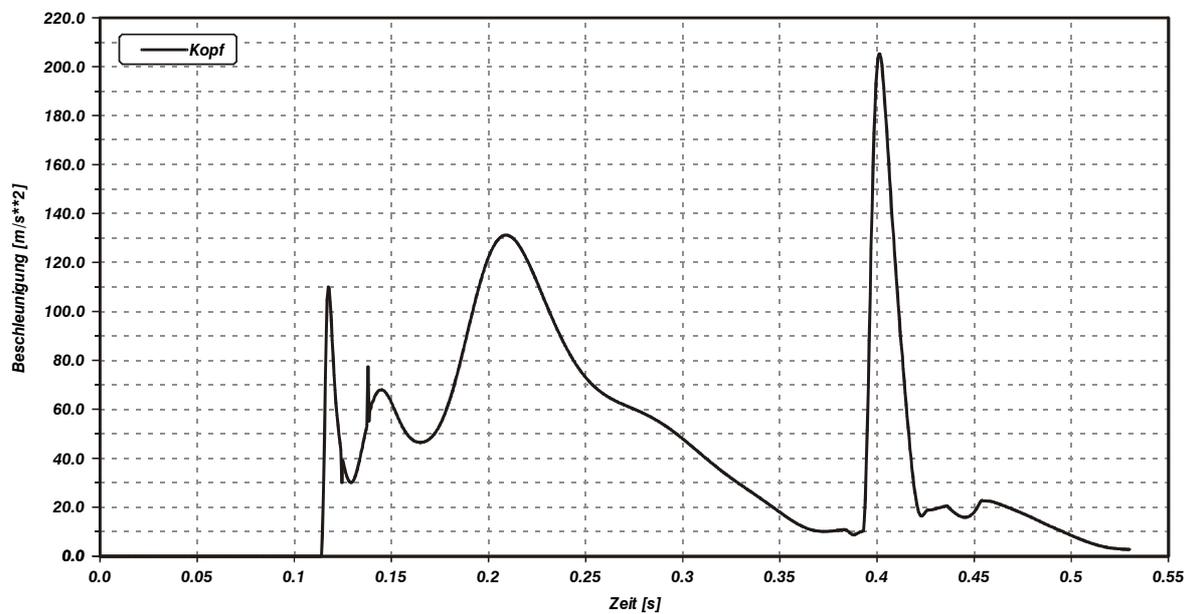


Abbildung C.34: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

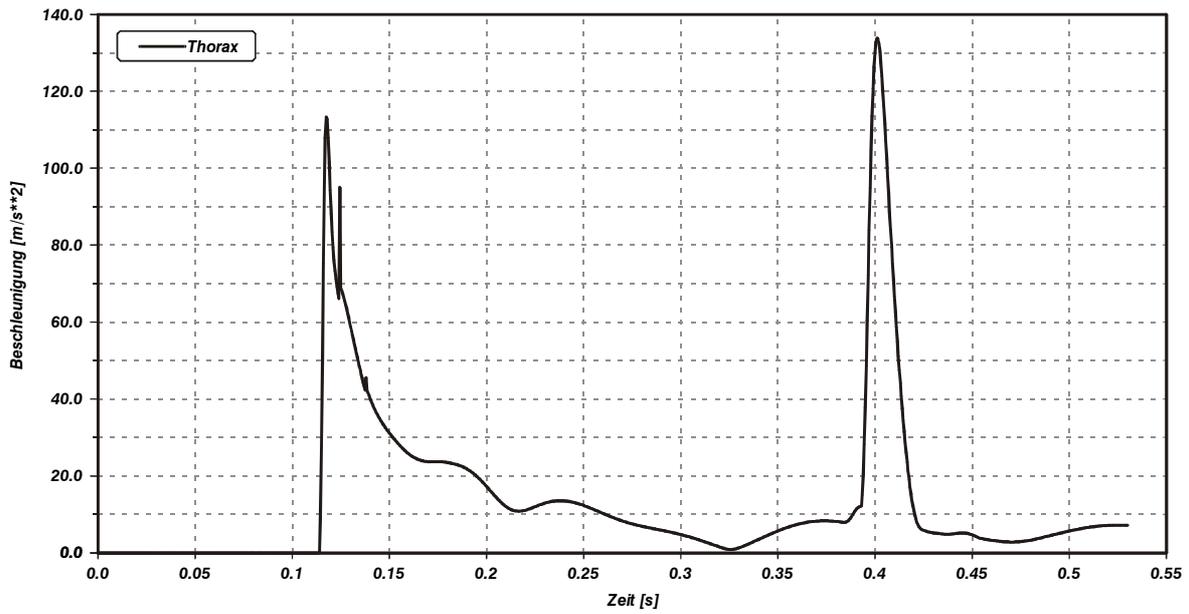


Abbildung C.35: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

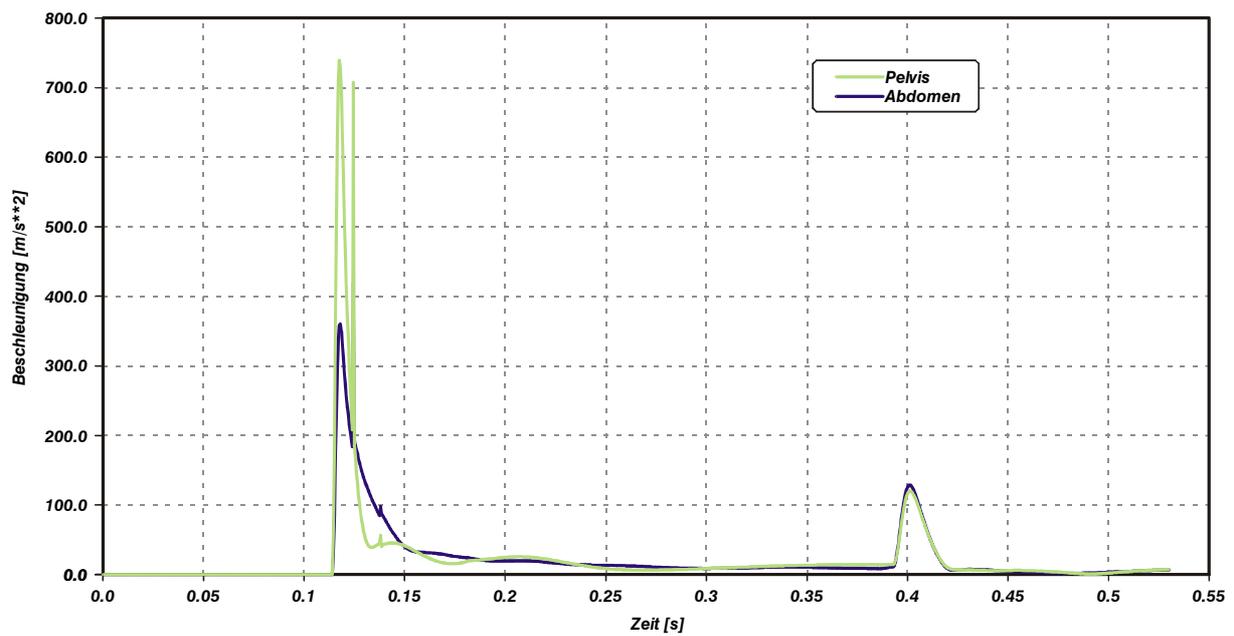


Abbildung C.36: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

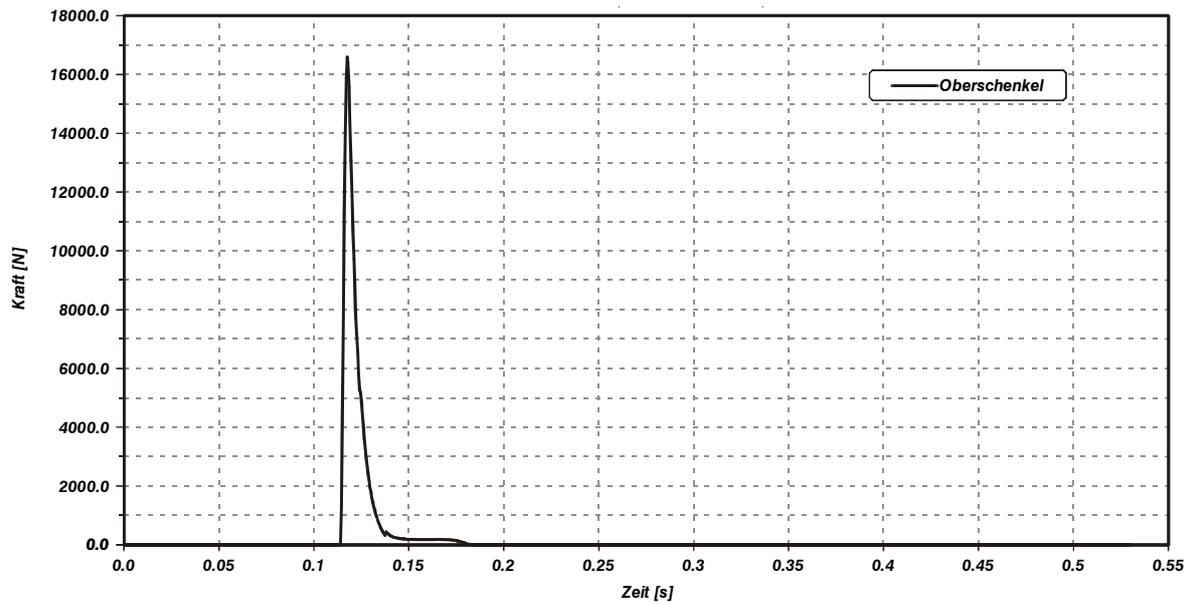


Abbildung C.37: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz

C.2.2 Modellvariante A2

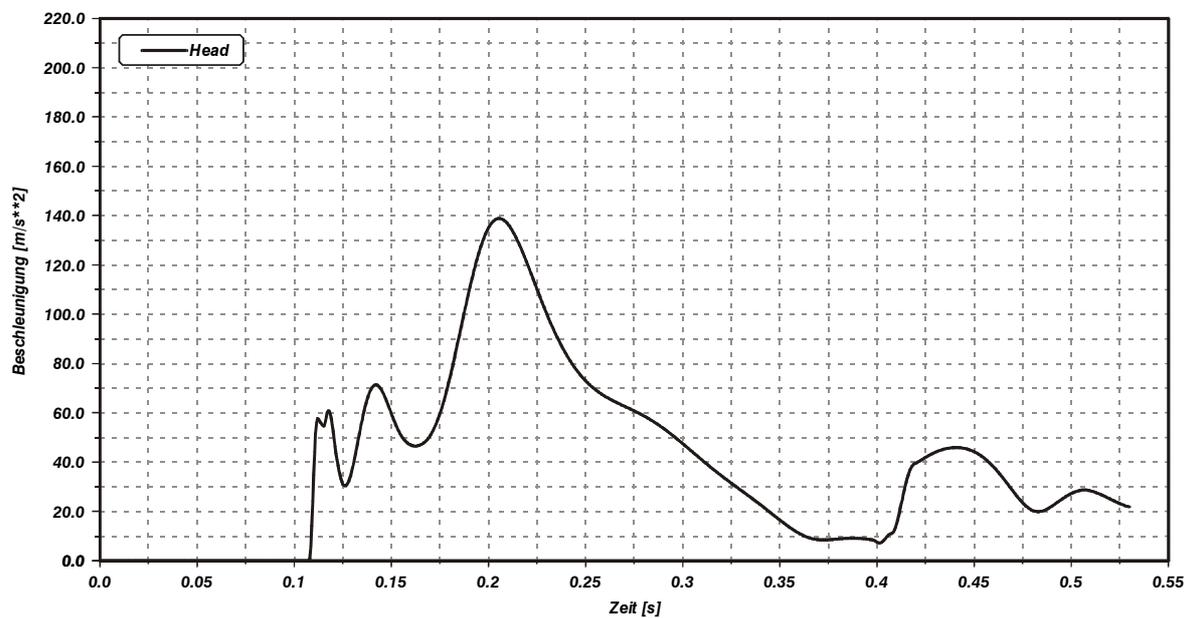


Abbildung C.38: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

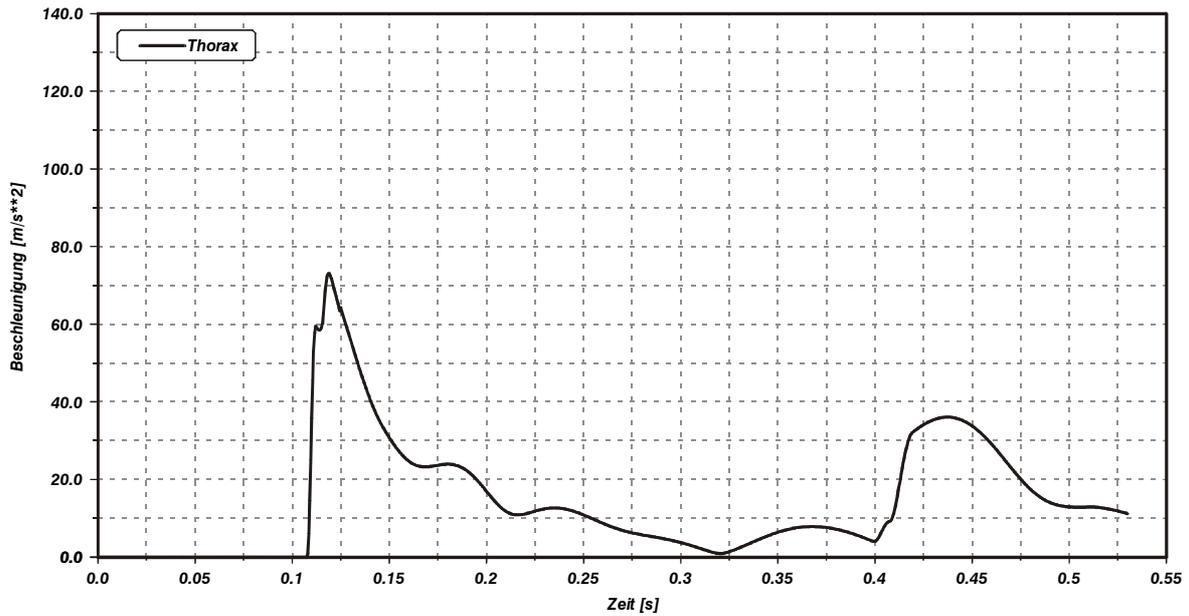


Abbildung C.39: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

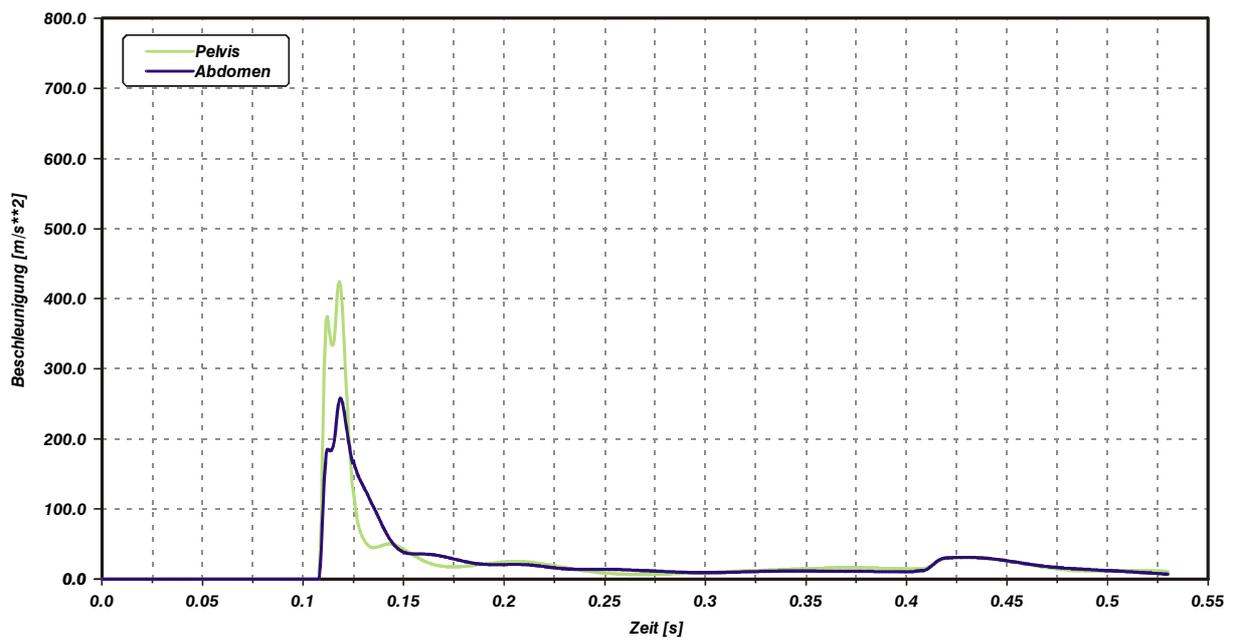


Abbildung C.40: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

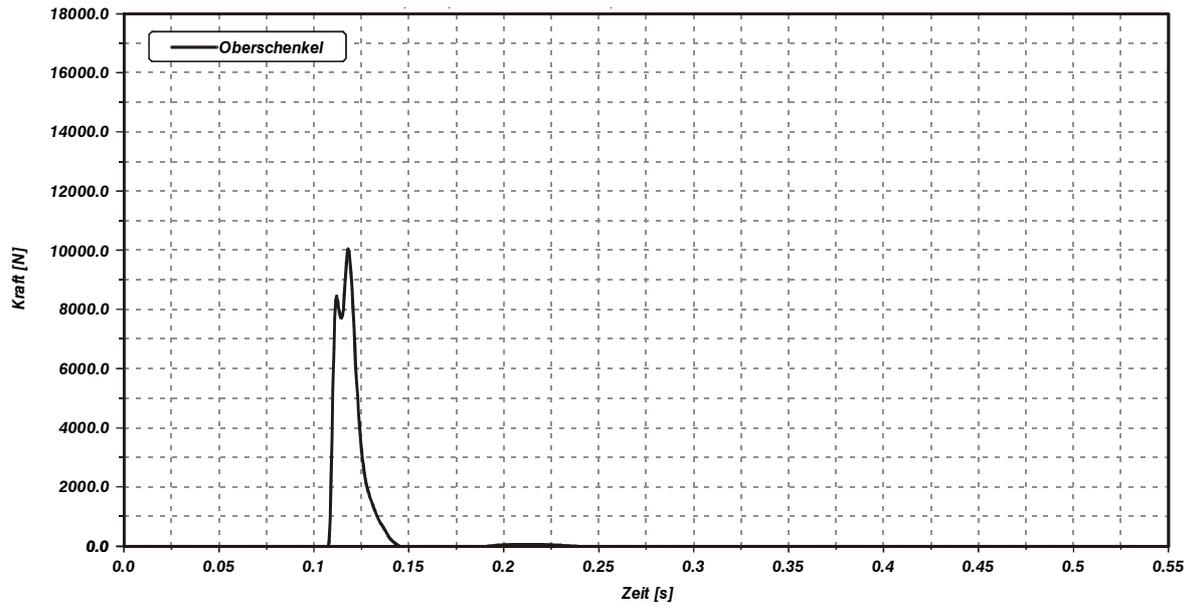


Abbildung C.41: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz

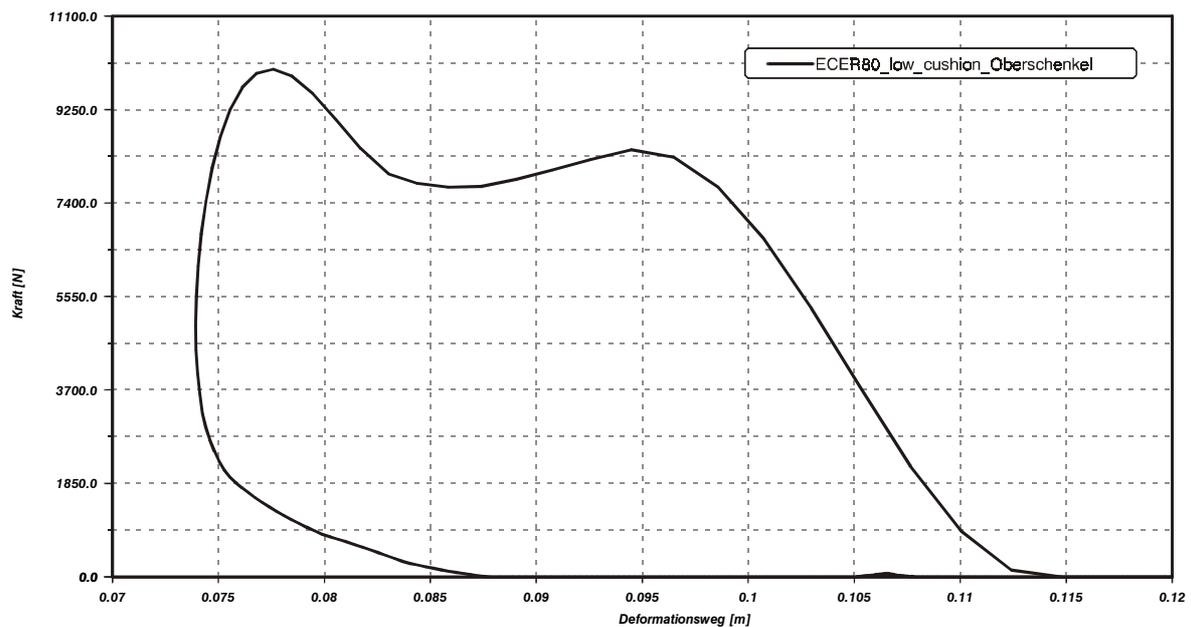


Abbildung C.42: Abteil ohne Tisch, Modellvariante A2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz

