



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Matthias Bieniek

Funktionale Bewertung unterschiedlicher Konzepte der Insassensicherheit für das Konzeptfahrzeug HCC21 der HAW Hamburg unter Berücksichtigung verschiedener Fahrmodi und einhergehender unterschiedlicher Sitzpositionen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Matthias Bieniek

**Funktionale Bewertung unterschiedlicher
Konzepte der Insassensicherheit für das
Konzeptfahrzeug HCC21 der HAW Hamburg
unter Berücksichtigung verschiedener
Fahrmodi und einhergehender
unterschiedlicher Sitz Positionen**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterarbeit

im Studiengang Fahrzeugbau M.Sc.
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Prüfer: Prof. Jens Marsolek
Prof. Gregor Schimming

Abgabedatum: 14.02.2020

Zusammenfassung

Matthias Bieniek

Thema der Masterarbeit

Funktionale Bewertung unterschiedlicher Konzepte der Insassensicherheit für das Konzeptfahrzeug HCC21 der HAW Hamburg unter Berücksichtigung verschiedener Fahrmodi und einhergehender unterschiedlicher Sitz Positionen

Stichworte

Rückhaltesysteme, autonome Fahrzeuge, LG-Position, Zero Gravity Position, Simulation, Insassenrückhalt, Fahrzeugcrash, Sicherheitsgurt, Airbagsystem

Kurzzusammenfassung

In dieser Masterarbeit werden die Konzepte der Insassensicherheit für das Konzeptfahrzeug HCC21 untersucht. Neue Sitzpositionen erschweren die Funktion konventioneller Rückhaltesysteme. Zusätzlich grenzt die Innenraumgestaltung durch Randbedingungen die Verwendbarkeit von Konzepten ein. Hierfür werden räumliche Bewertungen der Airbagsysteme durchgeführt. In der Liegeposition ändert sich die Insassenkinematik für den Frontalaufprall. Mittels einer Simulation werden Erkenntnisse dieser gewonnen und verschiedene Maßnahmen zu den Verbesserungen der gemessenen Belastungswerte untersucht. Abschließend wird eine Empfehlung für ein zusammenwirkendes Rückhaltesystem des HCC21 gegeben.

Matthias Bieniek

Title of the paper

Functional rating of different concepts for the occupant safety for the concept vehicle HCC21 of the HAW Hamburg under consideration of different driving modes and different seat positions

Keywords

Restraint systems, autonomous vehicles, LG position, zero gravity position, simulation, occupant restraint, vehicle crash, seat belt, airbag system

Abstract

In this master thesis, the concepts of occupant safety for the concept vehicle HCC21 are examined. New seat positions make the function of conventional restraint systems more difficult. In addition, the interior design limits the usability of concepts due to boundary conditions. For this, spatial assessments of the airbag systems are carried out. In the lying position, the occupant kinematics change for the frontal impact. By means of a simulation, knowledge is gained and various measures for the improvement of measured load values are examined. Finally, a recommendation for an interacting restraint system of the HCC21 is given.

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis	I
II.	Abkürzungsverzeichnis	II
III.	Abbildungsverzeichnis	III
IV.	Tabellenverzeichnis	VII
1.	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung & Zielsetzung	3
2.	Stand der Technik	4
2.1	Menschlicher Körper	5
2.2	Rückhaltesysteme in konventionellen Fahrzeugen [Kra2013]	8
2.2.1	Gurtsysteme	9
2.2.2	Airbag Systeme	12
2.3	Rückhaltesysteme für erweiterte Sitzpositionen	15
2.3.1	Lösungsansatz der Firma ZF Friedrichshafen [Laa2019]	16
2.3.2	Lösungsansatz der Firma Mercedes-Benz [DAI2020]	19
2.3.3	Lösungsansatz der Firma BMW [BMW2020]	21
2.3.4	Zusammenfassung der Lösungsansätze für neue Sitzpositionen	21
2.4	Hamburg Concept Car 2021 (HCC21) [HCC2021]	22
3.	Betrachtung der Karosseriestruktur des HCC21	27
3.1	Rechnerische Grundauslegung der Karosseriestruktur am	
	Lastfall Frontcrashes	27
3.2	Vergleich der Berechnung mit Simulationen des HCC21 [HCC2021] ..	34
4.	Konzepte der Insassensicherheit	39
4.1	Morphologischer Kasten	39
4.2	Bewertungsmatrix der Konzepte	39
4.3	Herausforderung der Konzepte am HCC21	42
4.4	Zusammenfassung der Konzepte für den Insassenschutz	43
5.	Untersuchung der Airbagsysteme für das HCC21	44
5.1	Räumliche Untersuchung der Airbagsysteme für das HCC21	44
5.1.1	Räumliche Untersuchung der Airbagsysteme auf der Fahrerseite	44
5.1.2	Räumliche Untersuchung der Airbagsysteme auf der Beifahrerseite ...	48
5.2	Fehleranalyse der Airbagsysteme für den HCC21	49
5.3	Funktionsanalyse der Airbagsysteme für den HCC21	50
6.	Simulative Bewertung von Rückhaltesystemen	51
6.1	Aufbau der Simulation	51
6.2	Erweiterung des Subsystems	53
6.3	Auswertung der Ausgangslage	67
6.4	Variantaufbau	76
6.5	Ergebnisdarstellung der Varianten	77
6.6	Fehlerquellen und Ungenauigkeiten der gemessenen Daten	85
7.	Ergebnisdiskussion	86
8.	Fazit und Ausblick	89
	Literaturverzeichnis	92
	Anhang	94

II. Abkürzungsverzeichnis

AIS	Abbeviated Injurey Scale
BrIC	Brain Injury Criterion
CAD	Computer Aided Design
CES	Consumer Electronics Show
ESF	Experimental-Sicherheitsfahrzeug
Euro NCAP	<i>European New Car Assessment Programme</i>
FEM	Finite-Elemente-Methode
g	Erdbeschleunigung = 9,81 m/s
HAW	Hochschule für angewandte Wissenschaften
HCC21	Hamburg Concept Car 2021
HIC	Head Injurey Criterion
I-Tafel	Instrumenten Tafel
LG Position	Low Gravity Position
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIC	Neck Injury Citerion
SAE	Society of Automotive Engineers
SIK	Simulation in der Karosserieentwicklung
TIC	Thorso Injury Citerion