C.2.3 Modellvariante B1

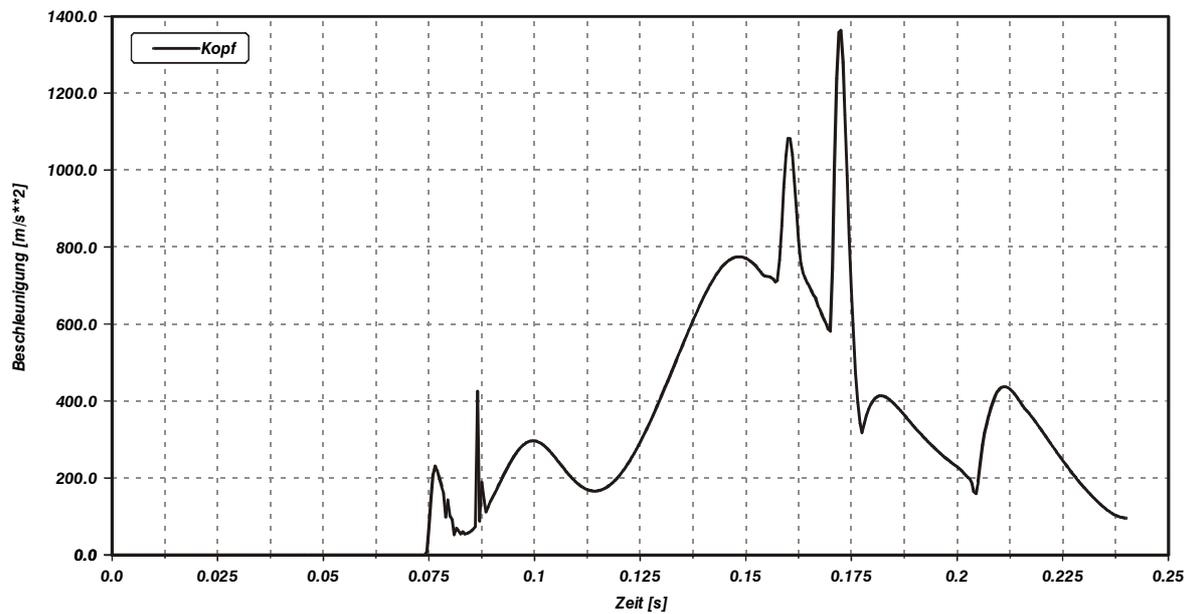


Abbildung C.43: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

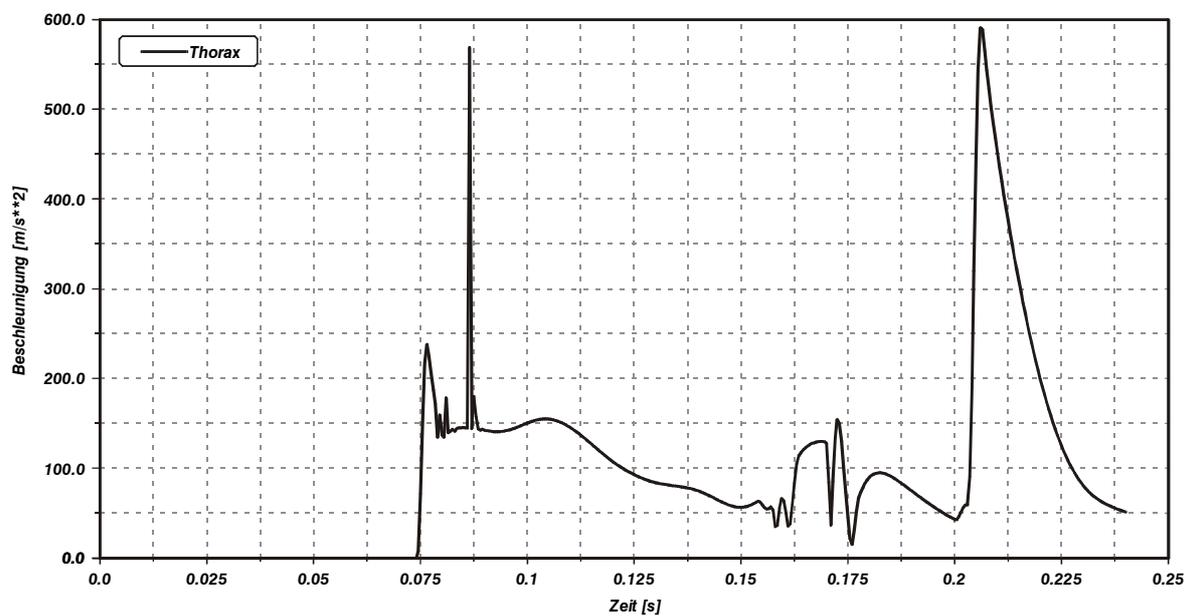


Abbildung C.44: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

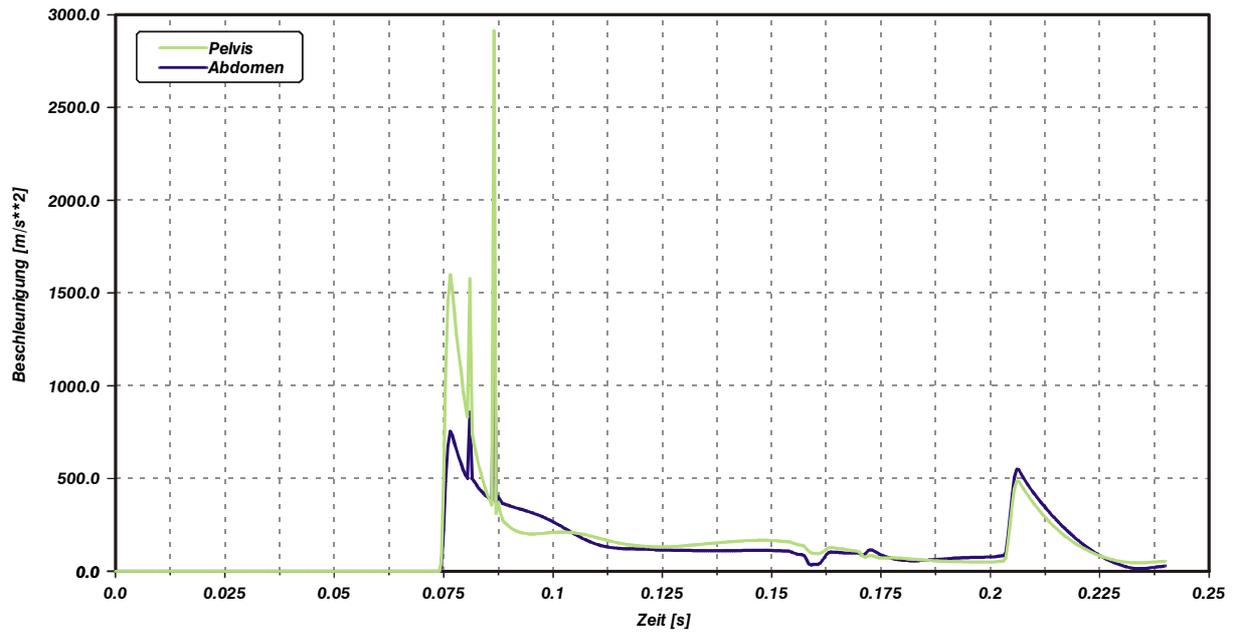


Abbildung C.45: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

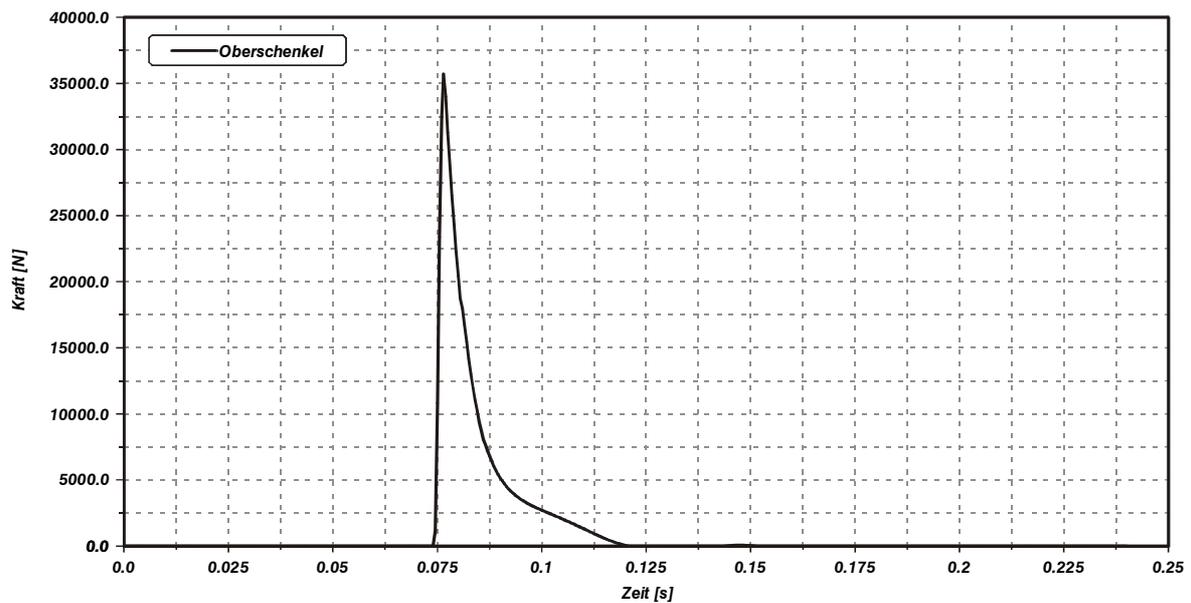


Abbildung C.46: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz

C.2.4 Modellvariante B2

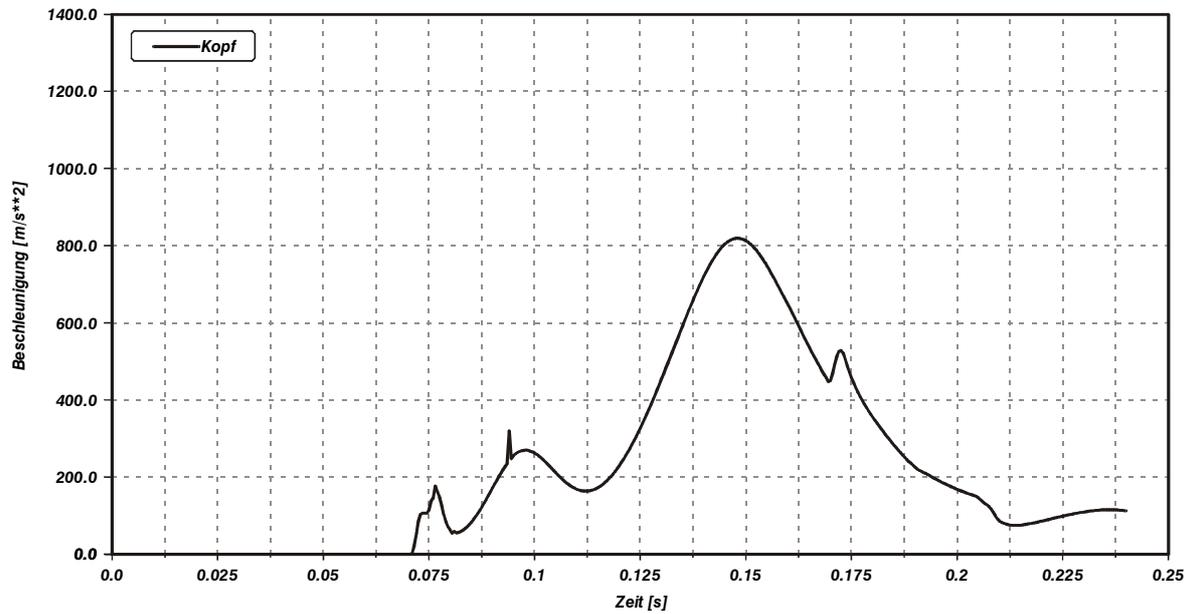


Abbildung C.47: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

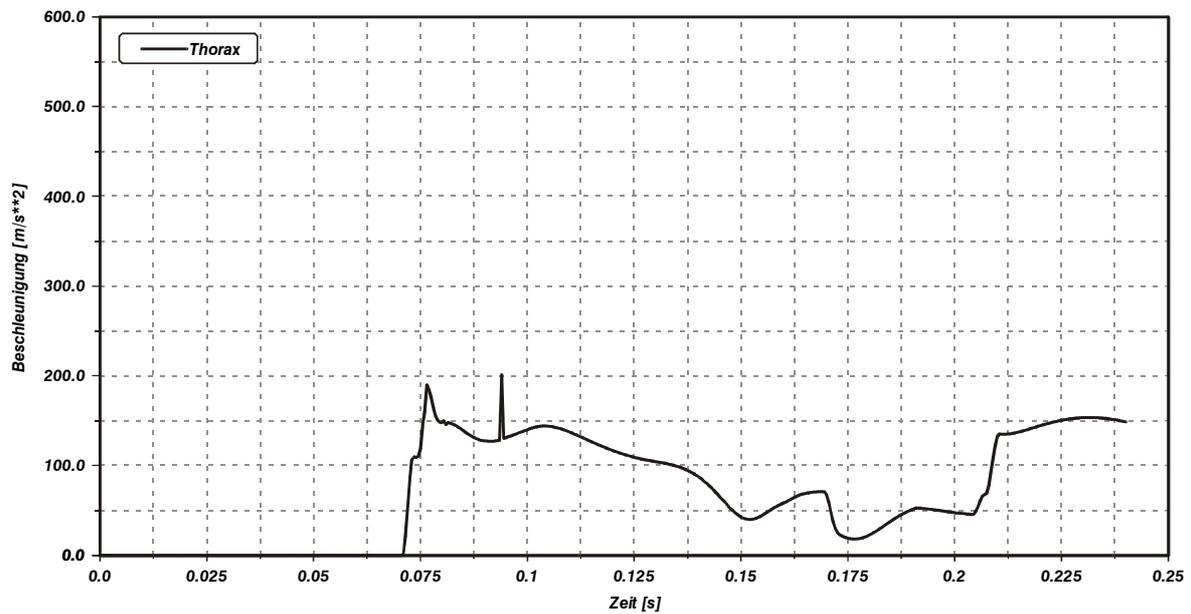


Abbildung C.48: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

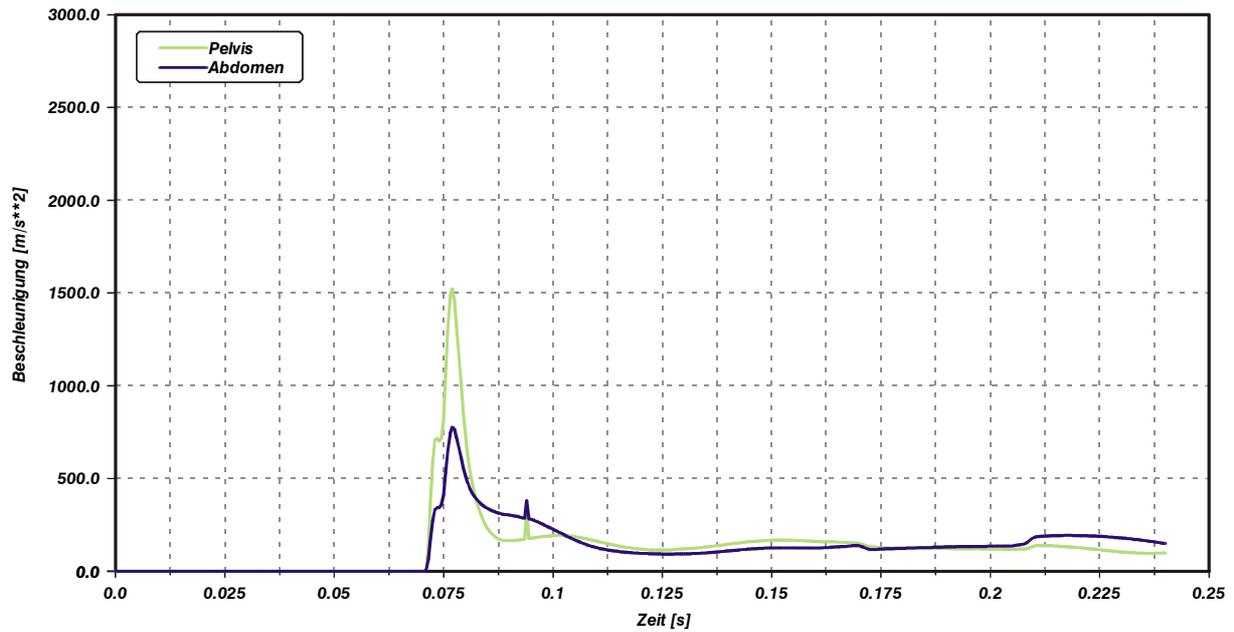


Abbildung C.49: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

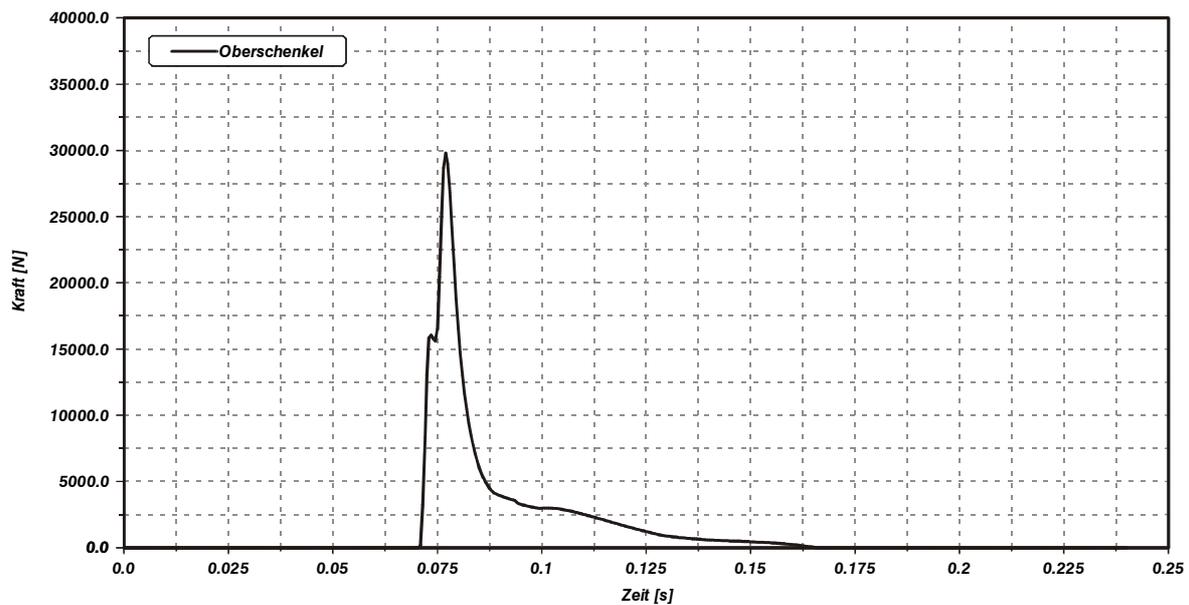


Abbildung C.50: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz

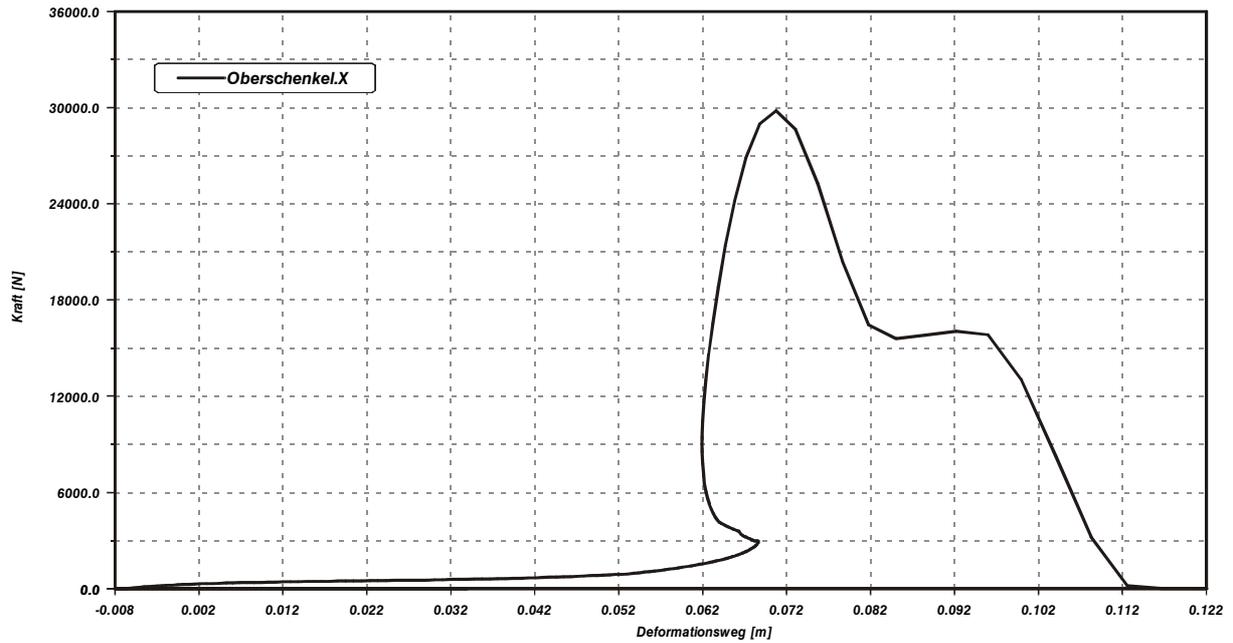


Abbildung C.51: Abteil ohne Tisch, Modellvariante B2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz

C.2.5 Modellvariante C1

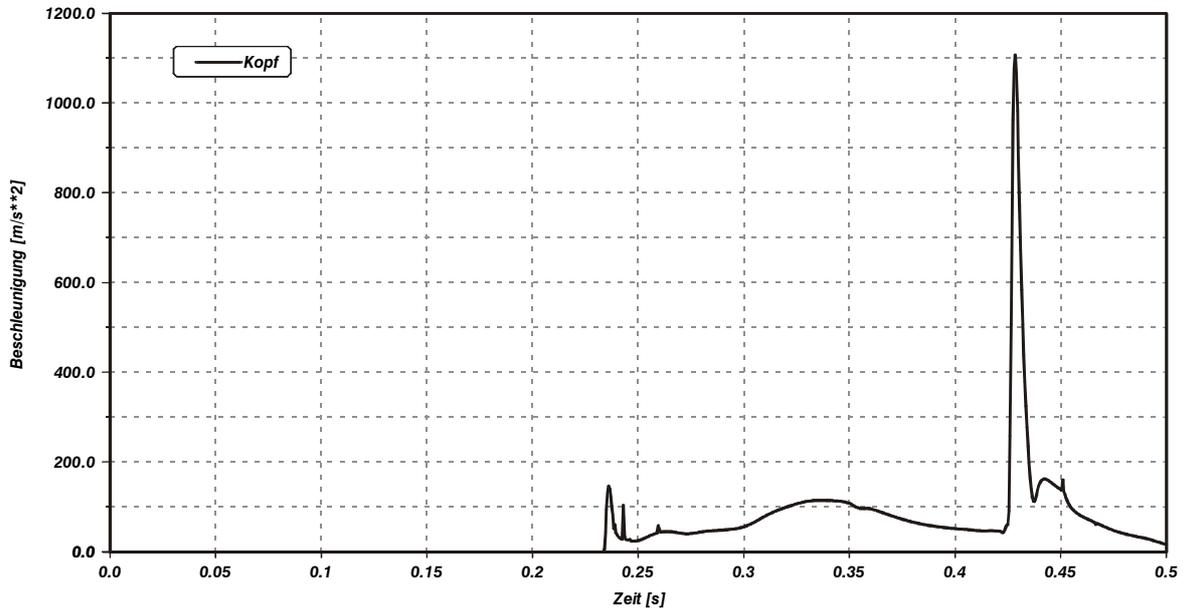


Abbildung C.52: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

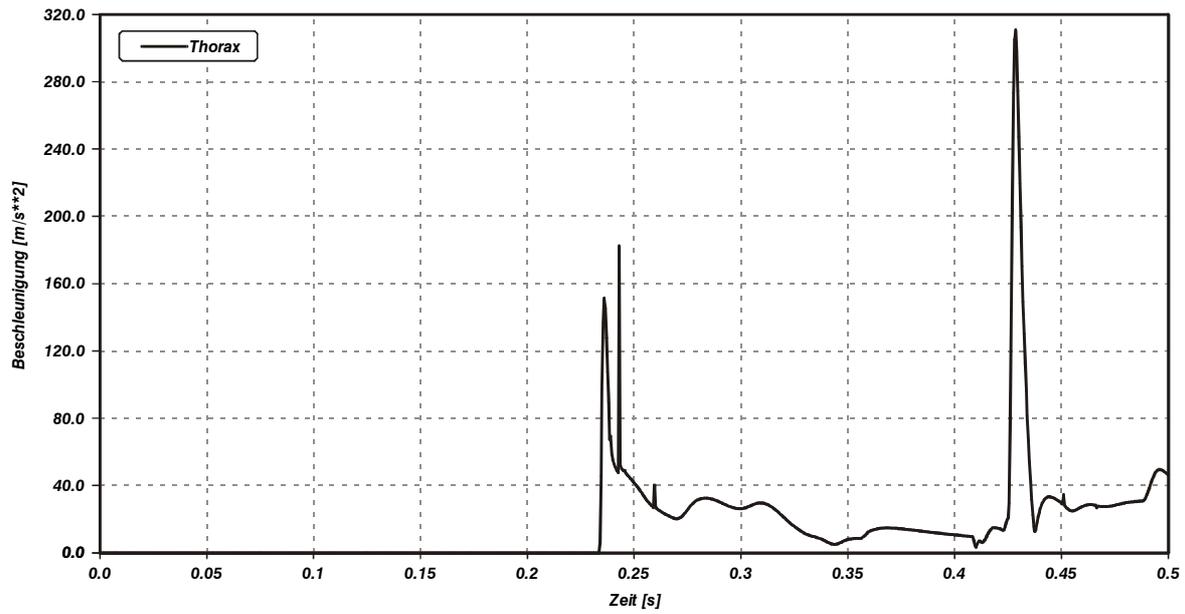


Abbildung C.53: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

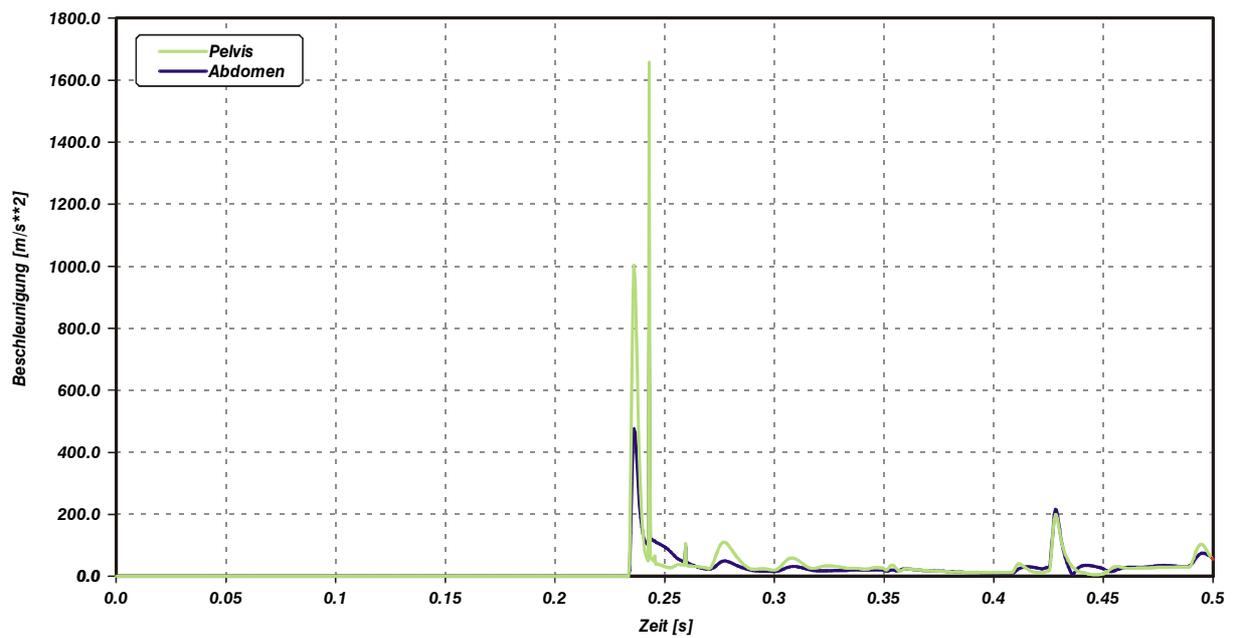


Abbildung C.54: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

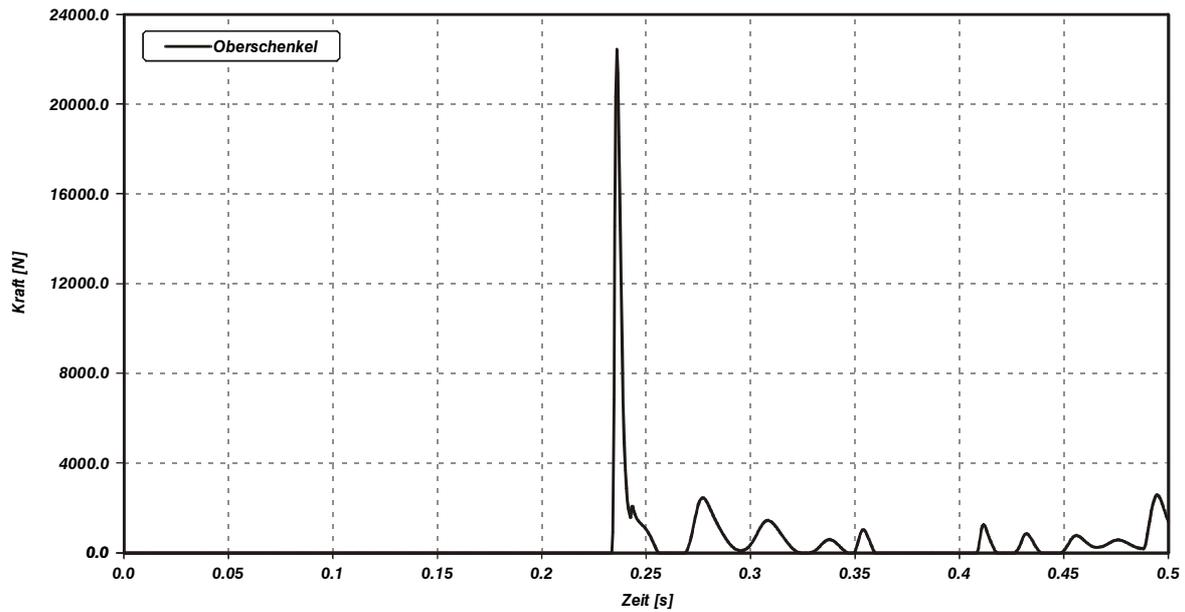


Abbildung C.55: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz

C.2.6 Modellvariante C2

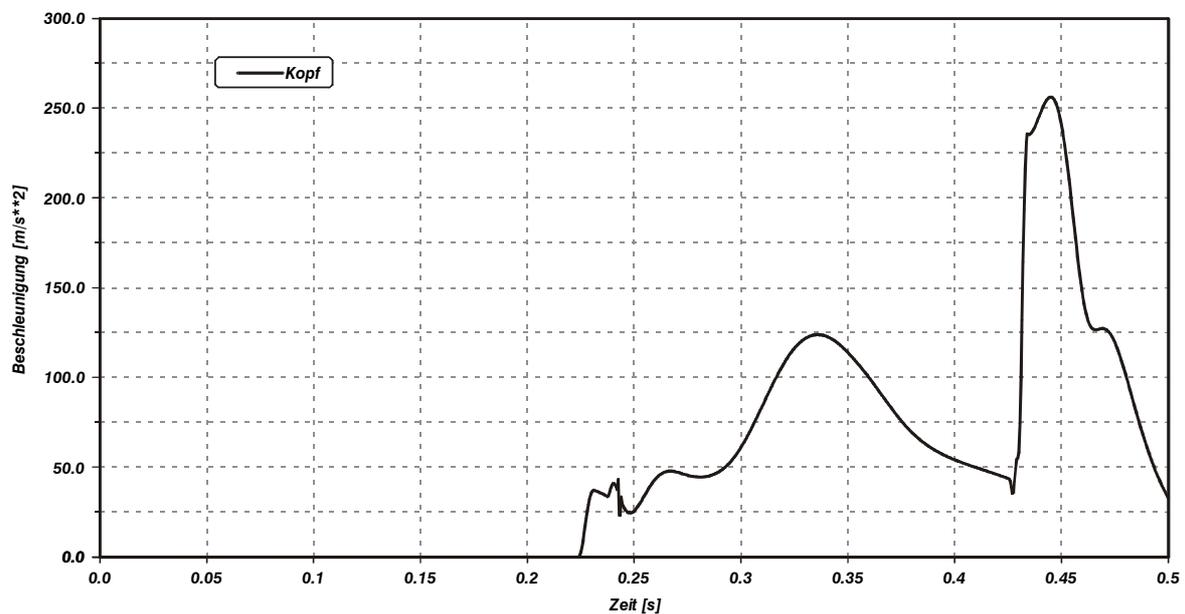


Abbildung C.56: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

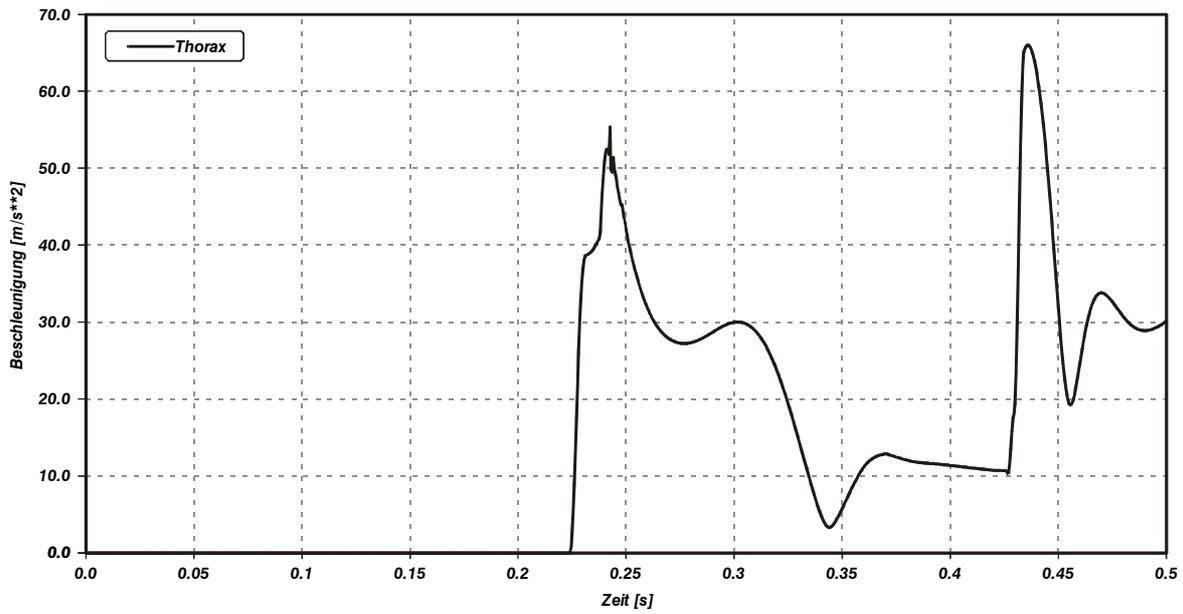


Abbildung C.57: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

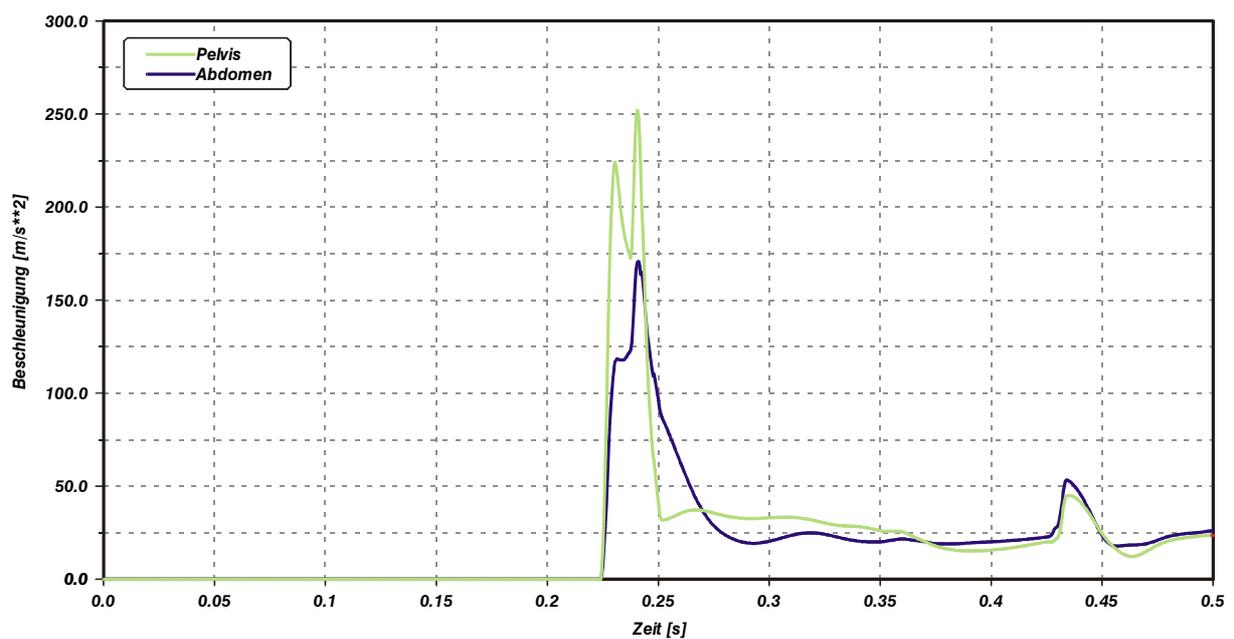


Abbildung C.58: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

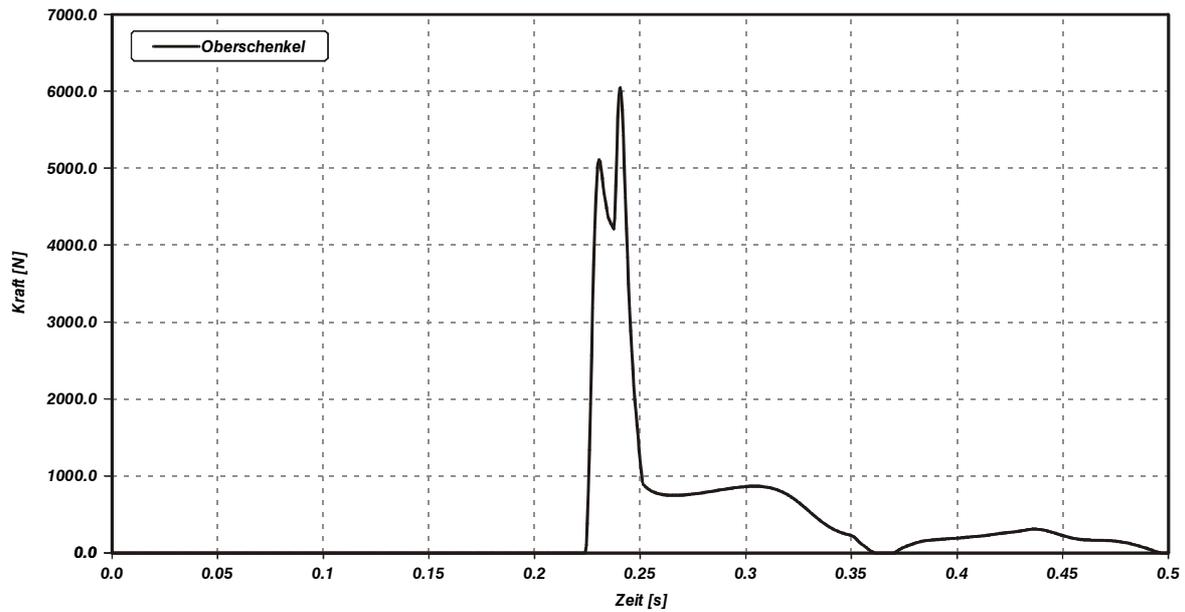


Abbildung C.59: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Oberschenkel beim Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz

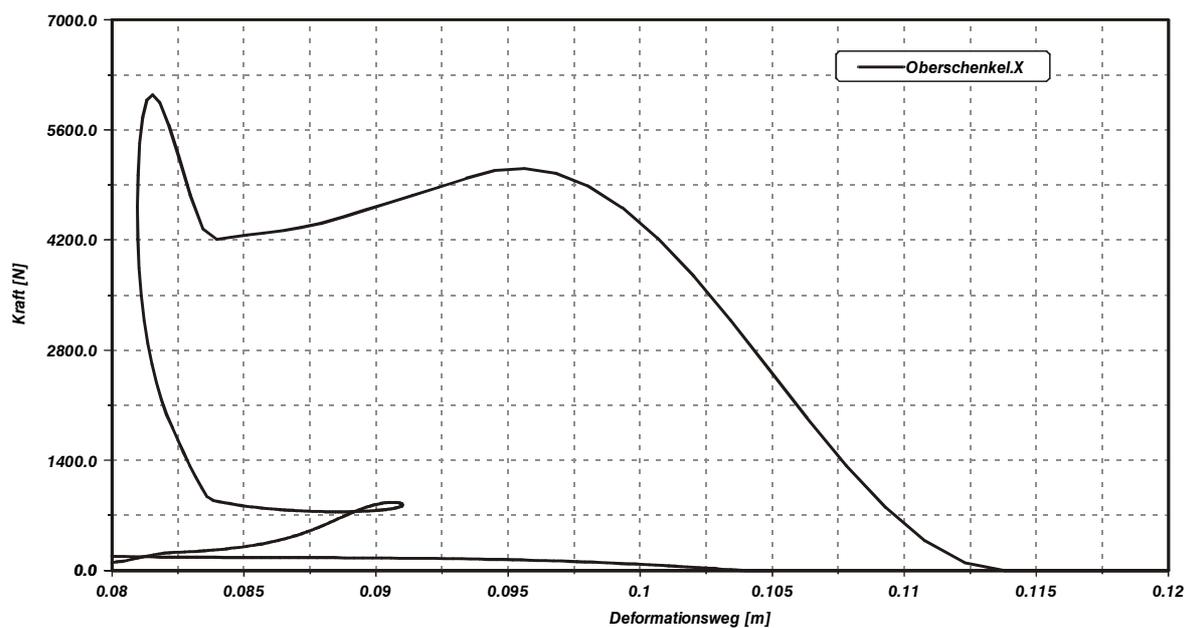


Abbildung C.60: Abteil ohne Tisch, Modellvariante C2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Oberschenkel-Anprall auf den gegenüberliegenden Sitz

C.3 Insassensimulationsrechnungen: Abteilbestuhlung mit Tisch

C.3.1 Modellvariante A1

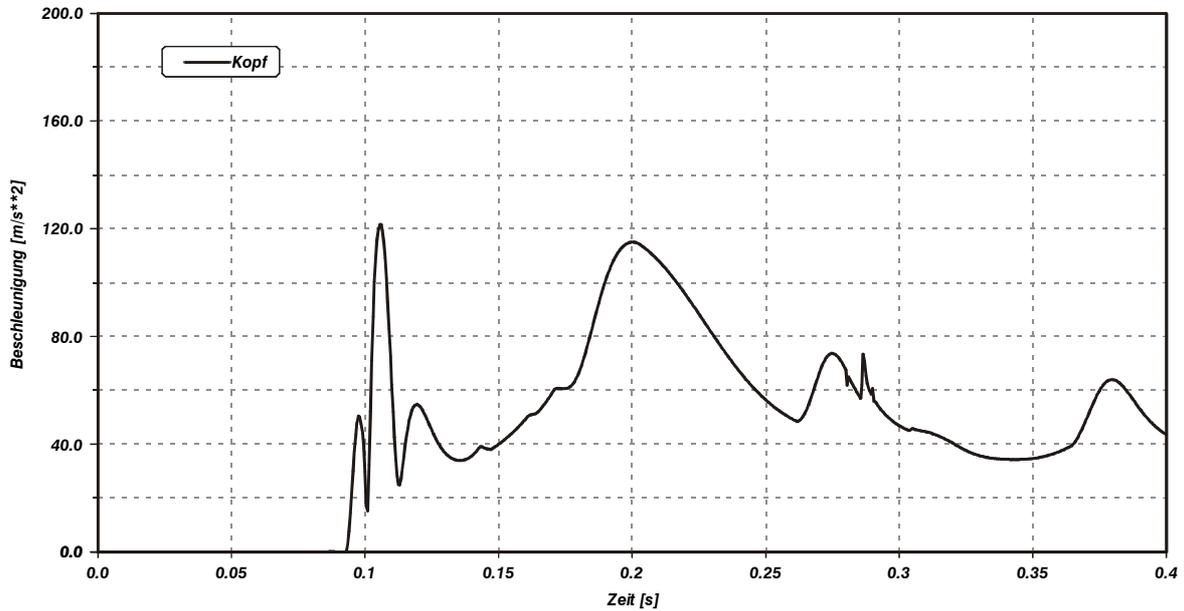


Abbildung C.61: Abteil mit Tisch, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