III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Fahrzeuginnenraumkonzepte in hohen Automatisierungsstufen – daraus abgeleitete Beispiele für Sitzkonfigurationen [Laa2019].....	1
Abbildung 1-2: Mögliche Sitzeinstellungen mit Blick auf neue Anwendungsfälle während des automatisierten Fahrens [Laa2019].....	2
Abbildung 2-1: Teilbereiche der Straßenverkehrssicherheit und Beispiele für Sicherheitsmaßnahmen [Kra2013].....	4
Abbildung 2-2: Dauer und Beschleunigungsstärke bei x-Beschleunigungsrichtung nach Eiband [EIB1959].....	7
Abbildung 2-3: Dauer und Beschleunigungsstärke bei z-Beschleunigungsrichtung nach Eiband [EIB1959].....	8
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Fahrzeuge und der Insassenbeschleunigungen ohne Gurt (a) und mit Gurt (b) [Kra2013].....	9
Abbildung 2-5: Einfluss des Gurtkraftbegrenzers auf die Dummy-Brustbeschleunigung ($v=56,2$ km/h) [Kra2013].....	11
Abbildung 2-6: Gurt-Bag zur Vergrößerung der wirksamen Gurtband-Breite im ESF 2009 von Mercedes-Benz [CHR2009].....	11
Abbildung 2-7 Zeitlicher Ablauf der Airbag-Auslösung für Fahrer und Beifahrer [SCH1996]	12
Abbildung 2-8: Insassen-Bewegungsablauf bei einem 55 km/h-Barrieretest (Fahrer) [Kra2013].....	13
Abbildung 2-9: Insassen-Bewegungsablauf bei einem 55 km/h-Barrieretest (Beifahrer) [Kra2013].....	13
Abbildung 2-10: Out of Position-Situationen im Vergleich zur normalen Sitzpositionen (In Position) auf der Fahrer- und der Beifahrer-Seite [Kra2013].....	14
Abbildung 2-11: Grenzwinkel der Neutral Body Posture [NAS1980].....	15
Abbildung 2-12: Auswirkung neuer Sitzpositionen und schematische Konfigurationen entsprechender Insassenschutzsysteme [Laa2019].....	16
Abbildung 2-13: Vergleich der Insassenkinematik bei konventionellen (links) und erweitertem (rechts) Rückhaltesystem im Arbeitsmodus.....	17
Abbildung 2-14: Maximale relative Belastungswerte am Crashtest-Dummy. Vergleich zwischen dem manuellen Fahrmodus und dem Arbeitsmodus mit konventionellem und erweitertem Rückhaltesystem.....	18
Abbildung 2-15: Gurtintegralsitz des ESF 2019 [DAI2020].....	19
Abbildung 2-16: Airbagsystem auf der Fahrerseite des ESF [DAI2020].....	20

Abbildung 2-17: Fahrerairbag auf der Fahrerseite sichtbar durch eine Scheibe im Armaturenbrett des ESF [DAI2020]	20
Abbildung 2-18: Cocoun Airbag für den ZeroG Lounger von BMW [BMW2020] ..	21
Abbildung 2-19: Konzeptsteckbrief des HCC21 [HCC2021]	22
Abbildung 2-20: LG-Position im HCC21 [HCC2021]	23
Abbildung 2-21: -350-Y Schnitt vom Fahrerplatz [HCC2021]	23
Abbildung 2-22: Bedienfeld auf der Fahrer Seite [HCC2021]	24
Abbildung 2-23: Klappbare I-Tafel auf der Beifahrer Seite [HCC2021]	24
Abbildung 2-24: Bedienfeld auf der Beifahrerseite eingeklappt (links) und ausgeklappt (rechts) [HCC2021]	25
Abbildung 2-25: Karosseriestruktur des HCC21 im CAD [HCC2021]	25
Abbildung 2-26: Schnitt der Front mit Maßen der Struktur [HCC2021]	26
Abbildung 3-1: Teilauszug der Gesetzliche Lastfälle für Europa und China [CAR2020]	27
Abbildung 3-2: Annahme der Verzögerung während des frontalen Crashes	28
Abbildung 3-3: Annahme des Geschwindigkeitsverlaufes während des frontalen Crashes	28
Abbildung 3-4: Kraft-Niveau in Abhängigkeit der vorderen Fahrzeugstruktur [Kra2013]	30
Abbildung 3-5: Annahme des angepassten Kraftverlauf für den vorderen Crash ..	31
Abbildung 3-6: Annahme des angepassten Geschwindigkeitsverlauf für den vorderen Crash	31
Abbildung 3-7: Modellarten und Einsatzgebiete in der Crash-Simulation [Kra2013]	34
Abbildung 3-8: Frontstruktur im CAD (links) in der FEM (rechts) [HCC2021]	35
Abbildung 3-9: Längsträger mit Motorblock in Abaqus [HCC2021]	35
Abbildung 3-10: Vergleich der Kraft-Weg Verlaufs aus der Simulation und der Randbedingungen	36
Abbildung 3-11: Vergleich der Beschleunigungsverläufe aus der Simulation und der Randbedingungen	37
Abbildung 3-12: Vergleich des Geschwindigkeitsverlauf aus der Simulation und der Randbedingungen	38
Abbildung 4-1: Fahrerschnitt -350-Y des HCC21 [HCC2021]	42

Abbildung 5-1: Räumliche Abdeckung mit Airbags in Fahrereposition Lenkrad(links), I-Tafel(rechts), Dachairbag(unten),.....	45
Abbildung 5-2: Räumliche Abdeckung mit Airbags im Arbeitsmodus, I-Tafel (links), Dachairbag(rechts).....	46
Abbildung 5-3:Räumliche Abdeckung der Relaxposition mit Airbags, I-Tafel(links), Dachairbag(rechts).....	47
Abbildung 5-4: Räumliche Abdeckung der Relaxposition mit Kombination aus L-Airbag und Dachairbag (links) und Schnitt A-A (rechts).....	47
Abbildung 5-5:Position der 5% Frau in der LG-Position [HCC2021].....	48
Abbildung 6-1: Prinzipmodell des Dummys von Simon Schwolow [SCH2015].....	51
Abbildung 6-2: Liegepostion des Körper im Schnitt (links) in Abaqus (rechts)	52
Abbildung 6-3: Fehlbewegung des Kniegelenks in der neuen Position	53
Abbildung 6-4: Erweitertes Subsystem des Dummy Modells.....	54
Abbildung 6-5: Verbindung des Gurtes mit Sitz über einen Translator	55
Abbildung 6-6:Kraftaufnahme durch den Translator [ABA2014]	56
Abbildung 6-7: Zwischengesaltete Verbindung.....	56
Abbildung 6-8: Konnektoren Typen Hinge (links), Link (mitte), Join (rechts) [ABA2014]	57
Abbildung 6-9: Vergleich der Gurtbewegung durch die verschiedenen Konnektoren	58
Abbildung 6-10: Vergleich der Gurtkraft durch die verschiedenen Konnektoren ..	59
Abbildung 6-11: Vergleich der Kopfbeschleunigungen durch die verschiedenen Konnektoren.....	60
Abbildung 6-12: Vergleich der Brustbeschleunigung durch die verschiedenen Konnektoren.....	61
Abbildung 6-13: Vergleich der Kopf Geschwindigkeiten durch die verschiedenen Konnektoren.....	62
Abbildung 6-14: Vergleich der Brustgeschwindigkeit durch die verschiedenen Konnektoren.....	63
Abbildung 6-15: Fehlverhalten des Beckengurtes während der Simulation, Position vorm Crash (oben), Fehlverhalten durch runterrutschen (links), Fehlverhalten durch hochrutschen (rechts, Arm ausgeblendet).....	64
Abbildung 6-16: Rückhaltesystem für Liegesitz, 3-Punkt Gurt zum Zeitpunkt 0.002 s und 0.132 s [FER2019]	65