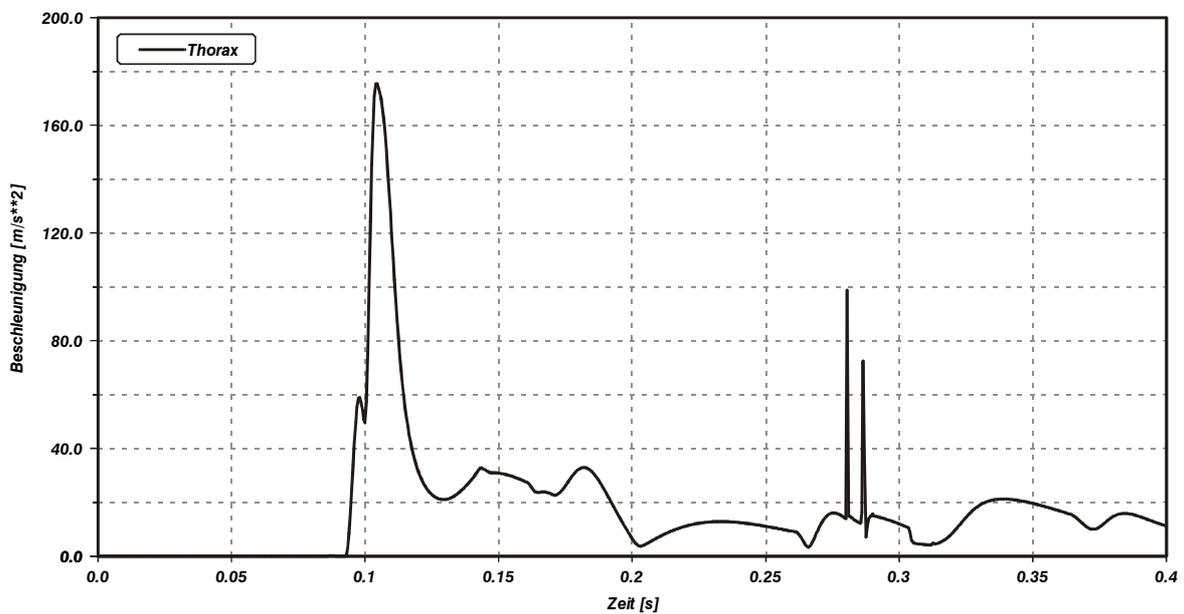


Abbildung C.62: Abteil mit Tisch, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

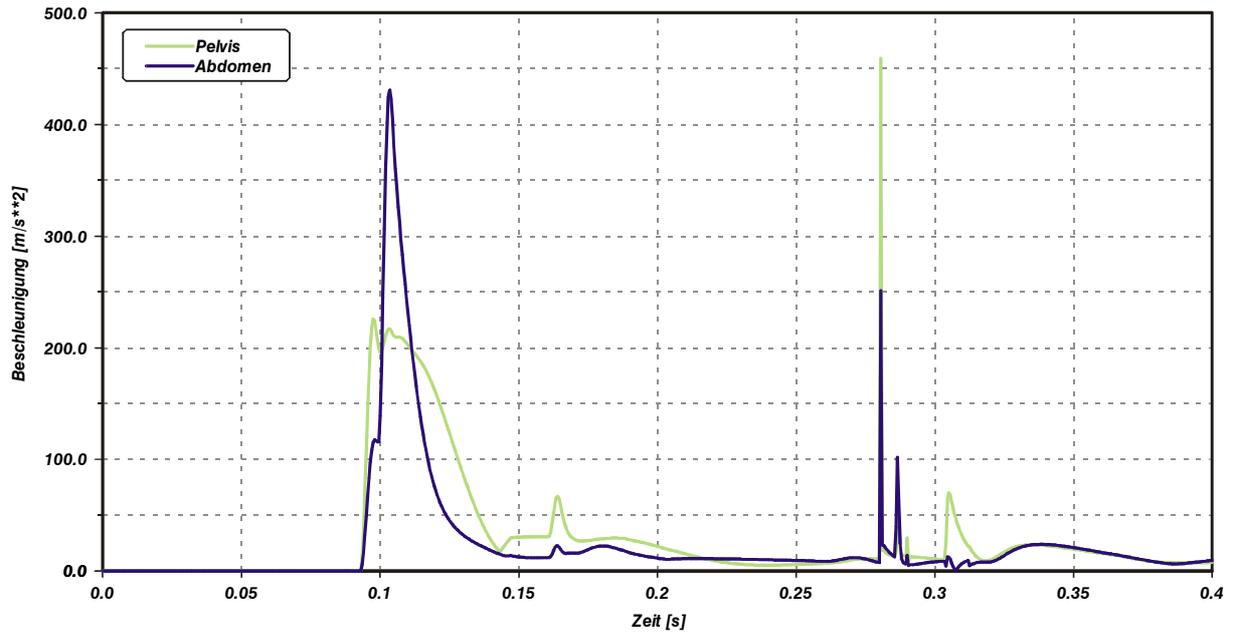


Abbildung C.63: Abteil mit Tisch, Modellvariante A1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

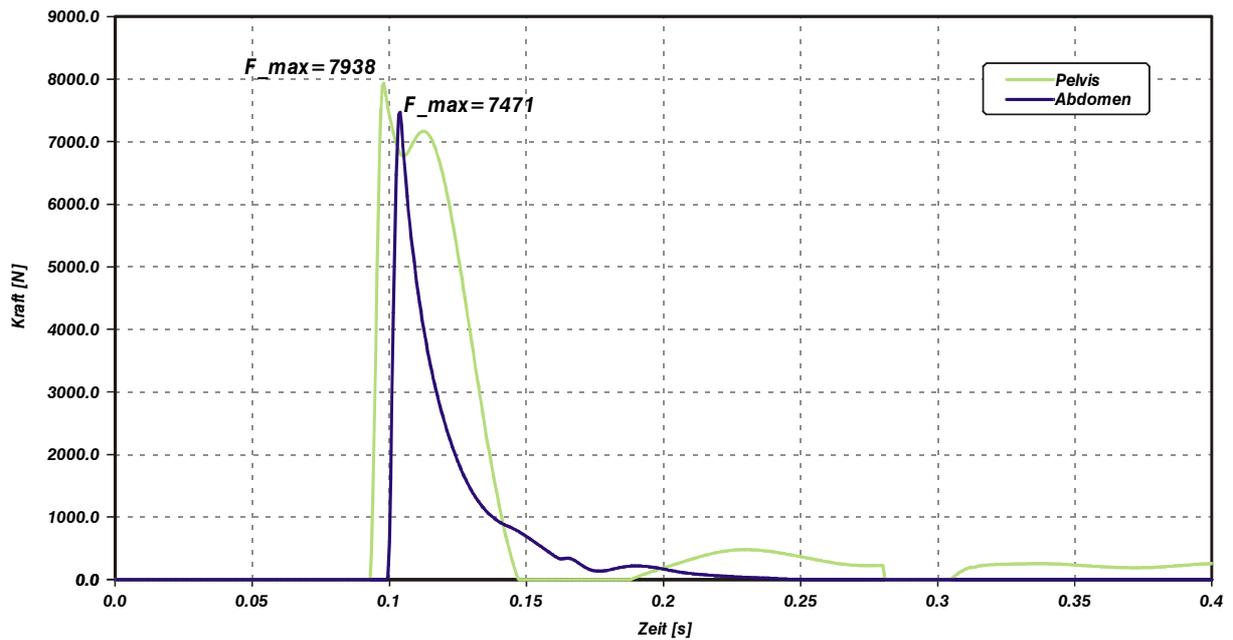


Abbildung C.64: Abteil mit Tisch, Modellvariante A1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Tischenprall von Becken/Abdomen

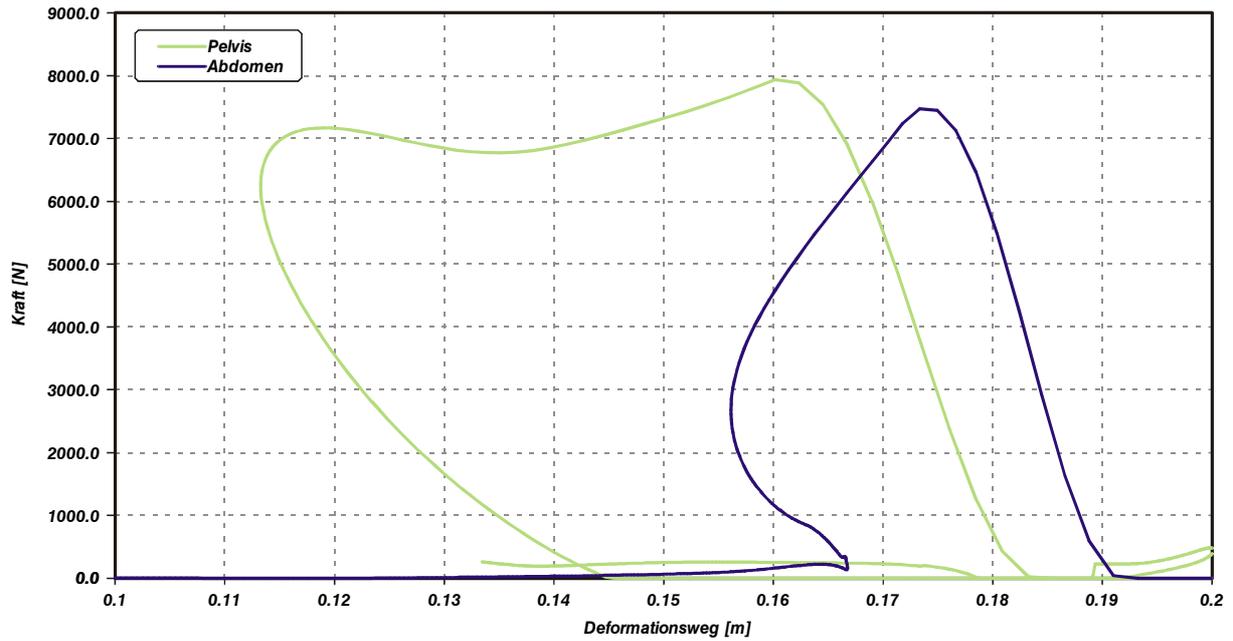


Abbildung C.65: Abteil mit Tisch, Modellvariante A1: Kraft-Weg-Charakteristik für den Tischanprall von Becken/Abdomen

C.3.2 Modellvariante B1

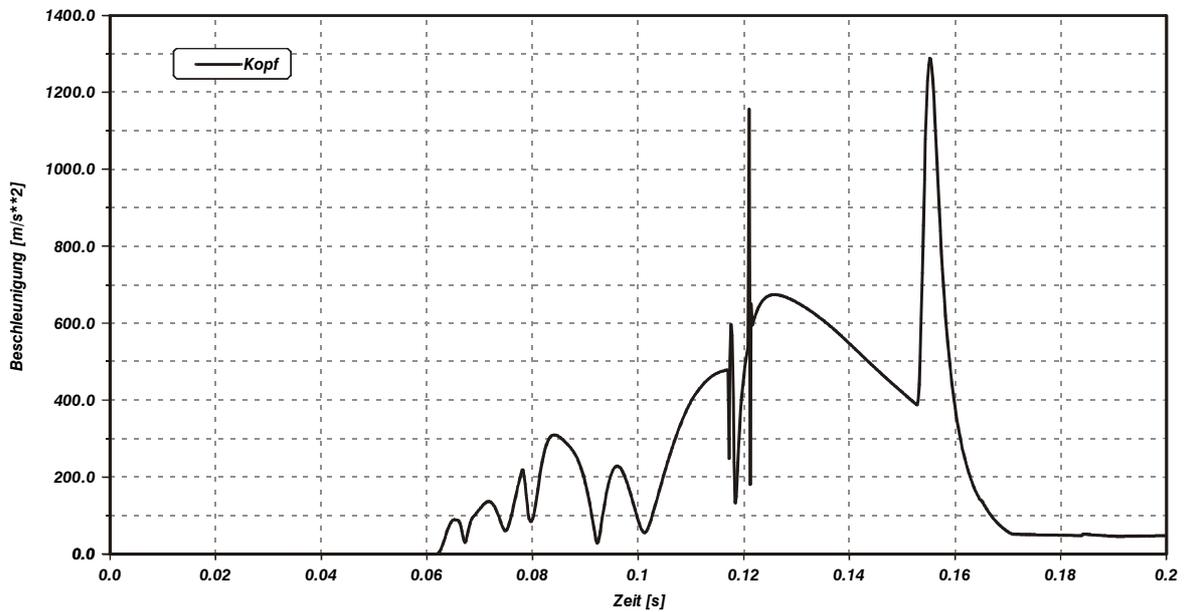


Abbildung C.66: Abteil mit Tisch, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

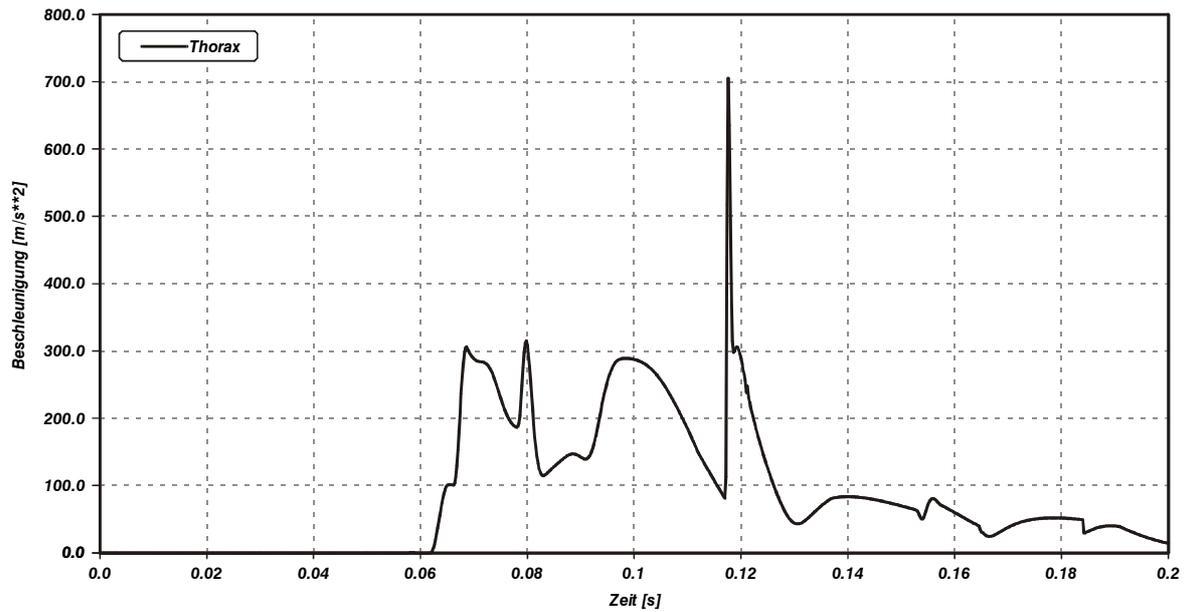


Abbildung C.67: Abteil mit Tisch, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

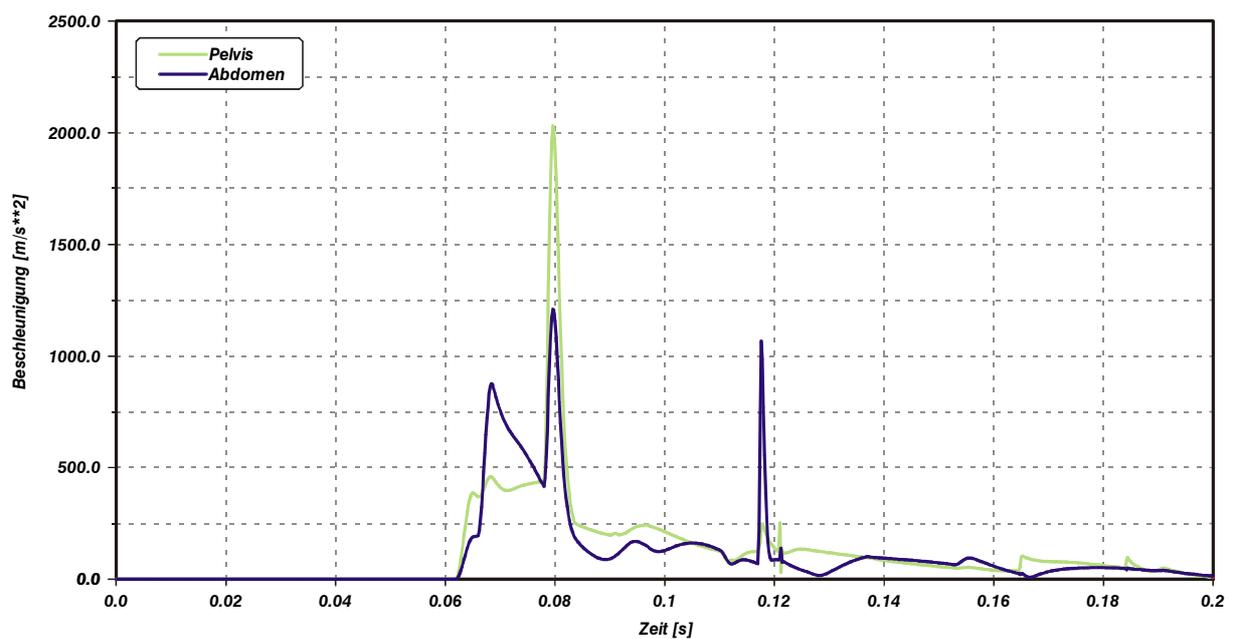


Abbildung C.68: Abteil mit Tisch, Modellvariante B1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

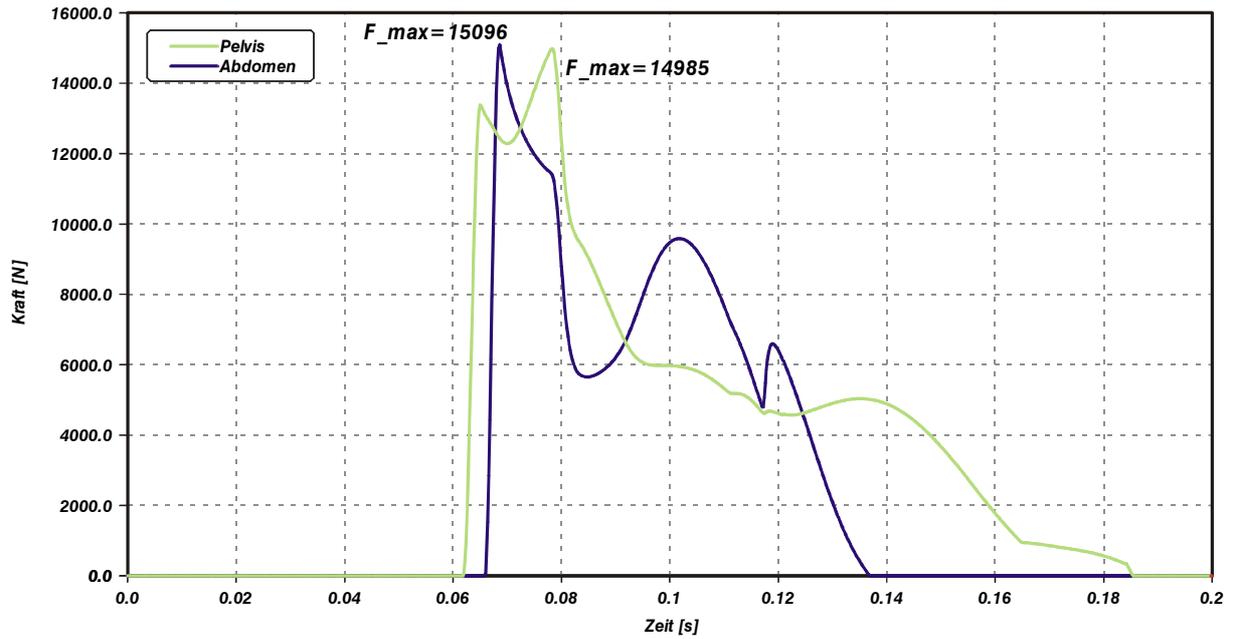


Abbildung C.69: Abteil mit Tisch, Modellvariante B1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Tischenprall von Becken/Abdomen