Abbildung 6-17: Fehlverhalten des Beckengurtes mit dem Torsogurt	66
Abbildung 6-18: Detaillierter Simulationsaufbau eines Insassen (rechts) [MPA2012] und angepasste Modellierung des Dummymodels (links)	66
Abbildung 6-19: Aufbau des Gurtsystems in Abaqus	67
Abbildung 6-20: Bewegungsablauf der Ausgangssimulationen	69
Abbildung 6-21: Geschwindigkeitsverlauf der Ausgangslage	70
Abbildung 6-22: Kopfbeschleunigungsverlauf der Ausgangslage	71
Abbildung 6-23: Brustbeschleunigungsverlauf der Ausgangslage	72
Abbildung 6-24: Genickkraft der Ausgangslage	73
Abbildung 6-25: Genickmoment der Ausgangslage	74
Abbildung 6-26: Ausgangslage Gurt Ausrollung	74
Abbildung 6-27: Maximale Insassenvorverlagerung des Insassen in der Simulation der Ausgangslage positioniert im -350-Y Schnitt des HCC21	75
Abbildung 6-28: Räumliche Bewegung des Oberkörpers	76
Abbildung 6-29: Vergleich der Kopfgeschwindigkeit	77
Abbildung 6-30: Vergleich der Brustgeschwindigkeit	78
Abbildung 6-31: Variante 5 Genick Kraft	82
Abbildung 6-32: Insassenbewegung in XZ-Ebene	84
Abbildung 7-1: Bewertungsmatrix der untersuchten Varianten	88
Abbildung 0-1: V5 Geschwindigkeiten	94
Abbildung 0-2: V5 Genickmoment	94
Abbildung 0-3: V5 Gurtausrollung	95
Abbildung 0-4: V5 Genickkraft	95
Abbildung 0-5: V5 Kopfbeschleunigung	96
Abbildung 0-6: V5 Oberkörperbeschleunigung	96

IV. Tabellenverzeichnis

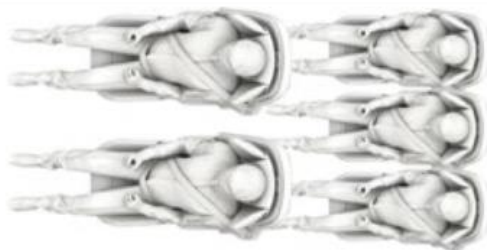
Tabelle 4-1: Morphologischer Kasten für Rückhaltesysteme in autonomen Fahrzeugen	39
Tabelle 4-2: Bewertungsmatrix verschiedener Lösungen für autonome Fahrzeuge	41
Tabelle 4-3: Herausforderungen der Lösungen mit Bezug auf das Konzeptfahrzeug HCC21.....	43
Tabelle 5-1: Fehleranalyse der Airbagsysteme für den HCC21.....	49
Tabelle 6-1: Randbedingung der Fahrzeuggeschwindigkeit über die die Zeit	53
Tabelle 6-2: Kraftwerte zum Weg beim Gurtkraftbegrenzer	55
Tabelle 6-3: HIC-Werte der Ausgangslage.....	71
Tabelle 6-4: TIC-Wert der Ausgangslage	72
Tabelle 6-5: Vergleich der Kopfbeschleunigung	79
Tabelle 6-6: Vergleich des HIC ₁₅ -Wertes.....	79
Tabelle 6-7: Vergleich des HIC ₃₆ -Wertes.....	80
Tabelle 6-8: Vergleich der Brustbeschleunigung	80
Tabelle 6-9: Vergleich des TIC ₁₅ -Wertes	81
Tabelle 6-10: Vergleich des TIC ₃₆ -Wertes	81
Tabelle 6-11: Vergleich der Genickkraft	82
Tabelle 6-12: Vergleich des Genickmomentes	83
Tabelle 6-13: Verleich der Gurtausrollung	83

1. Einführung

1.1 Motivation

Mit voranschreitendem Automatisierungsgrad von Kraftfahrzeugen rückt die Gestaltung des Innenraums immer mehr in den Fokus der Fahrzeugentwicklung. Es werden neue Konzepte der Innenraumgestaltung möglich, die in klassischen Fahrzeugen bislang nicht praktikabel waren. Verbunden damit entstehen verschiedene Aufgaben bzw. Freiheiten und Beschäftigungsmöglichkeiten für die Insassen, die nicht mehr mit dem aktiven Fahren verknüpft sind. Parallel entstehen auch Gestaltungsfreiheiten in der Sitzkonfiguration. Neben den bereits verwendeten zwei- und einreihigen Anordnungen (vgl. Punkt 1 und 2 Abbildung 1-1) sind in einem autonomen Fahrzeug Sitzkonfigurationen, wie zum Beispiel eine Lounge Anordnung, realisierbar (vgl. Punkt 3 Abbildung 1-1). Gleichzeitig sorgt die Elektrifizierung durch den Ersatz des Verbrennungsmotors sowie der Platzierung des Batteriepackage für eine veränderte Fahrzeugstrukturgestaltung und Bauraumaufteilung. [Go12017], [Laa2019], [Go22017]

1 Zweireihige Anordnung



2 Einreihige Anordnung



3 Lounge-Anordnung



Abbildung 1-1: Fahrzeuginnenraumkonzepte in hohen Automatisierungsstufen – daraus abgeleitete Beispiele für Sitzkonfigurationen [Laa2019]

Das von Studierenden an der HAW Hamburg entwickelte Konzeptfahrzeug „Hamburg Concept Car 2021“ (HCC21) integriert diese zukunftsorientierten Konzepte.

Neue mögliche Sitzkonfigurationen und Sitzeinstellungen während der Fahrt machen Untersuchungen notwendig, welche die Insassensicherheitskonzepte der neuen Insassenpositionen abdecken, ohne die neu gewonnenen Freiheiten zu stark einzuschränken. Es entstehen neue, sich anpassende räumliche Gegebenheiten, wie einem einfahrbaren Lenkrad für mehr Freiheit im Arbeitsmodus oder einem bis zu Liegeposition verstellbaren Sitz (vgl. Abbildung 1-2). Für alle Sitzeinstellungen muss die Funktionalität klassischer Sicherheitsmaßnahmen, wie Gurt und Airbag in Hinsicht auf optimalen Insassenschutz untersucht werden. Hierbei spielt auch das Zusammenwirken mit der Energieabsorption in der Fahrzeugstruktur (Knautschzonen) und die Integrität der Sicherheitszelle eine Rolle. Falls notwendig müssen Sicherheitskonzepte weiter oder neu entwickelt werden. [Laa2019], [Go22017]

1 Manueller Fahrmodus



2 Arbeitsmodus



3 Liegeposition



Abbildung 1-2: Mögliche Sitzeinstellungen mit Blick auf neue Anwendungsfälle während des automatisierten Fahrens [Laa2019]

1.2 Aufgabenstellung & Zielsetzung

Ziel dieser Masterthesis ist es, Kenntnisse von Rückhaltesystemen für neue Sitzposition in autonomen Fahrzeugen zu erlangen. Hierfür werden verschiedene Konzeptideen für die Insassensicherheit zusammengestellt. Diese werden mithilfe von Bewertungsschemata, räumlichen Untersuchungen und rechnergestützten Simulationen beurteilt, um abschließend eine Empfehlung für Rückhaltesysteme des HCC21 zu geben. Ein besonders kritischer Lastfall ist dabei der Frontalcrash in der Liegeposition. Dieser bringt die konventionellen Rückhaltesysteme durch die große relative Verschiebung des Insassen zum Innenraum an ihre Grenzen.