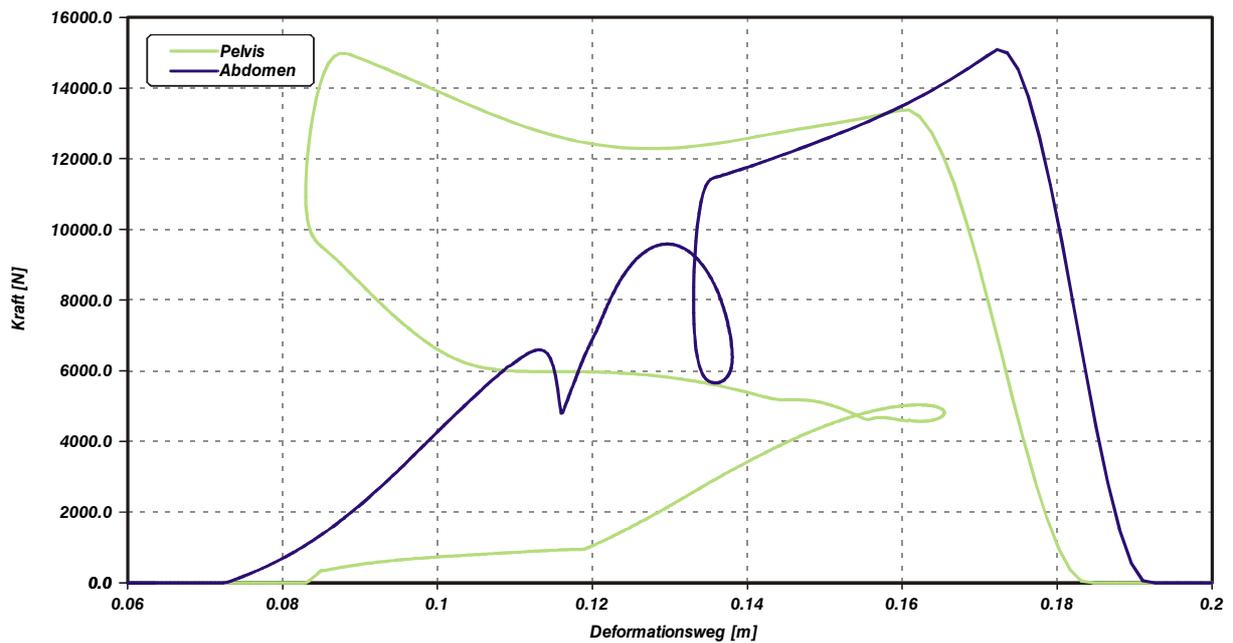


Abbildung C.70: Abteil mit Tisch, Modellvariante B1: Kraft-Weg-Charakteristik für den Tischenprall von Becken/Abdomen

C.3.3 Modellvariante B2

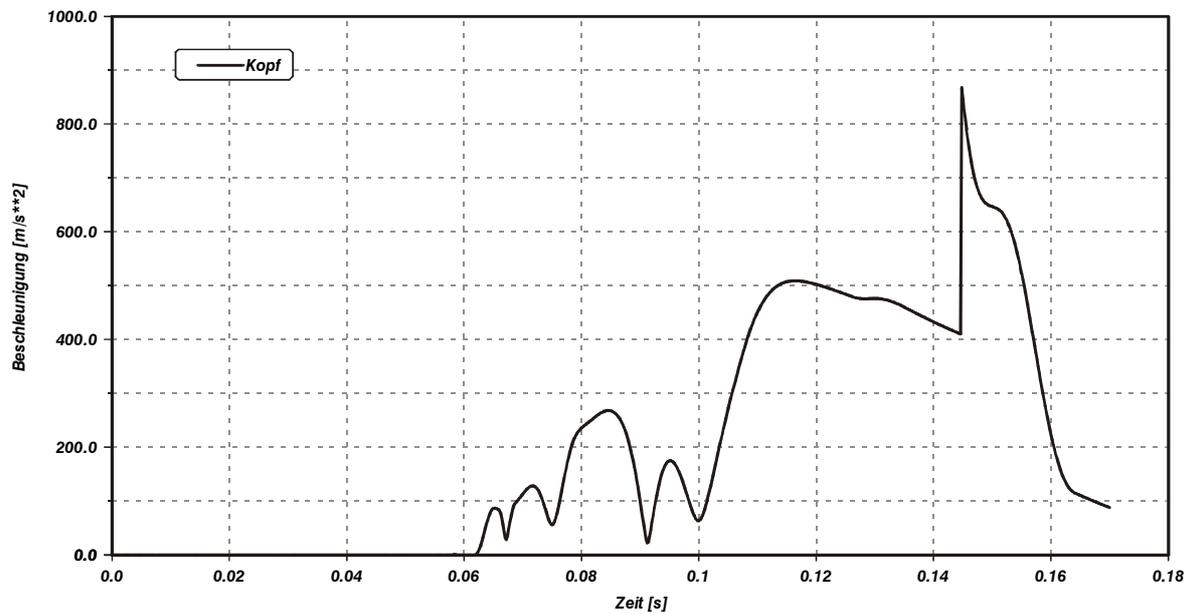


Abbildung C.71: Abteil mit Tisch, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

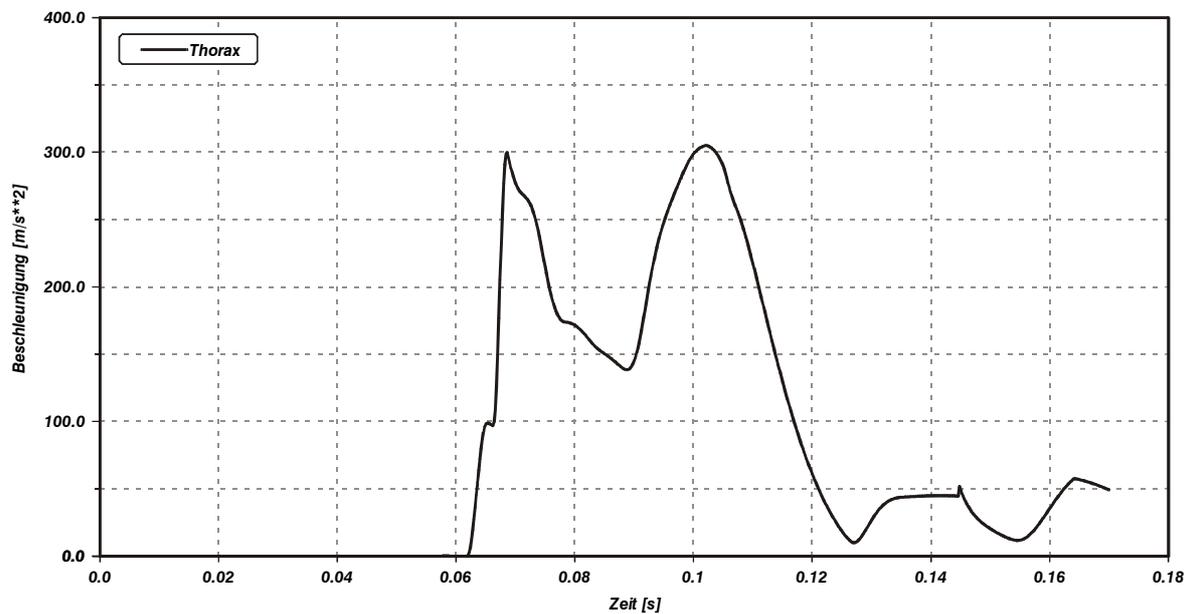


Abbildung C.72: Abteil mit Tisch, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

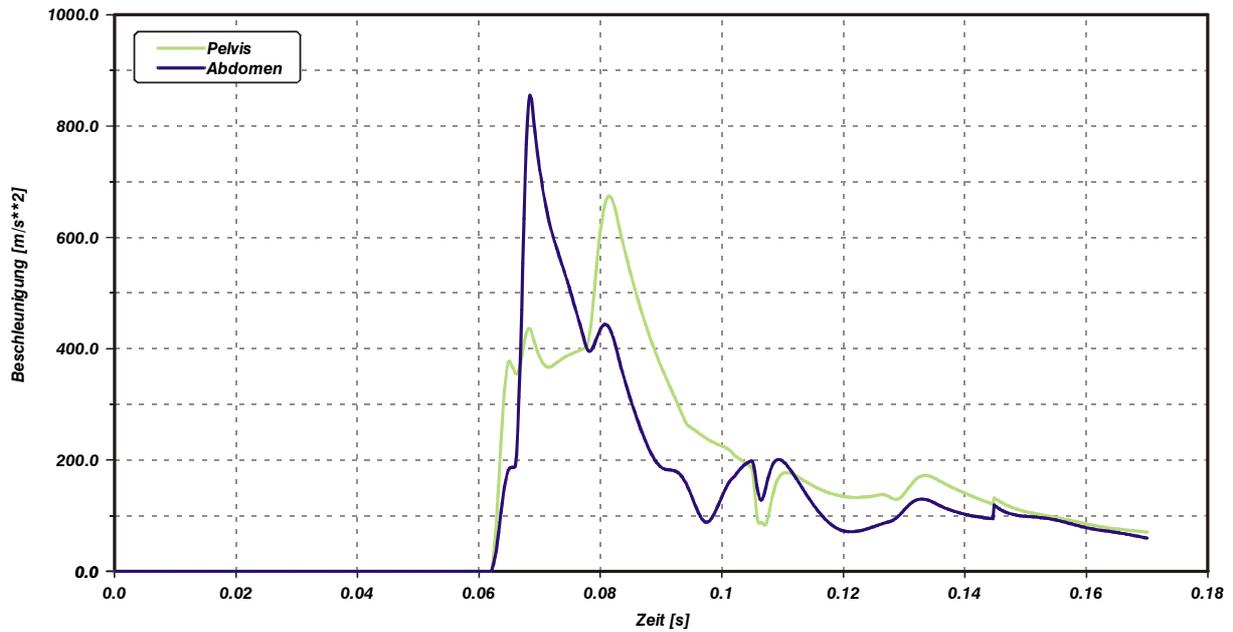


Abbildung C.73: Abteil mit Tisch, Modellvariante B2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

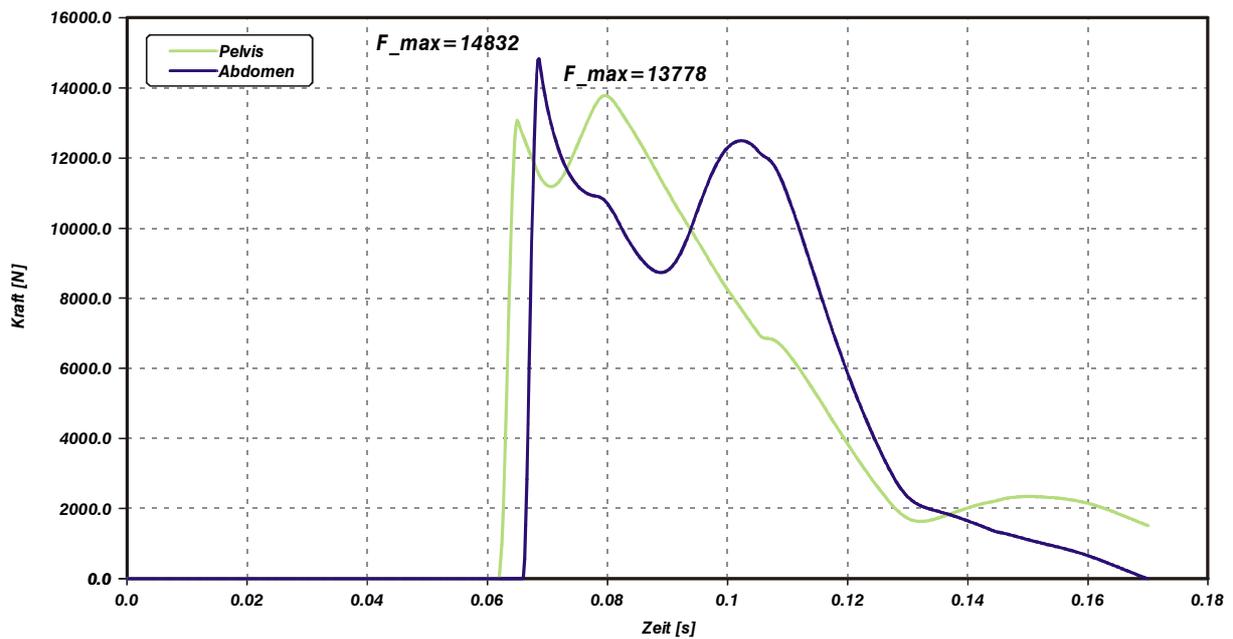


Abbildung C.74: Abteil mit Tisch, Modellvariante B2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Tischanprall von Becken/Abdomen

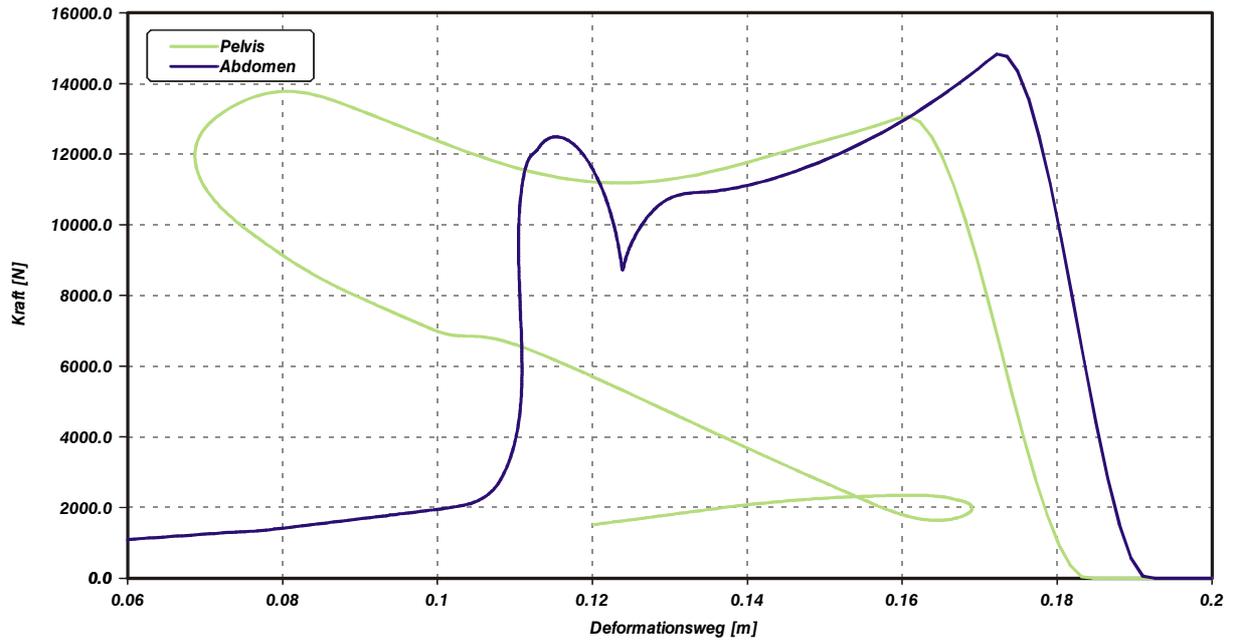


Abbildung C.75: Abteil mit Tisch, Modellvariante B2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Tischanprall von Becken/Abdomen

C.3.4 Modellvariante B3

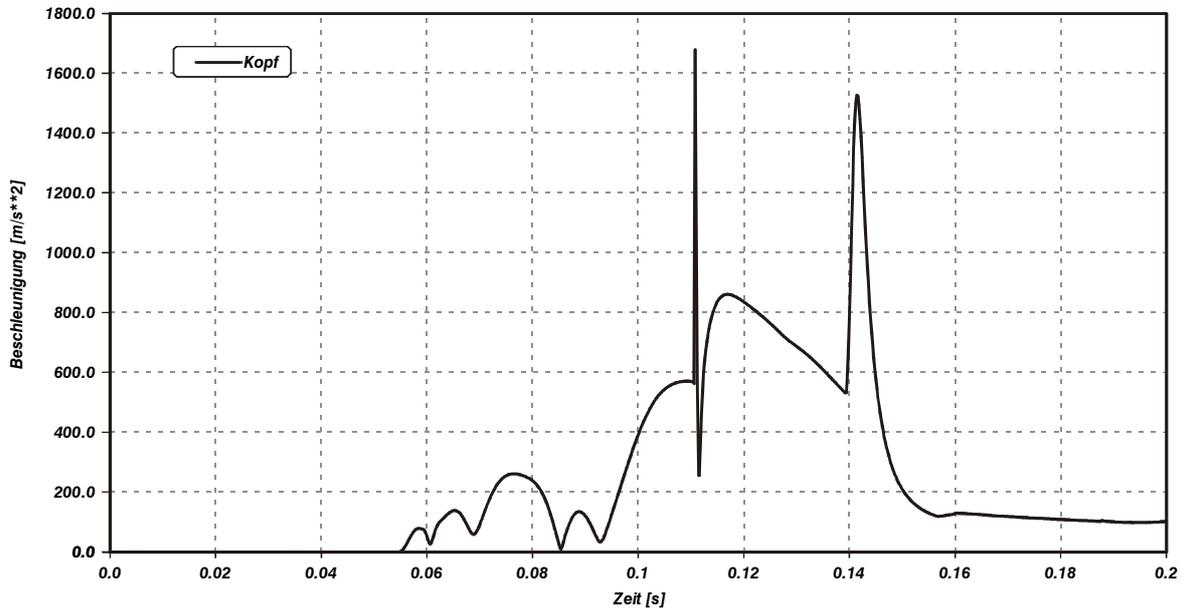


Abbildung C.76: Abteil mit Tisch, Modellvariante B3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

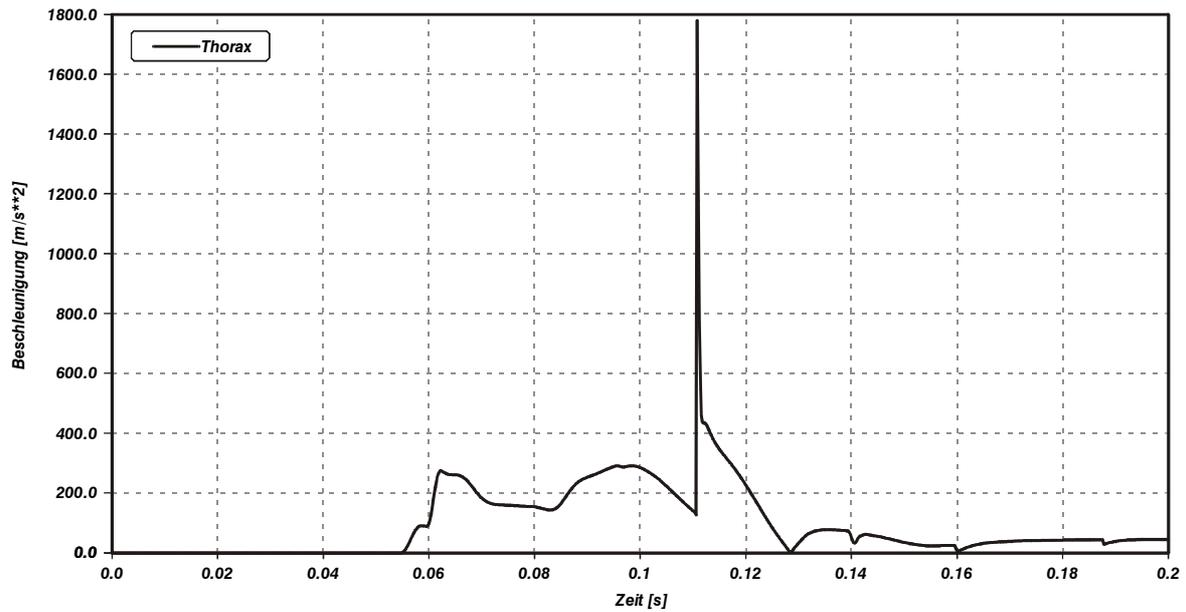


Abbildung C.77: Abteil mit Tisch, Modellvariante B3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

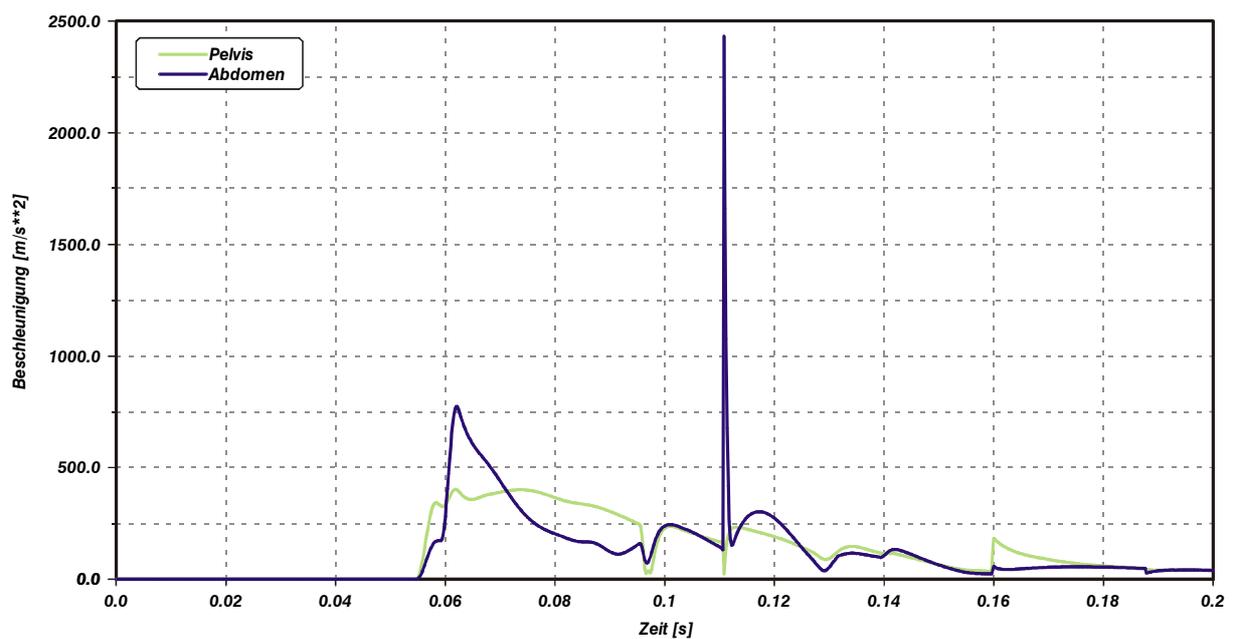


Abbildung C.78: Abteil mit Tisch, Modellvariante B3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