Zu Beginn wird eine ausführliche Zusammenstellung relevanter Grundlagen durchgeführt. Dafür werden neben menschlichen Belastungsgrenzen, konventionelle Rückhaltesystem und Sicherheitskonzepte für neue Sitzpositionen aus der Industrie vorgestellt. Zusätzlich wird das Projekt HCC21 mit relevanten Punkten für diese Arbeit zusammengefasst.

In einer ersten Auslegung werden die Eigenschaften der Frontstruktur mit Hinblick auf das Crashverhalten gegen eine starre Wand berechnet und mit parallel durchgeführten Simulationen einer Studentengruppe im Masterkurs an der HAW plausibilisiert.

Mittels eines morphologischen Kastens und verschiedener Bewertungsmaßnahmen werden Konzepte unabhängig vom HCC21 für den Insassenschutz entworfen und verglichen. Anschließend werden diese auf Realisierbarkeit im HCC21 überprüft, wobei ein besonderer Fokus der Beurteilung auf der Auslegung der Frontairbags sowie der sitzgebundenen Maßnahmen liegt. Die Airbagsysteme werden dabei mittels durchgeführter räumlicher Untersuchungen bewertet. Die Wirkung von sitzgebundenen Maßnahmen hingegen wird mit einer Simulation dargestellt und verglichen.

Die Ergebnisse der Arbeit werden kritisch dargestellt und für aufbauende Arbeiten und den weiteren Projektverlauf des HCC21 eine Empfehlung der Rückhaltesysteme gegeben.

2. Stand der Technik

Die Sicherheit im Straßenverkehr kann nicht einem einzelnen Bereich zugeordnet werden, viel mehr teilt sich diese in unterschiedliche Gruppen auf. Dazu gehören die Punkte Mensch, Fahrzeug und Umwelt (vgl. Abbildung 2-1). In der Literatur werden die Maßnahmen zum Schutz unter aktive und passive Sicherheit unterteilt. Bei der aktiven Sicherheit handelt es sich nach der Definition um unfallvermeidende Maßnahmen. Dahingegen lassen sich Maßnahmen, zur Minderung der Unfallfolgen, dem Bereich der passiven Sicherheit zuordnen. Die Gesamtsicherheit im Straßenverkehr kann dabei durch verschiedene Lösungen erzielt werden [Kra2013].

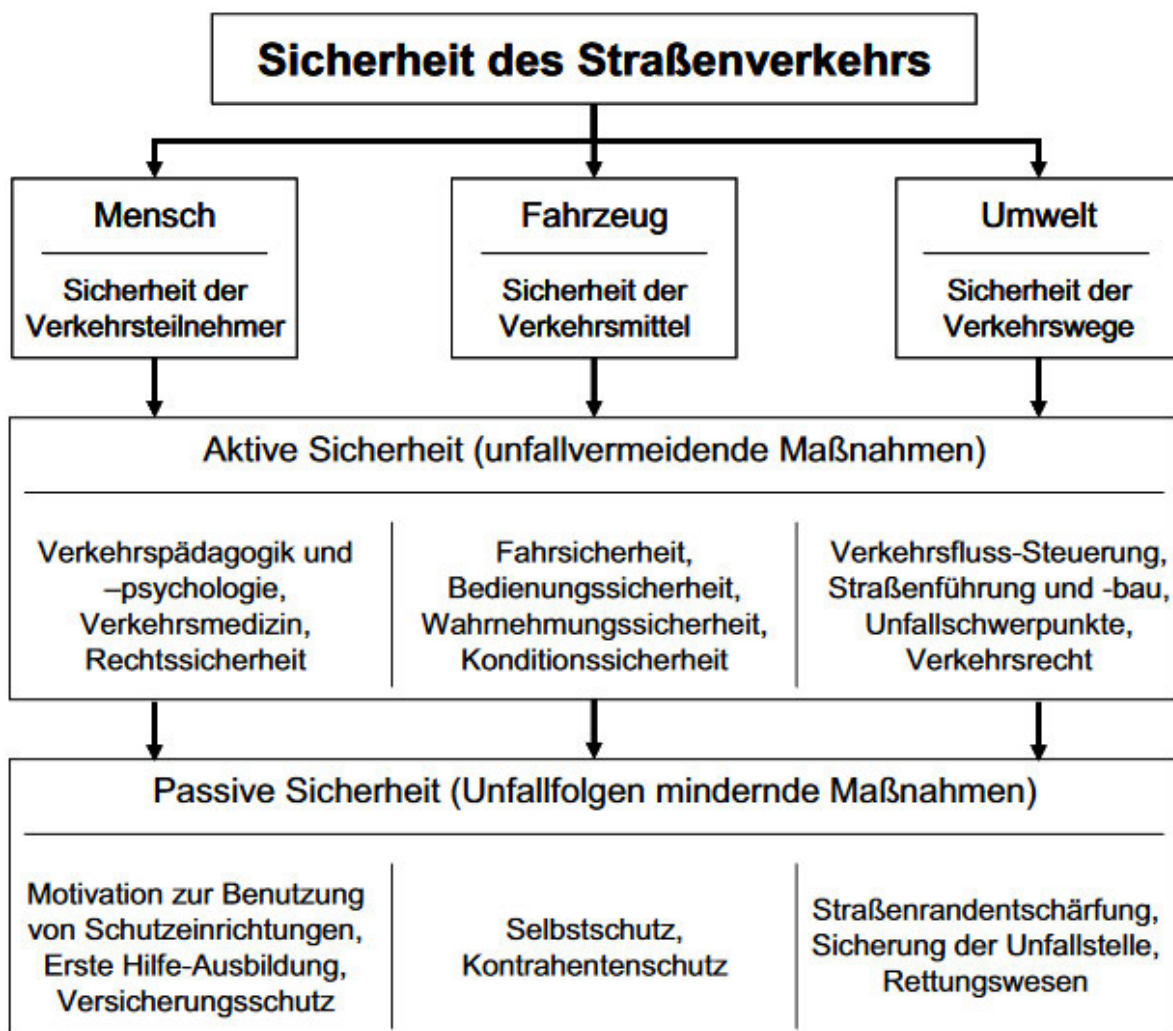


Abbildung 2-1: Teilbereiche der Straßenverkehrssicherheit und Beispiele für Sicherheitsmaßnahmen [Kra2013]

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Punkt des Selbstschutzes des Insassen, die durch Sicherheitsmaßnahmen bereitgestellt werden. Für ein besseres Verständnis der untersuchten Maßnahmen werden in diesem Kapitel die notwendigen Grundlagen erklärt. Die nachfolgenden Unterkapitel beschäftigen sich mit der Zusammenstellung der Belastungsgrenzen des menschlichen Körpers, mit der Erläuterung der Funktionsweisen konventioneller Rückhaltesysteme, gefolgt von notwendigen erweiterten Systemen für neue Sitzpositionen. Den Abschluss der Grundlagen bildet die Darstellung relevanter Punkte des aktuellen Standes des HCC21.

2.1 Menschlicher Körper

Der menschliche Körper ist ein komplexer Organismus, der durch die Biomechanik und die unterschiedliche Kraftresistenz schwer zu analysieren ist. Eine ausführliche Darstellung des Themas „Biomechanik“ ist dabei ein komplexer Bereich der Medizin, weshalb eine gründliche Betrachtung den Nutzen dieser Arbeit überschreiten würde. Um dennoch in der Fahrzeugentwicklung einen guten Insassenschutz zu gewährleisten, bedient man sich an Erkenntnissen verschiedener Studien und Versuchen. Diese sind in Tabellen mit Kraftgrenzen für einzelne Bereiche zusammengestellt, bei denen Verletzungen des menschlichen Körpers auftreten können. Bei den Kraftgrenzen unterscheidet man sowohl in einzelne Körperregionen als auch in Druck- und Zugbelastungen. Das wichtigste Auslegungsziel ist dabei die Überlebenswahrscheinlichkeit des Insassen sowie der Kontrahenten so hoch wie möglich zu realisieren. [Kra2013] Die Organisation „Euro NCAP“ testet die Sicherheit über eigene vordefinierte Crashtests. Als Bewertungskriterium und zur Vergleichbarkeit verschiedener Fahrzeugmodelle sind zulässige Kraftgrenzen definiert, die in den jeweiligen Berichten der Crashtests hinterlegt sind. [Nca2020]

Weiterhin werden zur Bewertung verschiedene Grenzwerte über Formeln berechnet. Eine der wichtigsten Formeln ist die Berechnung des HIC-Wertes (Head Injury Criterion). Der HIC-Wert ermöglicht eine Beurteilung von beschleunigungsbedingten Kopfverletzungen. [New1980]

$$HIC = \max \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} \times (t_2 - t_1) \right\} \quad (2-1)$$

Die Gleichung (2-1) der HIC Berechnung benötigt die während des Aufpralls gemessenen Kopfbeschleunigungen zum jeweiligen Zeitpunkt des Insassen. Diese werden als Resultierende für das Formelzeichen a [g] eingesetzt. Für t_1 [s] und t_2 [s] setzt man den zu betrachtende Zeitraum ein. Üblicherweise wird zur vereinfachten Analyse ein Zeitraum mit einer Zeitspanne von 15 oder 36 ms betrachtet. Als Vergleichswert zur Beurteilung dient ein HIC_{36} -Wert von 1000. [ECR2011] Damit ist die Grenze festgelegt, ab dem eine Wahrscheinlichkeit von 50 % besteht, dass eine nach AIS-Stufe 3 (Abbreviated Injury Scale) einzuordnende Verletzung auftritt. [Fae1985] Unter die AIS-Stufe 3 fallen ernsthafte Verletzungen, wie Gehirnerschütterung mit einer Bewusstlosigkeit oder der Verlust eines Auges. [Ass2005] Mit geringerem HIC-Wert sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Verletzung auftritt. Entsprechend steigt die Wahrscheinlichkeit, wenn der Wert über 1000 liegt. In den Euro NCAP Kriterien wird für den HIC_{15} eine Grenze von 700 festgesetzt [Nca2020], welche durch die Gleichung (2-1) den gleichen Schutzeffekt hat. [Kra2013]

Die Kraftniveaus und Grenzen der Belastungen lassen sich jedoch erst mit Insassensimulation oder Versuchen überprüfen. Für eine erste Auslegung der Struktur können die Grenzwerte der Fahrzeugbeschleunigung aus dem Eiband-Diagramm entnommen werden. Das Diagramm wurde von der NASA für die Raumfahrt entwickelt. Im Eiband-Diagramm wird auf der Horizontalen die Zeit und auf der Vertikalen die Beschleunigung des Fahrzeuges aufgezeigt. Im Diagramm sind drei Bereiche definiert, wobei keine Verletzungen im Bereich eins des Diagramms erwartet werden. Im zweiten Bereich sind moderate Verletzungen zu erwarten und im dritten Bereich ist anzunehmen, dass der Mensch unter dieser Belastung schwere Verletzungen davonträgt. Die Grenzen der Belastungen hängen dabei von der Richtung der Beschleunigung ab, weshalb die NASA zwei Diagramme entwickelt hat. [EIB1959] In Abbildung 2-2 wird der Lastfall für die wirkende Beschleunigung in senkrechte Richtung der Wirbelsäule gezeigt. Diese Belastung entspricht, dabei einem Frontalaufprall in herkömmlicher Sitzposition. Ein Frontalaufprall, gegen die starre Wand mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h, dauert zwischen 30 und 80 ms. [Kra2013] Aus dem Diagramm ergibt sich damit eine durchschnittliche Fahrzeugabbremmung von ca. 40 g über die Zeit, um keine Verletzungen der Insassen zu riskieren.