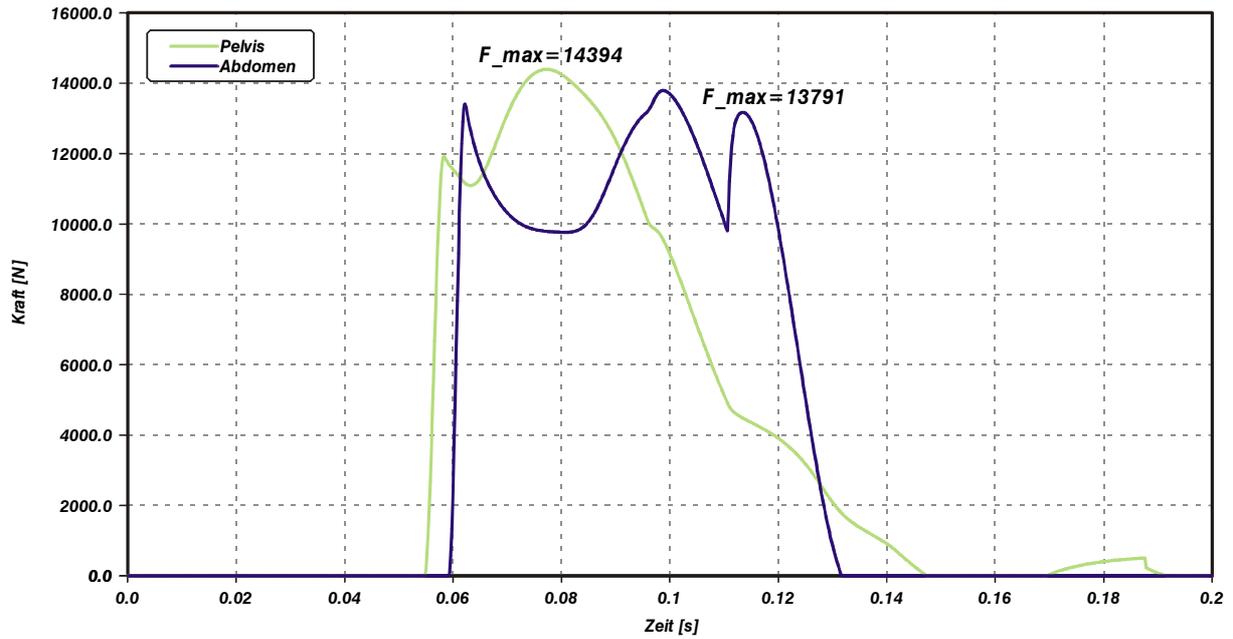


Abbildung C.79: Abteil mit Tisch, Modellvariante B3: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Tischenprall von Becken/Abdomen

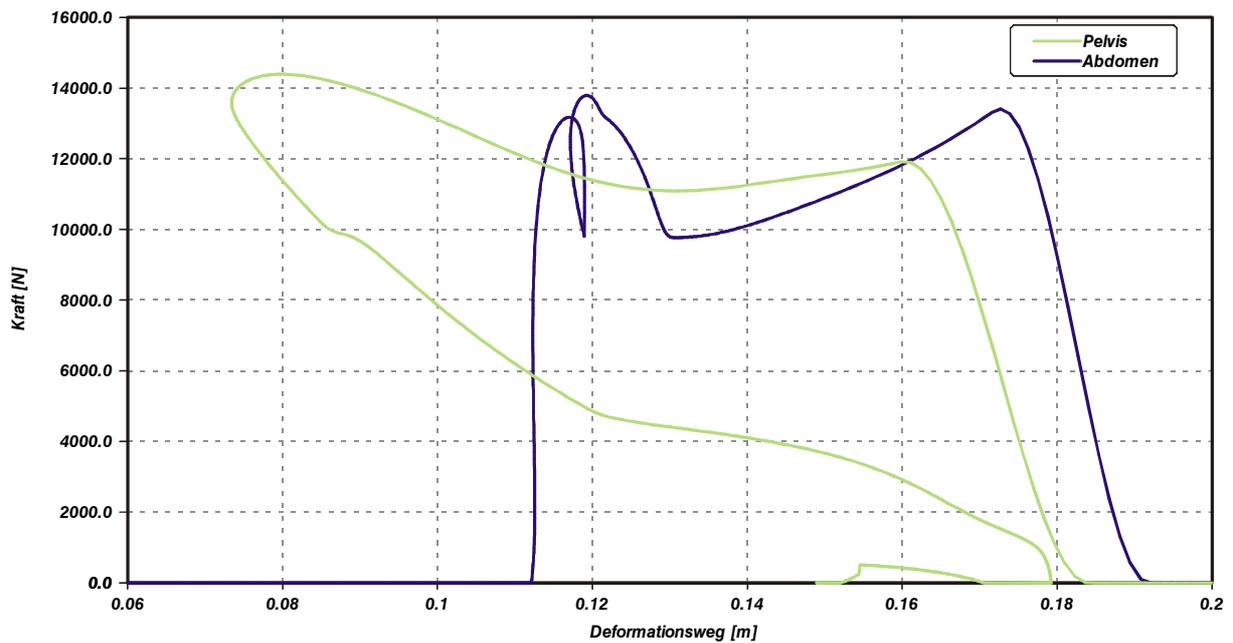


Abbildung C.80: Abteil mit Tisch, Modellvariante B3: Kraft-Weg-Charakteristik für den Tischenprall von Becken/Abdomen

C.3.5 Modellvariante C1

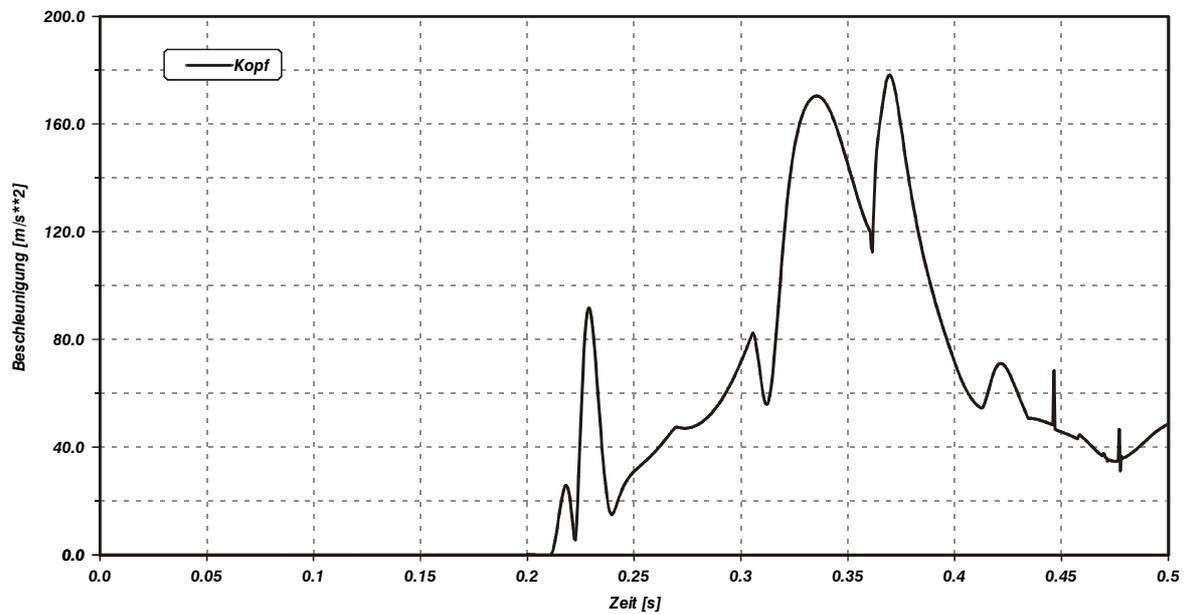


Abbildung C.81: Abteil mit Tisch, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

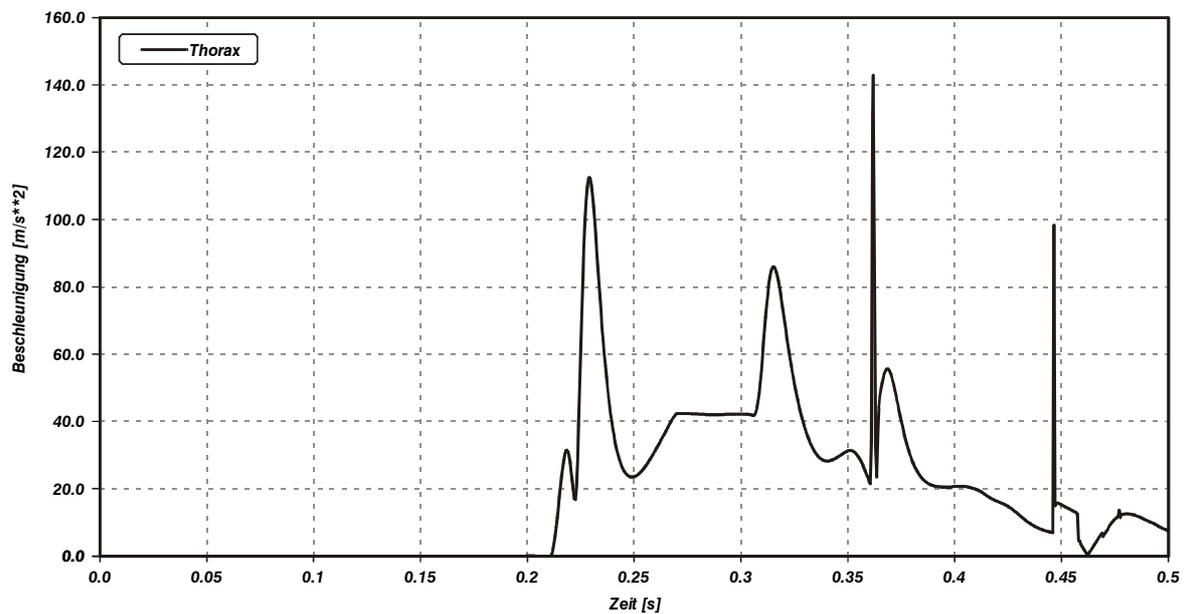


Abbildung C.82: Abteil mit Tisch, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

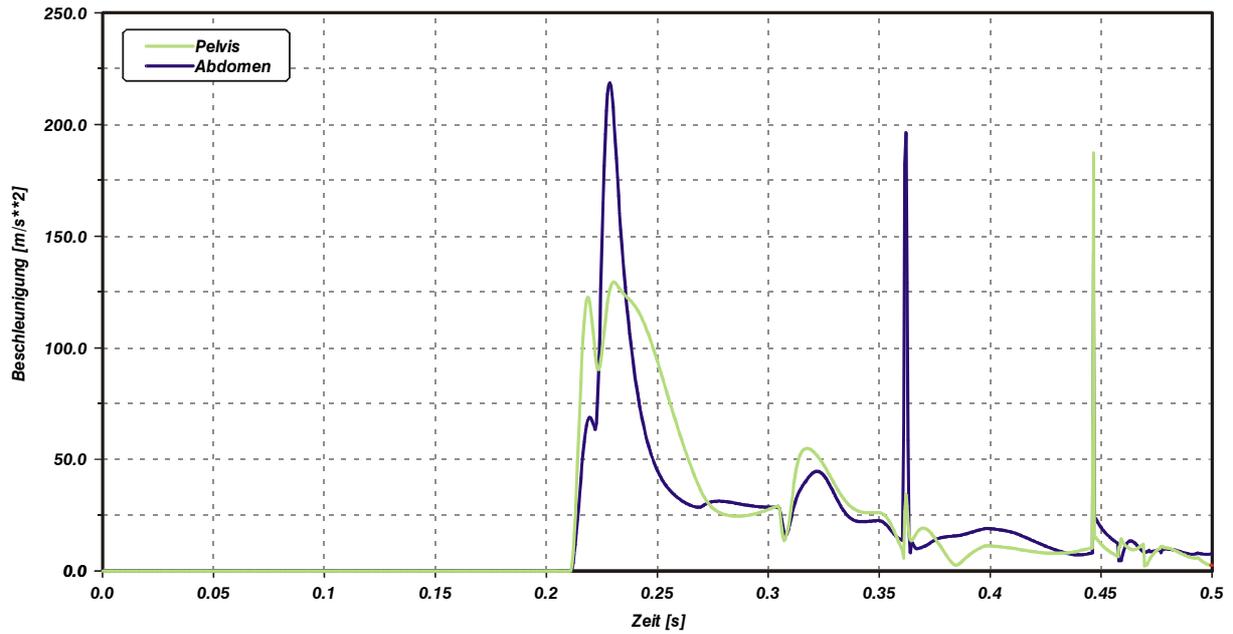


Abbildung C.83: Abteil mit Tisch, Modellvariante C1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

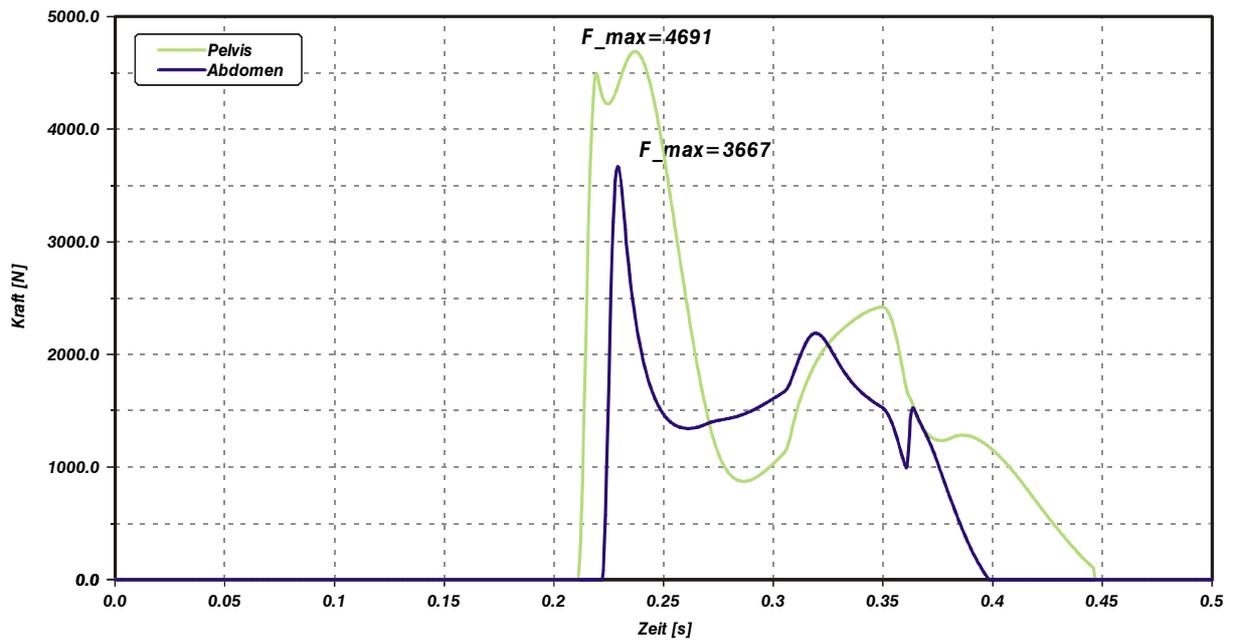


Abbildung C.84: Abteil mit Tisch, Modellvariante C1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Tischenprall von Becken/Abdomen

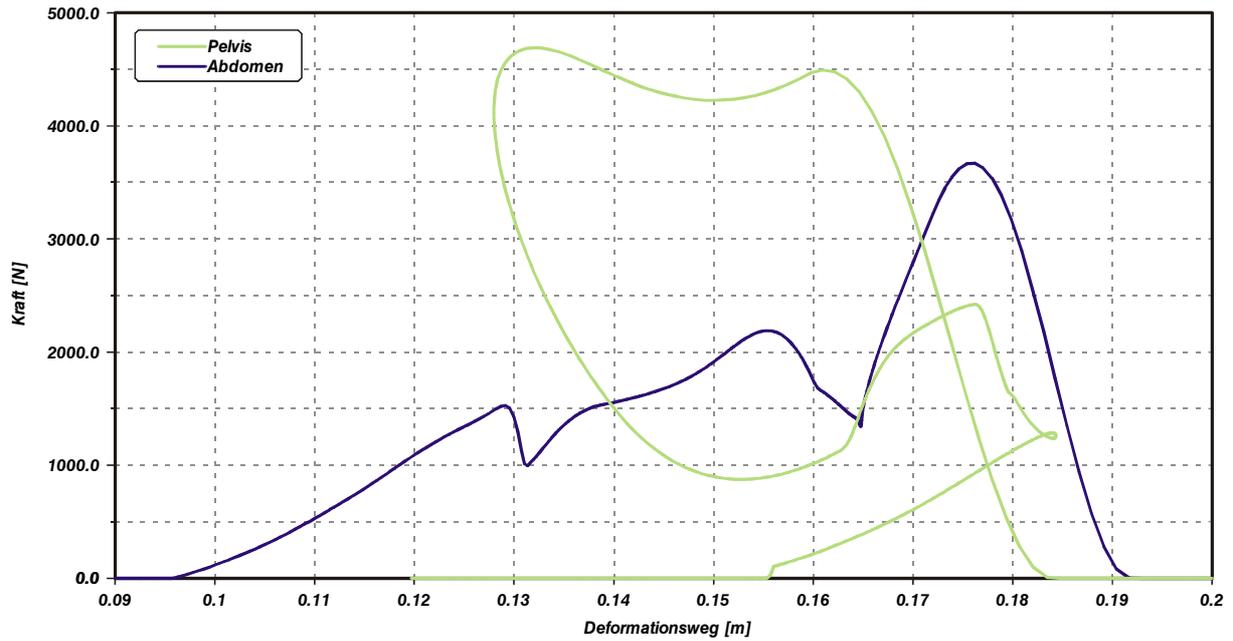


Abbildung C.85: Abteil mit Tisch, Modellvariante C1: Kraft-Weg-Charakteristik für den Tischanprall von Becken/Abdomen

C.4 Insassensimulationsrechnungen: Führerstandsmodul

C.4.1 Modellvariante 1

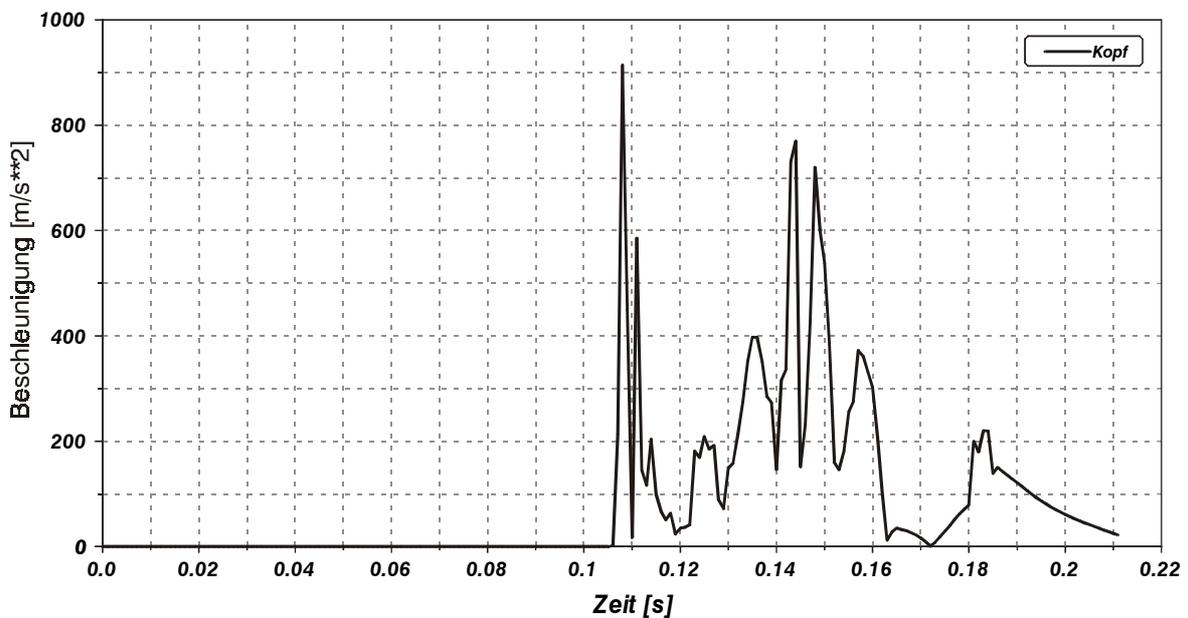


Abbildung C.86: Führerstandsmodul, Modellvariante 1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

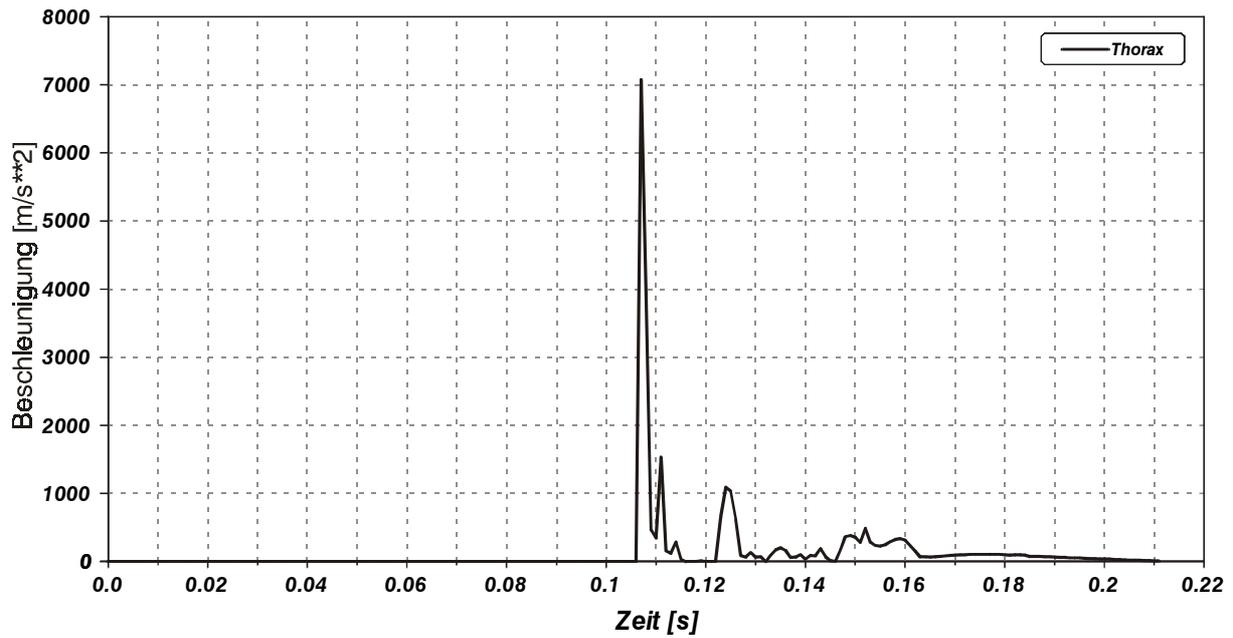


Abbildung C.87: Führerstandsmodul, Modellvariante 1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