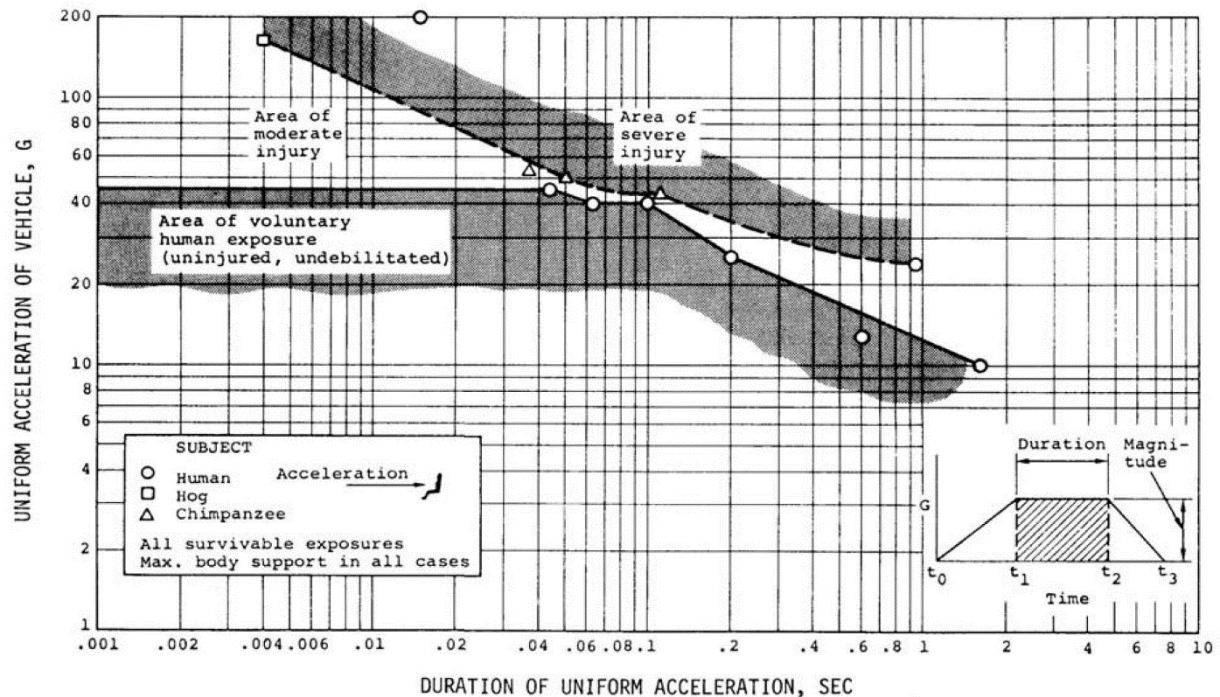


Abbildung 2-2: Dauer und Beschleunigungsstärke bei x-Beschleunigungsrichtung nach Eiband [EIB1959]

Das zweite Diagramm zeigt den Lastfall, dass die Beschleunigung in Richtung der Wirbelsäule wirkt (vgl. Abbildung 2-3). Kritisch ist, dass die Toleranz des menschlichen Körpers auf diese Art von Belastung geringer ausfällt. Bei der Belastung wird das Blut in die Füße gedrückt. Bei zu hohen Belastungen oder langer Wirkungsdauer kommt es zu einer Unterversorgung des Gehirns, was zur Bewusstlosigkeit führen kann. [HOC2015] In der Luftfahrt entstehen solche Belastungen während des Auslösens eines Schleudersitzes im Kampffjet. Für diesen Lastfall sinkt die akzeptable Belastung auf ca. 15 g, um keine Verletzungen der Insassen zu riskieren. In bisherigen privaten Kraftfahrzeugen wird der Insasse nicht solchen Lastfällen ausgesetzt. Zu erwarten ist jedoch, dass mit erhöhtem Automatisierungsgrad der Fahrzeuge, die Freiheiten der Sitzpositionswahl steigt und auch liegende Insassen transportiert werden. [Laa2019] In liegender Position entspricht der Lastfall dem des Diagramms. Für das Fahrzeug würde dies geringere Abbremsungen bedeuten, was zu längerem Crashweg sowie erhöhter Crashzeit führen würde.

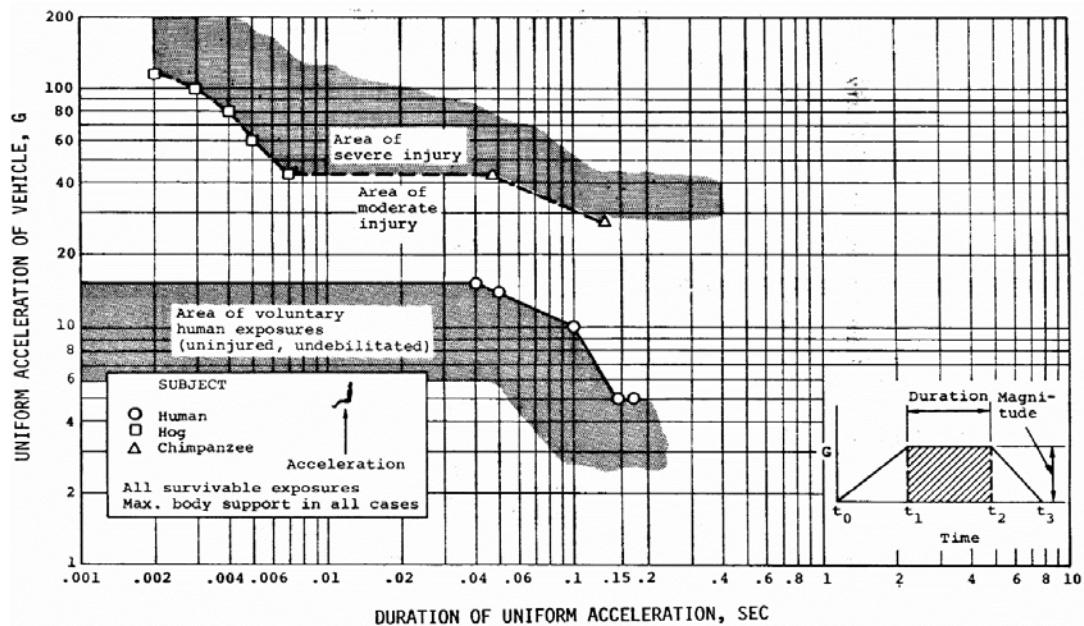


Abbildung 2-3: Dauer und Beschleunigungsstärke bei z-Beschleunigungsrichtung nach Eiband [EIB1959]

2.2 Rückhaltesysteme in konventionellen Fahrzeugen [Kra2013]

Weiterhin ist für den Insassenschutz ein Verständnis der Rückhaltesysteme notwendig. Die Notwendigkeit der Sicherheitssysteme zum Schutz ist über zwei schematische Diagramme in der Abbildung 2-4 gezeigt. In den Diagrammen ist die Verzögerung des Insassen über den Winkel „ α “ zu erkennen. Fällt der Winkel stumpfer aus, ist die Verzögerung größer. Bei einem Frontalcrash wird das Fahrzeug über die Knautschzone der vorderen Struktur verzögert. Vereinfacht wird hier die Fahrzeuggeschwindigkeit konstant verringert. Während das Fahrzeug abgebremst wird, bewegt sich der Passagier durch die Massenträgheit im Inneren weiter. Hat das Fahrzeug dabei keine Rückhaltesysteme, wie im Diagramm a, wird der Insasse erst durch den Aufprall auf das Lenkrad oder Armaturenbrett abgebremst. Durch fehlende Nachgiebigkeit der Interieurbauteile wird der Insasse in kürzester Zeit auf die Geschwindigkeit des Fahrzeuges abgebremst. Wodurch die Geschwindigkeit nahezu unter dem Winkel von 90° abfällt. In Diagramm b greifen während der Verzögerung dahingegen die Rückhaltesysteme wie z. B. das Gurtsystem ein. Damit ist der Zeitpunkt, zu dem der Insasse mit der Verringerung der Geschwindigkeit beginnt, näher am Crash Zeitpunkt. Außerdem geben die Rückhaltesysteme ab einer bestimmten Kraft nach, wodurch die Geschwindigkeit und die damit verbundene Verzögerung kleiner ausfällt (vgl. Abbildung 2-4). Die Effektivität der Rückhaltesysteme kann über den Winkel der Geschwindigkeit bewertet werden.

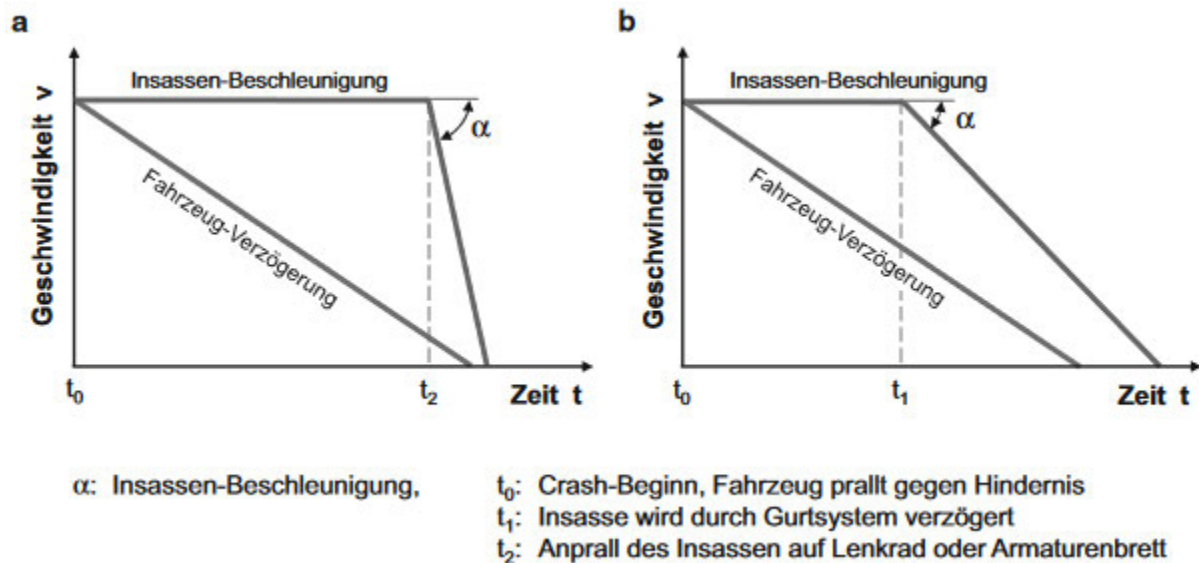


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Fahrzeugschleppkurven und der Insassenbeschleunigungen ohne Gurt (a) und mit Gurt (b) [Kra2013]

Ziel in der Entwicklung von Rückhaltesystemen ist es, den Insassen bestmöglich mit dem Fahrzeug bzw. dem Sitz zu verbinden, um so den Zeitpunkt des Beginns der Verzögerung des Insassen an den Crashzeitpunkt anzunähern. Dadurch wird erreicht, dass die Belastung auf den Menschen sich der Belastung des Fahrzeuges anpasst und die Überlebenschancen steigt.

2.2.1 Gurtsysteme

Einer der wichtigsten Rückhaltesysteme ist das Gurtsystem. Der Effekt für die Sicherheit zeigt sich in der Statistik vor und nach der Einführung der Gurtspflicht in einzelnen Ländern. [DEU2011] Dabei hat sich das Gurtsystem über die Zeit kontinuierlich weiterentwickelt. Ausschlaggebend waren unter anderem immer höhere Sicherheitsanforderungen, insbesondere vom Gesetzgeber und dem Verbraucherschutz. Über die Zeit wurde im Fahrzeug der anfängliche Zweipunkt-Beckengurt durch einen Dreipunktgurt ersetzt, der heutzutage in Kraftfahrzeugen Standard ist. Dabei unterscheiden sich die Typen der Gurtsysteme durch die Anzahl der karosseriefesten Anbindungspunkte, wodurch die Systeme ihren Namen erhalten. Im Gegensatz zum normalen Straßenverkehr nutzt der Rennsportbereich Mehrpunktgurtsysteme, meist 6-Punktgurte. Der Vorteil von Mehrpunktgurtsystemen ist dabei, dass der Insasse durch das Gurtsystem, insbesondere wenn dieser richtig angelegt wird, in seiner Bewegung gehindert wird und damit der Rückhalt nahezu zeitgleich mit dem Crash besteht. Nachteilig für den alltäglichen Fahrer ist

jedoch die geringere Bewegungsfreiheit im Fahrzustand. Resultierend dadurch entstehen Erreichbarkeitsprobleme einiger Bedienelemente, die im privaten Fahrzeug benutzt werden. Außerdem fehlt die Akzeptanz solcher Mehrpunktgurtsysteme, da Insassen sich unter anderem davon bedrängt fühlen.

Während der Entwicklung im Fahrzeug wurde das bestehende Gurtsystem durch den Gurtstraffer und Gurtkraftbegrenzer erweitert. Der Effekt des Gurtes als Rückhaltesystem verbessert sich, wenn dieser sehr eng am Körper anliegt. Durch den Einsatz eines Gurtstraffers wird versucht, mögliches Spiel zwischen Gurt und Insassen vor dem oder bei dem Crash zu entfernen. Um den Insassen überhaupt mit dem Gurt aufzufangen, blockiert der Gurtaufroller bei ruckartigem Herausziehen des Gurtes. Um sicherzustellen, dass schwere Verletzungen wie Rippenbrüche durch den Gurt verhindert werden, setzt man einen Gurtkraftbegrenzer ein. Dieser setzt ein Kraftlimit von ca. 4,0 kN der Gurtblockade fest. Wird eine größere Kraft erreicht ist das Ausrollen des Gurtes wieder ermöglicht. Parallel wird damit sichergestellt, dass die Brustbeschleunigung nicht über 50 g steigt. Der Einfluss des Gurtkraftbegrenzers auf den Verlauf der Brustbeschleunigung wird in der Abbildung 2-5 erkennbar. Die gestrichelte Kurve zeigt dabei den Verlauf der Brustbeschleunigung über die Crashzeit. Die durchgezogene Kurve zeigt für den gleichen Lastfall die Kurve mit einem Gurtkraftbegrenzer, der ab einer Kraft von 4,0 kN einsetzt. Damit wird die Brust-Beschleunigung wie im Verlauf zu erkennen auf 50 g begrenzt. Auf der Belastungsgrenze entsteht ein Plateau, welches einen gewissen Zeitraum gehalten wird. Die Brustbeschleunigungen erreichen dabei nahezu zeitgleich Belastungen unter 5 g, womit ein Ende des Crashes erkennbar wird.