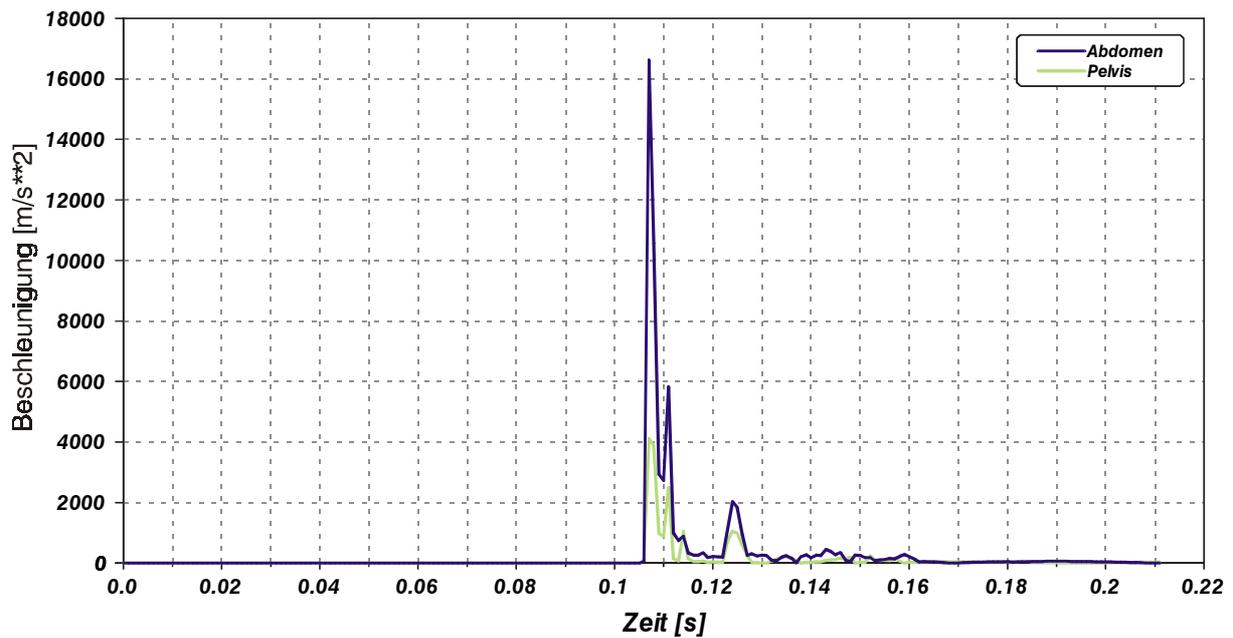


Abbildung C.88: Führerstandsmodul, Modellvariante 1: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

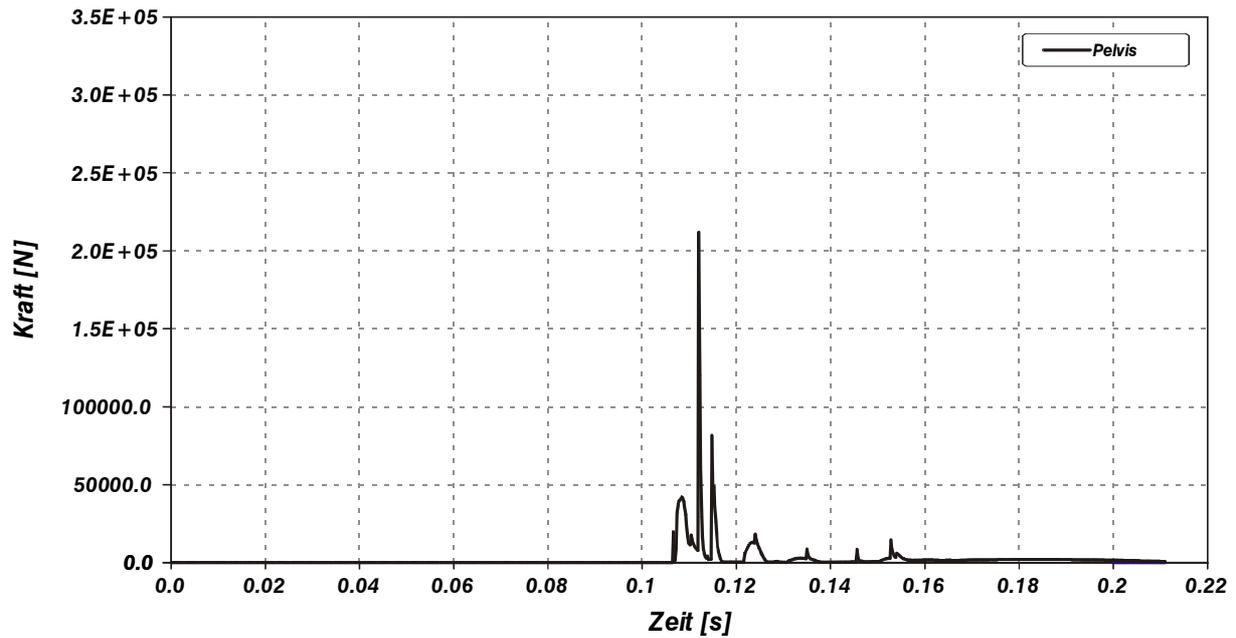


Abbildung C.89: Führerstandsmodul, Modellvariante 1: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Anprall des Beckens gegen den Führerstandstisch

C.4.2 Modellvariante 2

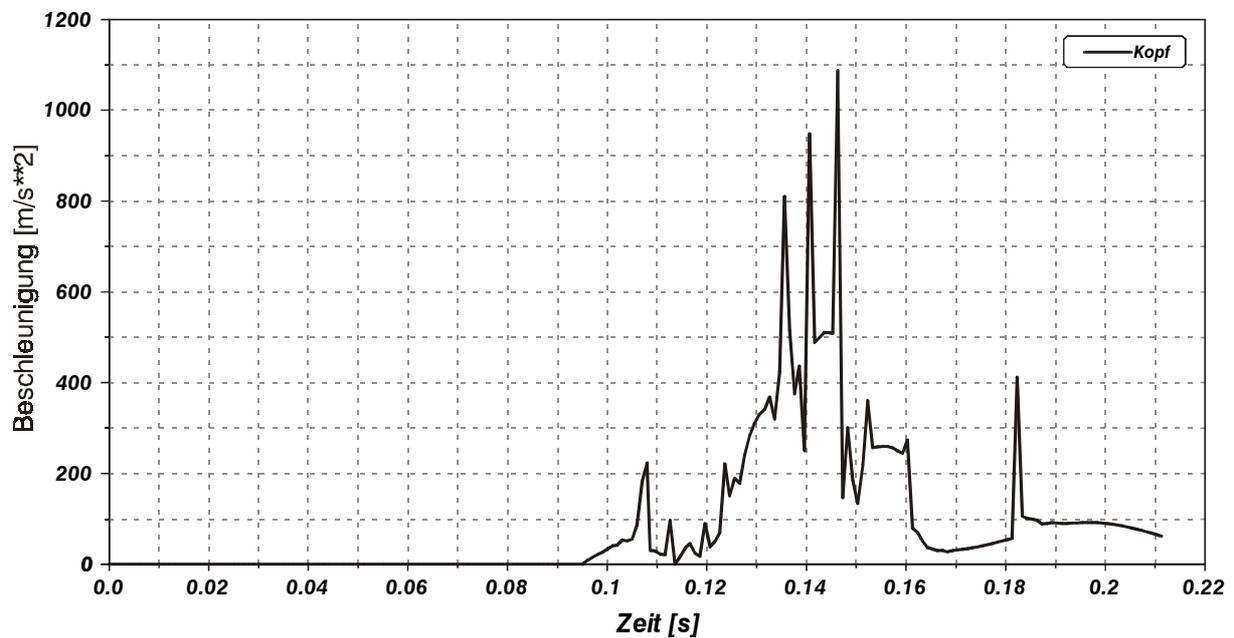


Abbildung C.90: Führerstandsmodul, Modellvariante 2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

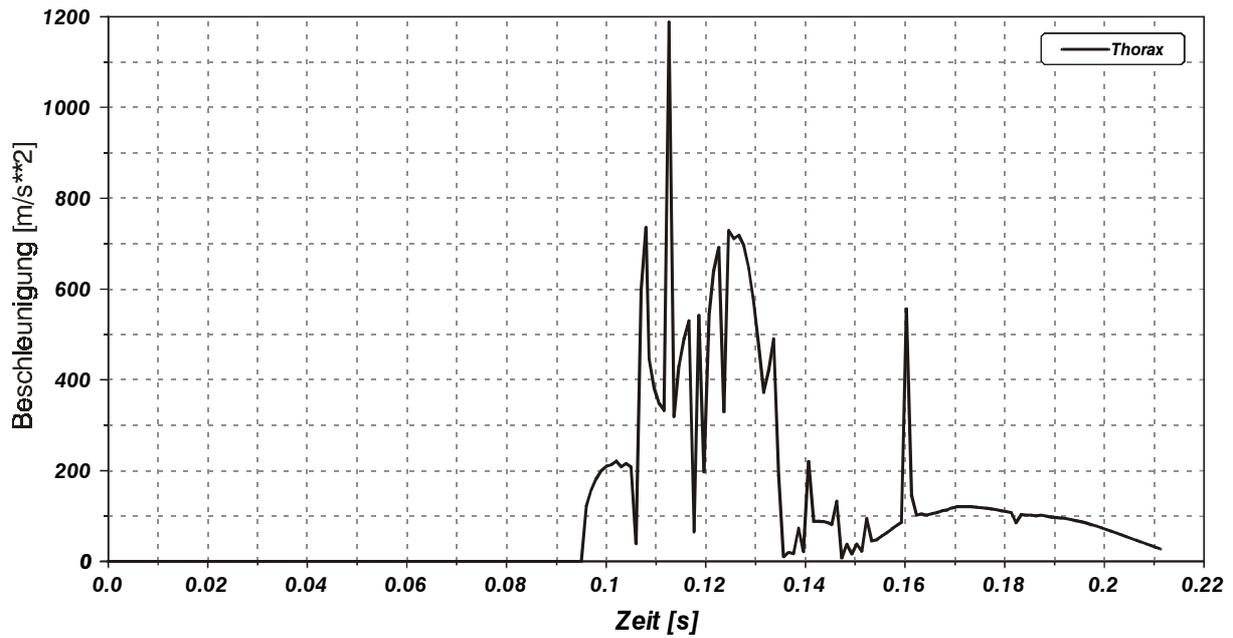


Abbildung C.91: Führerstandsmodul, Modellvariante 2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

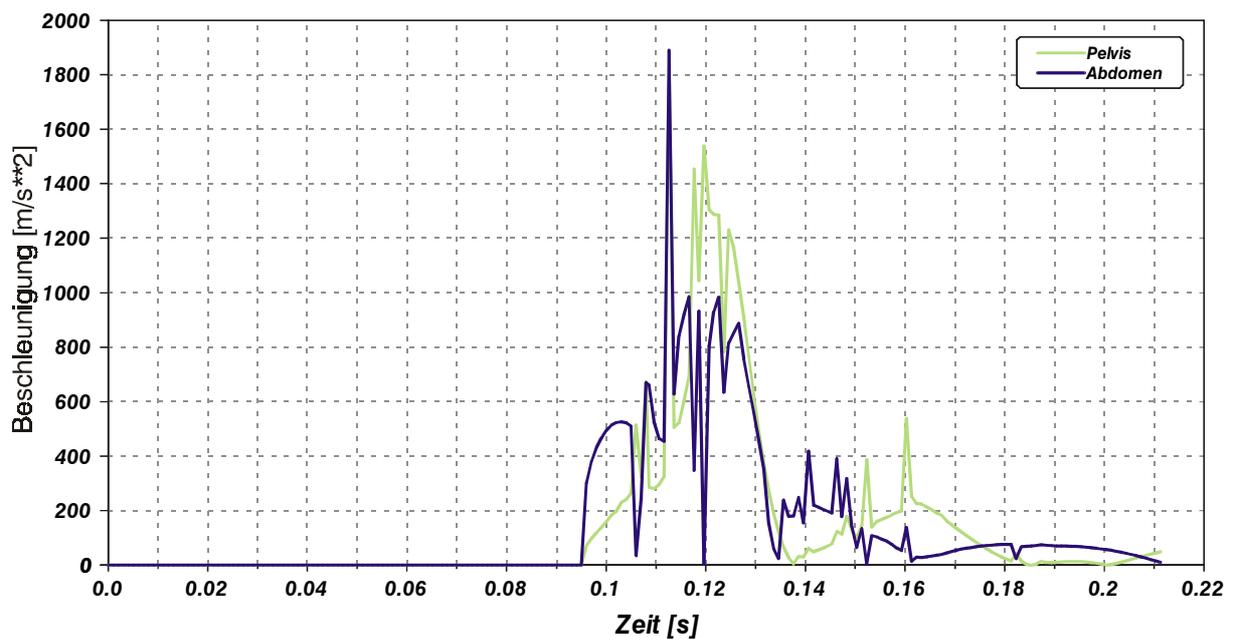


Abbildung C.92: Führerstandsmodul, Modellvariante 2: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

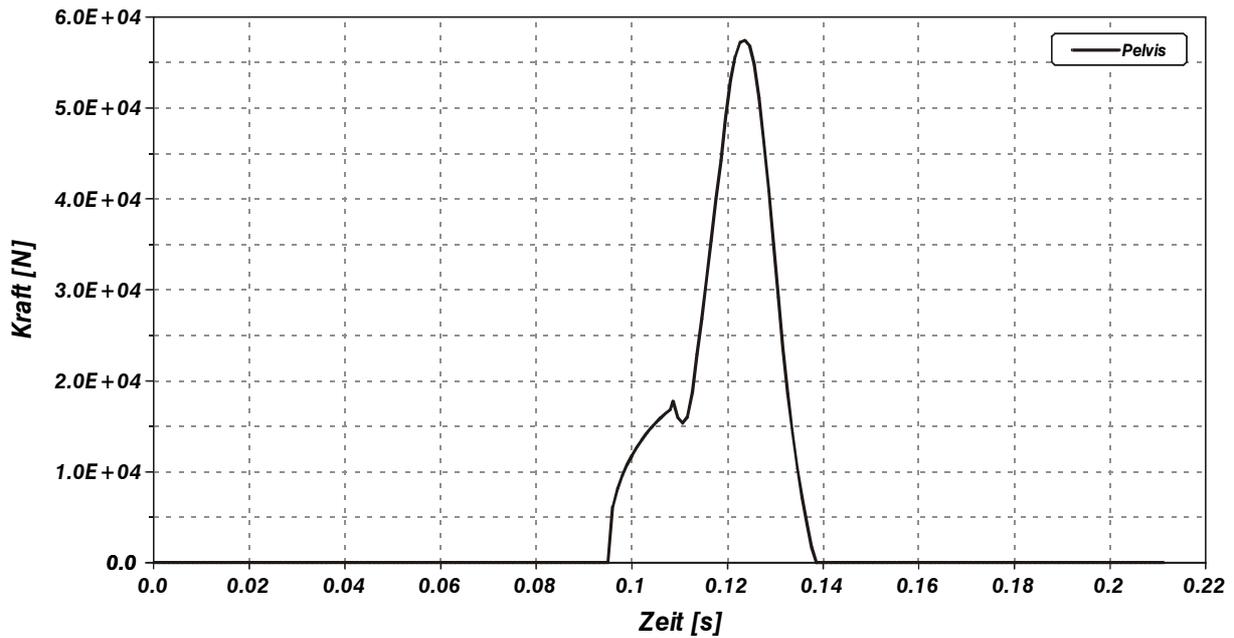


Abbildung C.93: Führerstandsmodul, Modellvariante 2: Kraft-Zeit-Charakteristik für den Anprall des Beckens gegen den Führerstandstisch

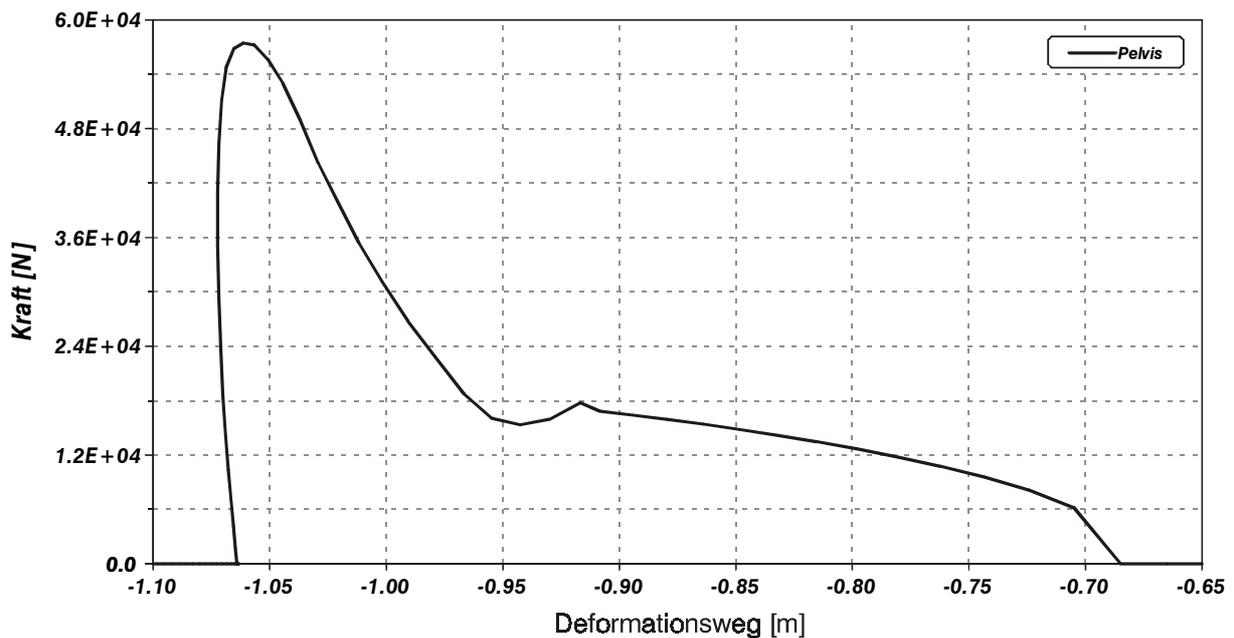


Abbildung C.94: Führerstandsmodul, Modellvariante 2: Kraft-Weg-Charakteristik für den Anprall des Beckens gegen den Führerstandstisch

C.4.3 Modellvariante 3

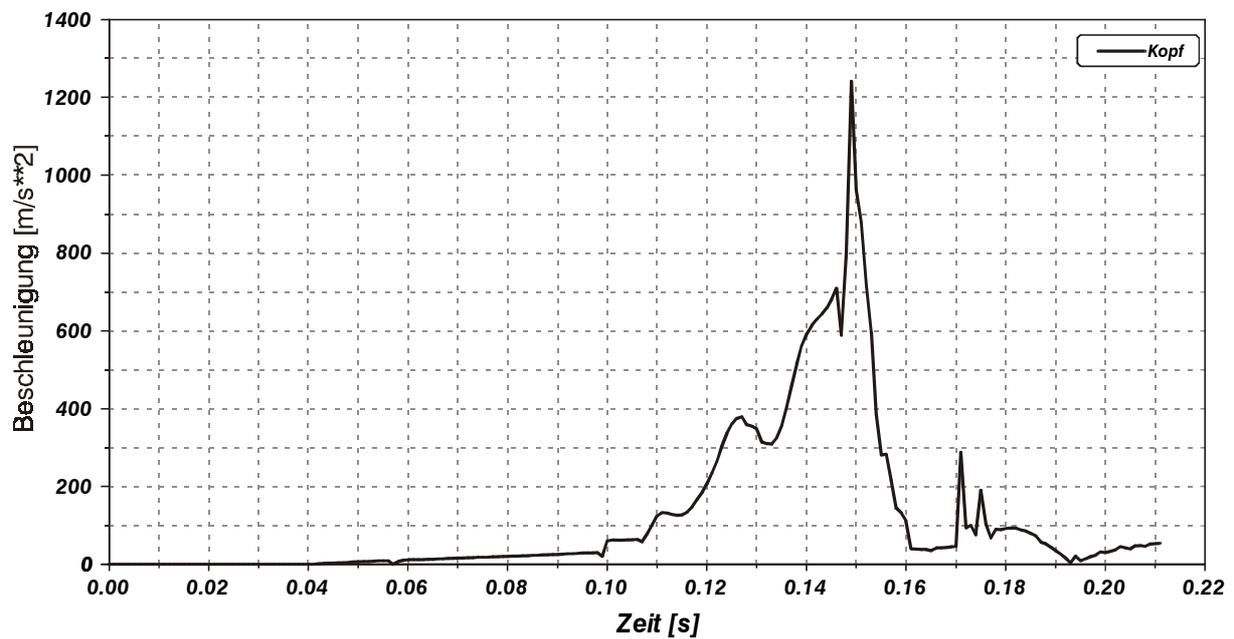


Abbildung C.95: Führerstandsmodul, Modellvariante 3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

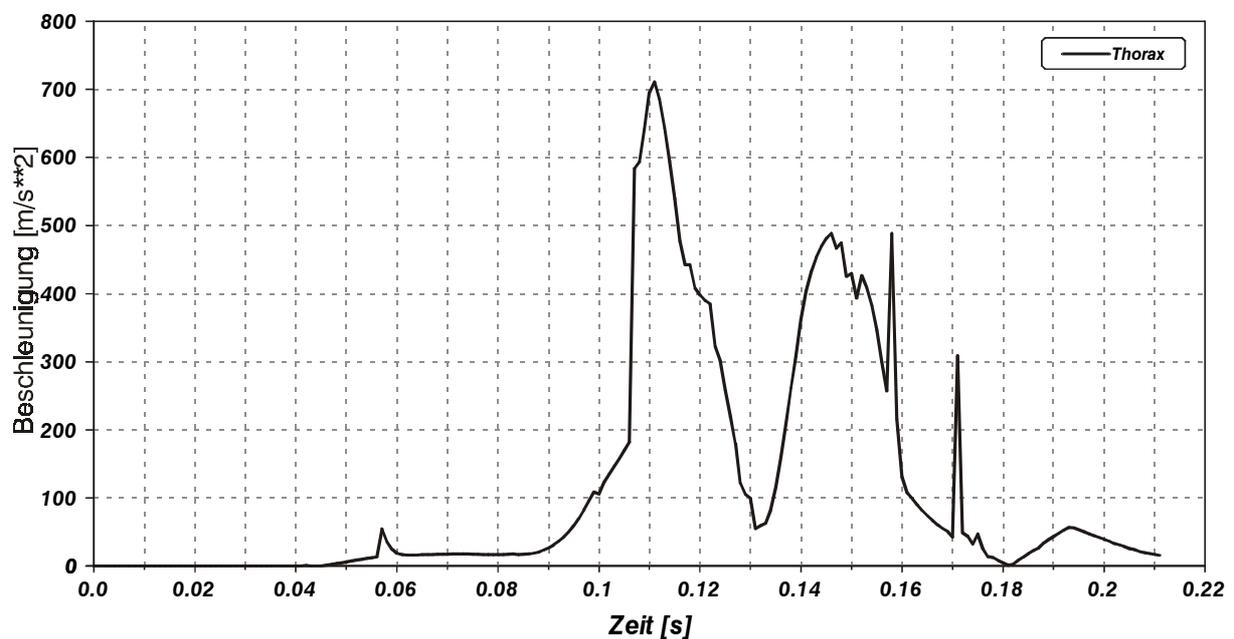


Abbildung C.96: Führerstandsmodul, Modellvariante 3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

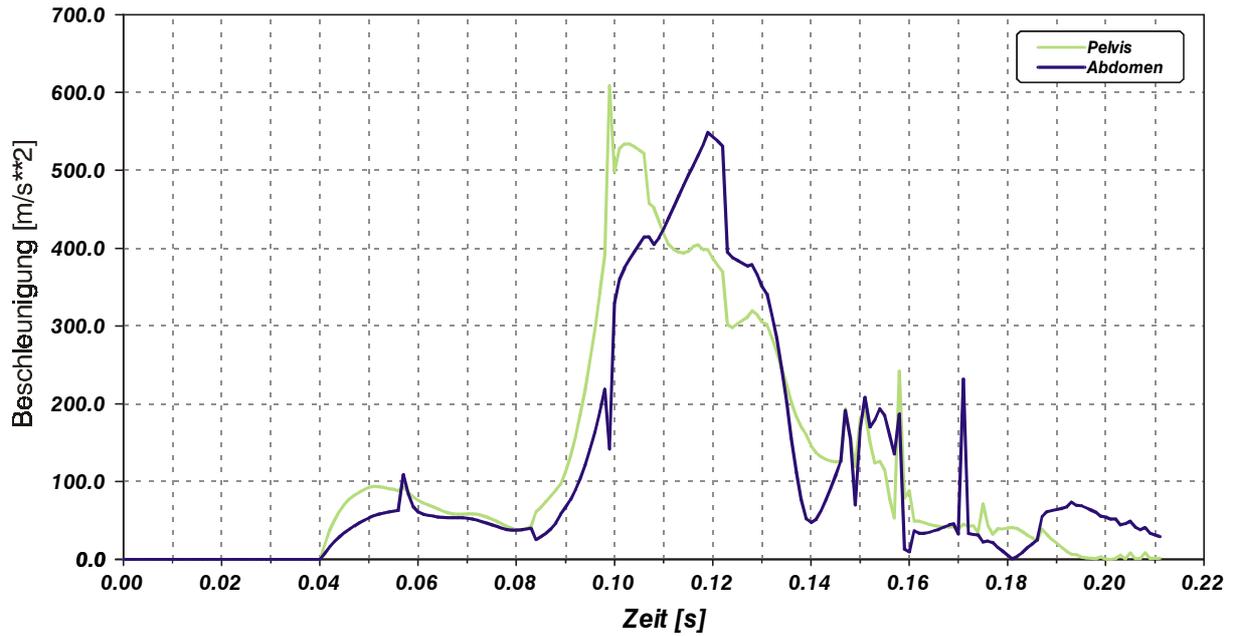


Abbildung C.97: Führerstandsmodul, Modellvariante 3: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

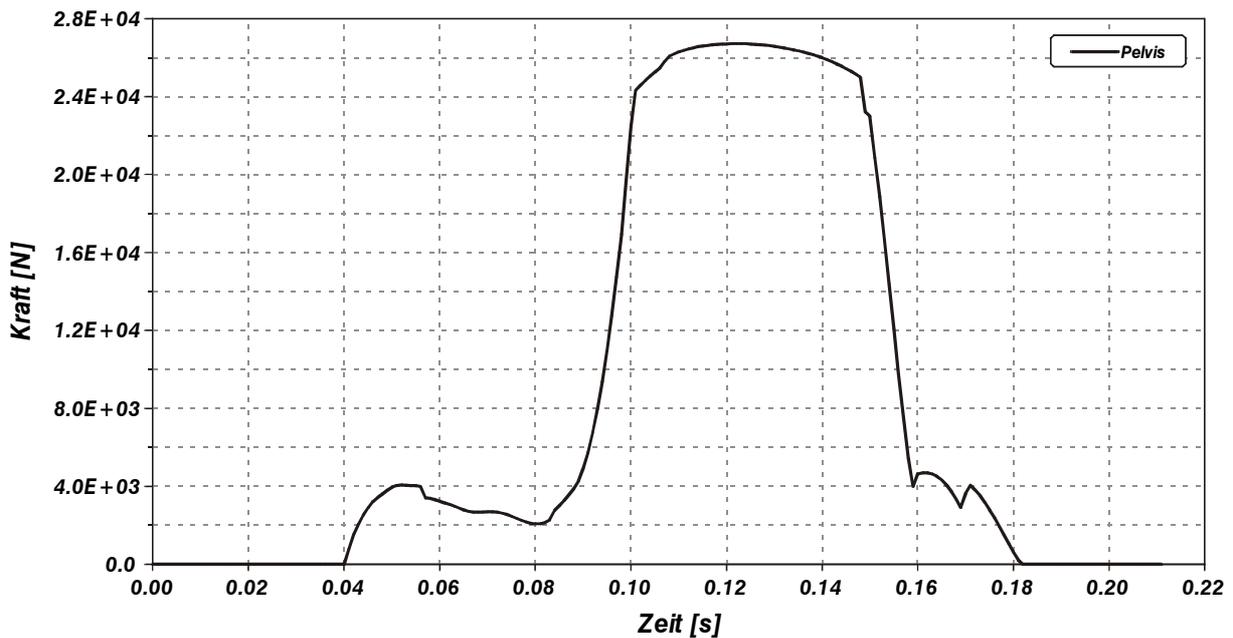


Abbildung C.98: Führerstandsmodul, Modellvariante 3: Kraft-Zeit-Charakteristik für das Becken infolge Gurtkraftwirkung

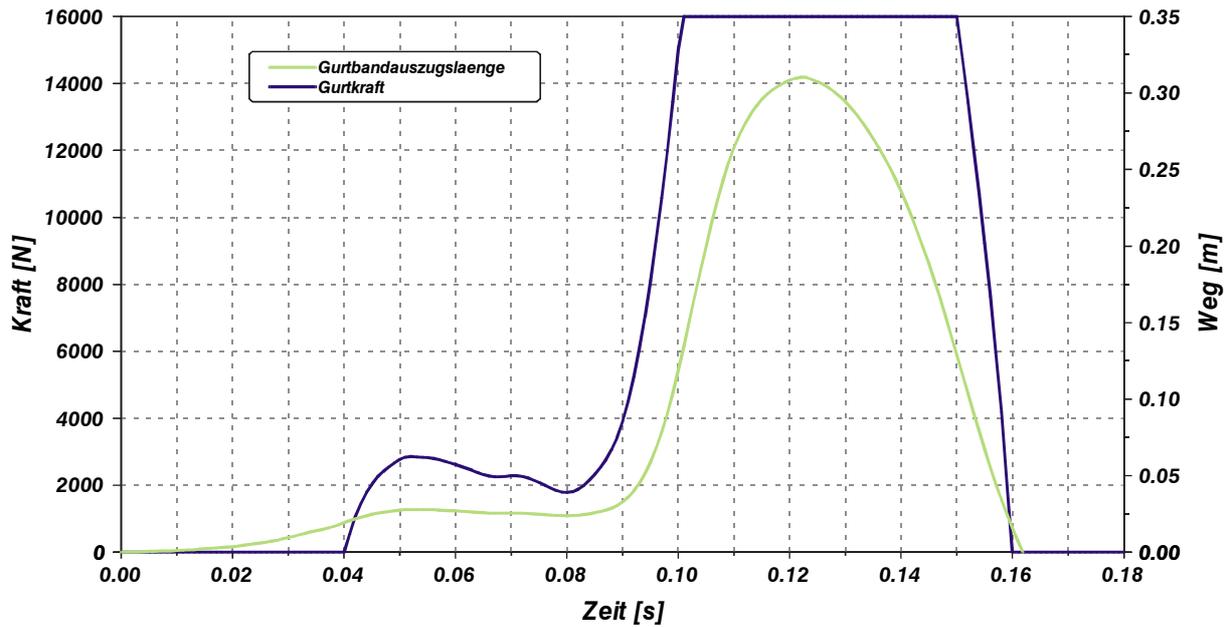


Abbildung C.99: Führerstandsmodul, Modellvariante 3: Kraft-Zeit- und Weg-Zeit-Charakteristik für den Beckengurt (Gurtband)

C.4.4 Modellvariante 4

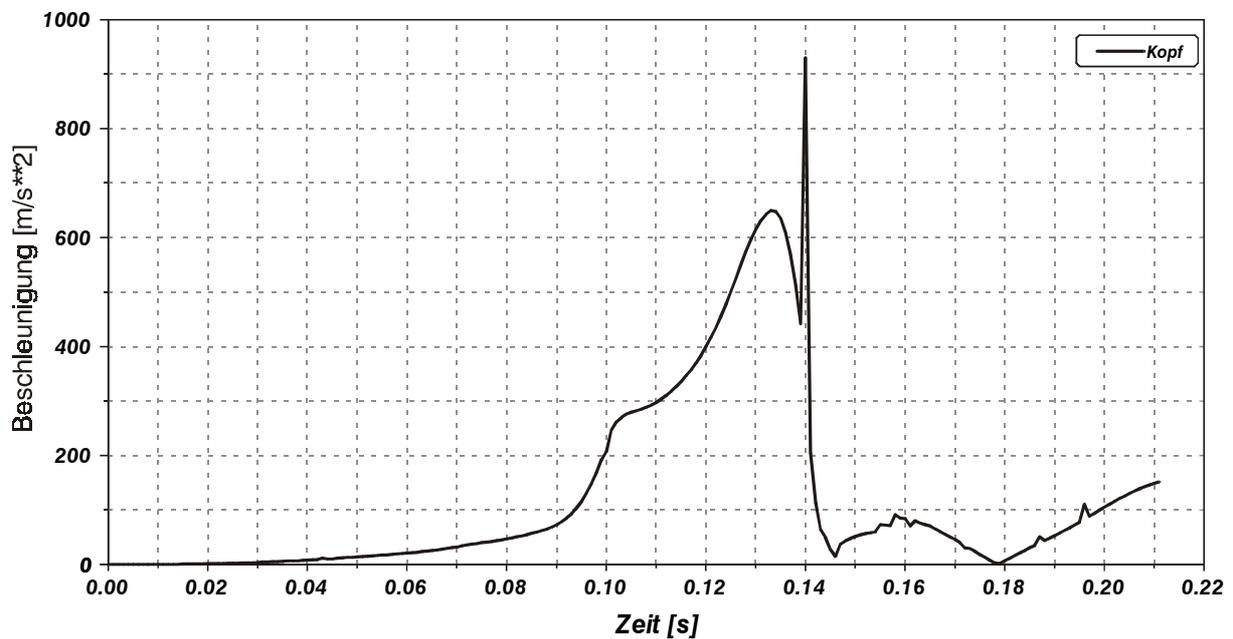


Abbildung C.100: Führerstandsmodul, Modellvariante 4: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Kopf

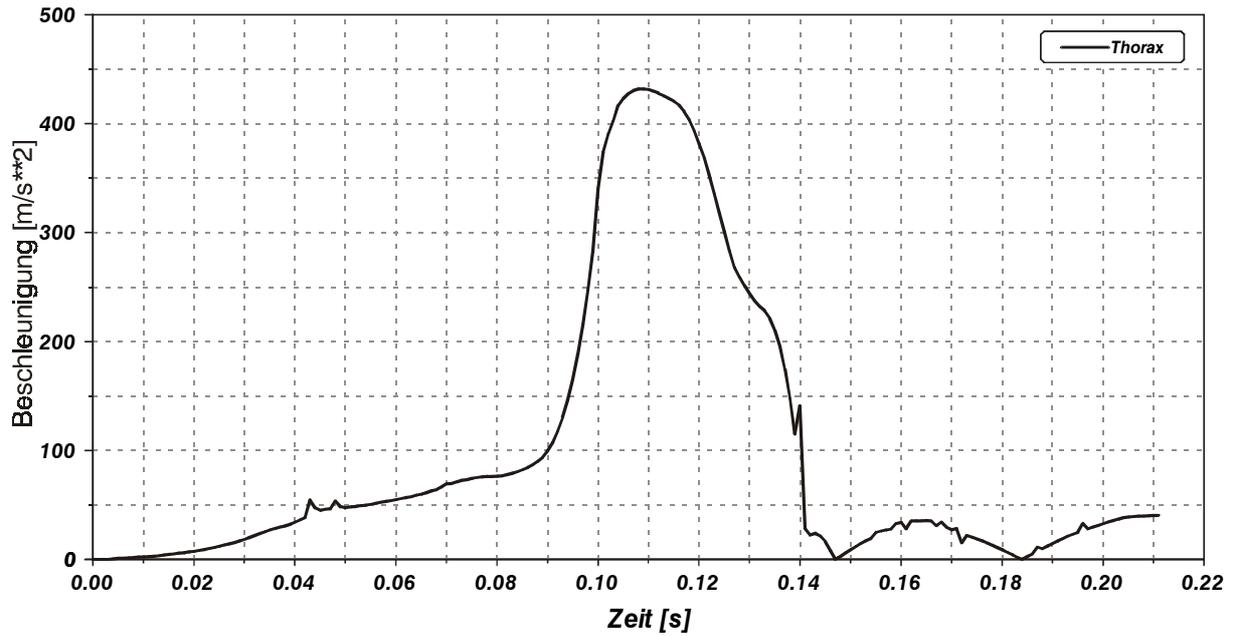


Abbildung C.101: Führerstandsmodul, Modellvariante 4: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Thorax

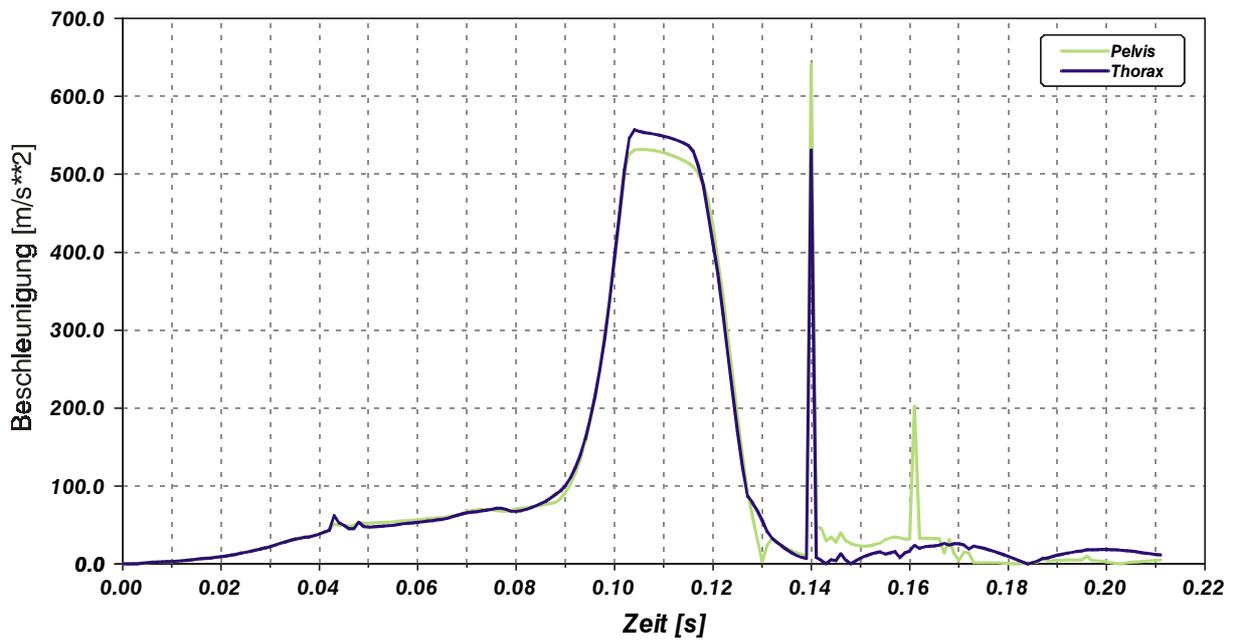


Abbildung C.102: Führerstandsmodul, Modellvariante 4: Beschleunigung-Zeit-Charakteristik für den Becken-/Abdominalbereich

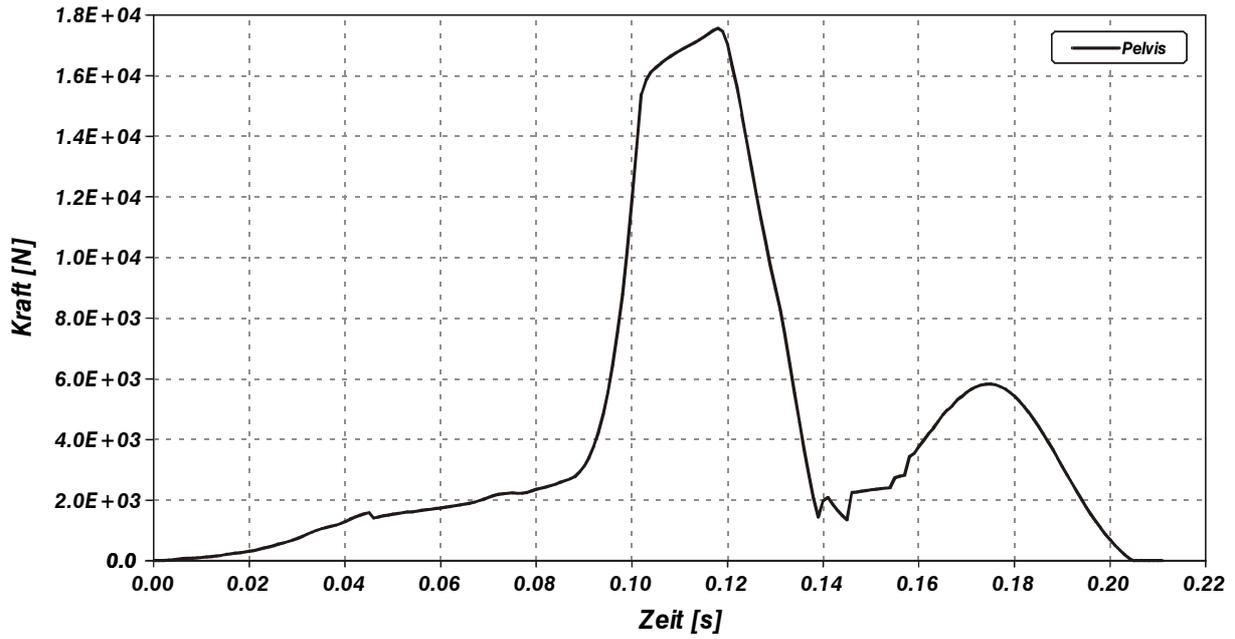


Abbildung C.103: Führerstandsmodul, Modellvariante 4: Kraft-Zeit-Charakteristik für das Becken infolge Gurtkraftwirkung

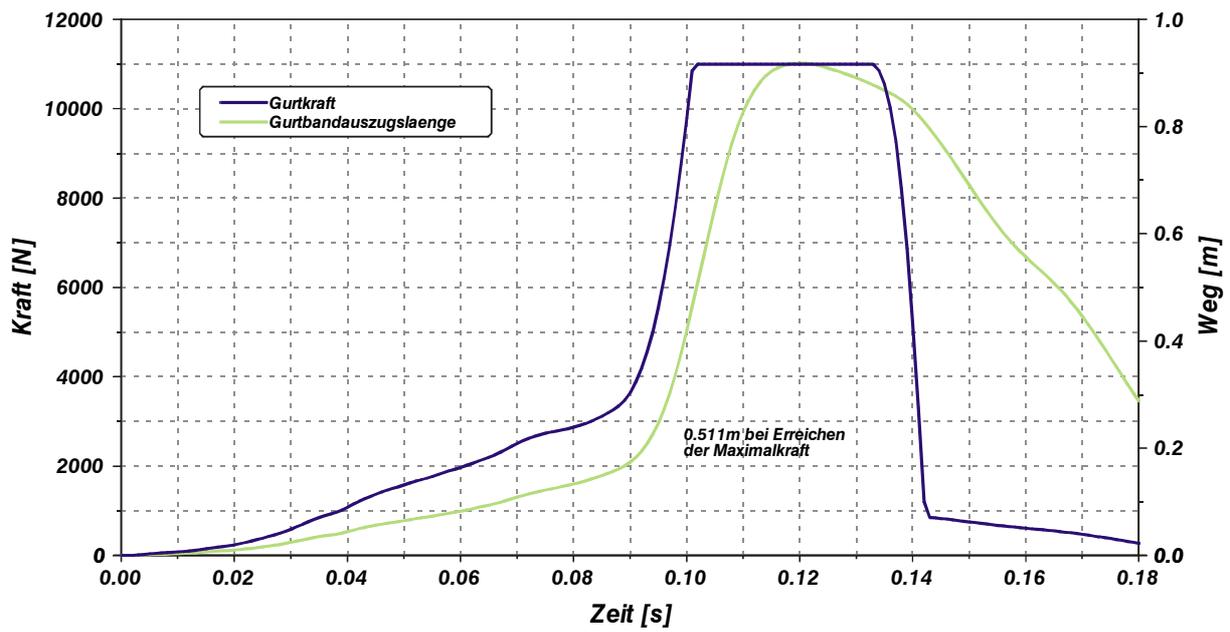


Abbildung C.104: Führerstandsmodul, Modellvariante 4: Kraft-Zeit- und Weg-Zeit-Charakteristik für den Dreipunktgurt (Gurtband)