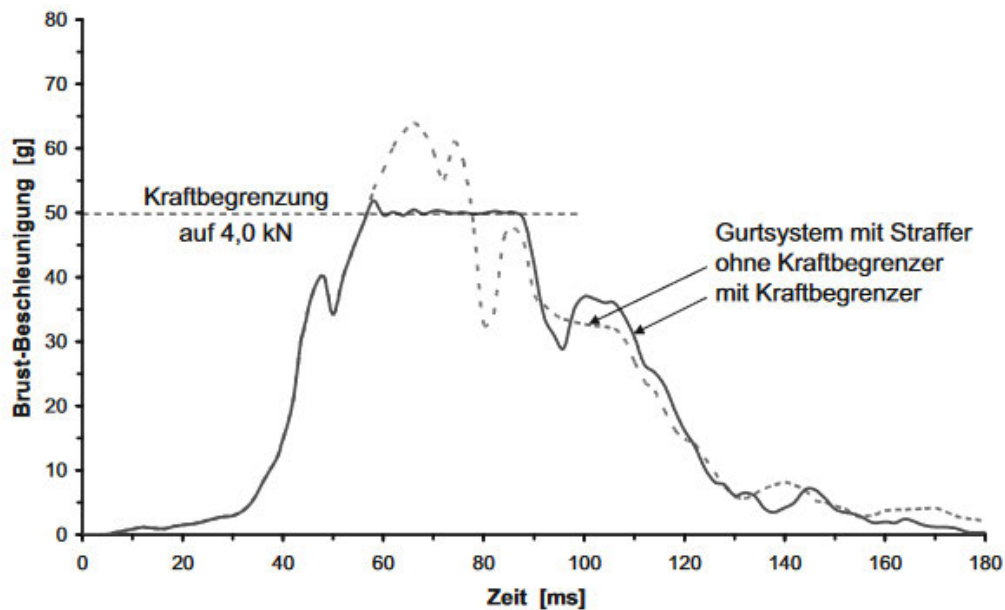


Abbildung 2-5: Einfluss des Gurtkraftbegrenzers auf die Dummy-Brustbeschleunigung ($v= 56,2$ km/h) [Kra2013]

Eine weitere Möglichkeit Verletzung des Brustkorbes zu minimieren ist der Einsatz eines Gurt-Bag (vgl. Abbildung 2-6). Mithilfe eines im Gurt verbauten Schlauchairbags kann die Anlagefläche des Gurtes am Körper erhöht werden. Dadurch verteilt sich die Rückhalte-kraft durch die erhöhte Gurtanlagefläche besser auf der Brust, wodurch hohe punktuelle Belastungen verhindert werden. Bisher wird dieser nur gering in Fahrzeugen eingesetzt, weil die bisherigen Dummymodelle keine Verbesserung im Crashfall auswerten können. Schuld daran sind fehlende Sensoren im Dummy.



Abbildung 2-6: Gurt-Bag zur Vergrößerung der wirksamen Gurtband-Breite im ESF 2009 von Mercedes-Benz [CHR2009]

2.2.2 Airbag Systeme

Das Gurtsystem allein bietet keinen vollständigen Rundumschutz des Insassen. Das Rückhaltesystem hat insbesondere Probleme damit, die Energie des Kopfes moderat zu minimieren. Der Kopf wird dabei durch den Peitscheneffekt stark abgebremst, weshalb es zu einem Traumatoma kommen kann. Daher ist neben dem Gurtsystem das Airbagsystem eins der wichtigsten passiven Sicherheitselemente für den Fahrzeuginsassen. Ein Airbag ist dabei ein Kunststoffsack, der sich im Falle eines Unfalles durch Pyrotechnik innerhalb von 30 bis 80 Millisekunden entfaltet. Der entfaltete Airbag dient als Auffang- und Knautschzone zwischen Insassen und Teilen des Fahrzeuginnenraums. Die benötigte Dauer des Entfaltens setzt sich dabei aus der Impulsfortpflanzung aus dem Aufprall von 2 ms, der Sensorreaktion von 16 ms dem Zündverzug von 15 ms und der Aufblaszeit des Airbags zusammen, der beim Fahrer max. 35 ms und beim Beifahrer max. 50 ms dauert (vgl. Abbildung 2-7). Der Unterschied zwischen den beiden Sitzseiten entsteht durch den Abstand des Lenkrades zum Insassen auf der Fahrerseite. Der Airbag muss kleiner ausgeführt werden, wodurch die benötigte Zeit zum Aufblasen des Airbags kürzer ausfällt.

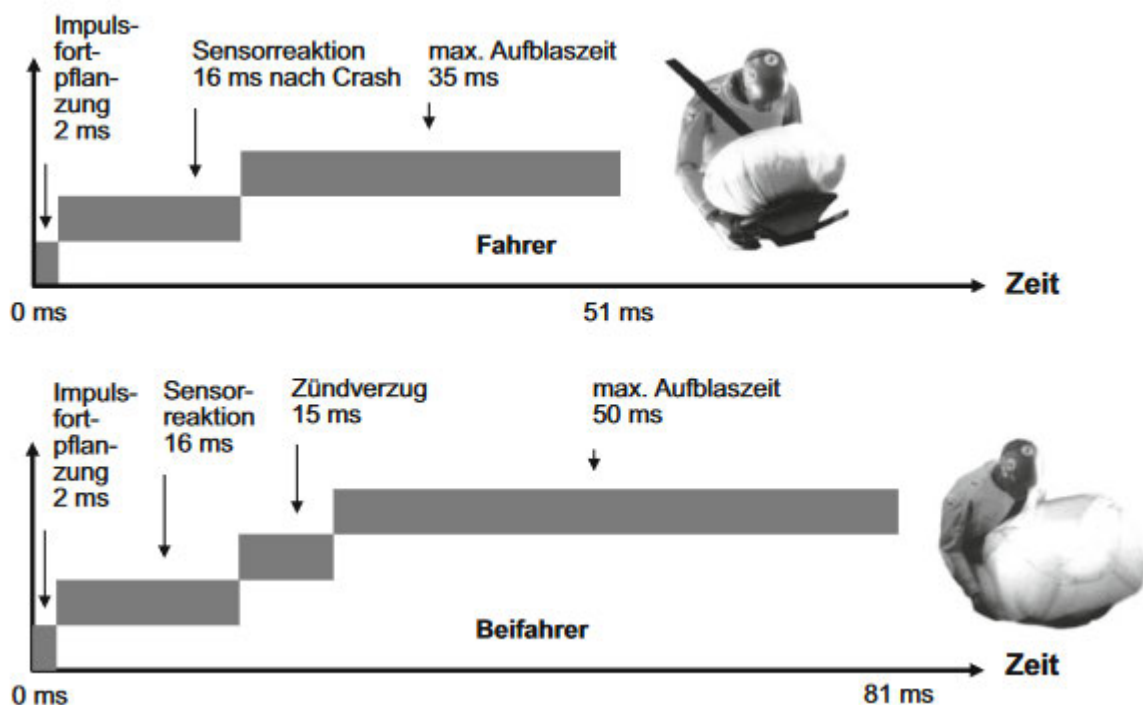


Abbildung 2-7 Zeitlicher Ablauf der Airbag-Auslösung für Fahrer und Beifahrer [SCH1996]

In der Abbildung 2-8 ist zu erkennen, dass beim Fahrer der Airbag nach 30 ms vollständig aufgeblasen ist. Auf der Beifahrerseite dauert dieser hingegen 45 ms (vgl. Abbildung 2-9). Weiterhin ist zu erkennen, dass zum Zeitpunkt 75 ms der Kopf des Beifahrers trotz des Airbags im Vergleich zum Fahrer stärker nach vorne rotiert.

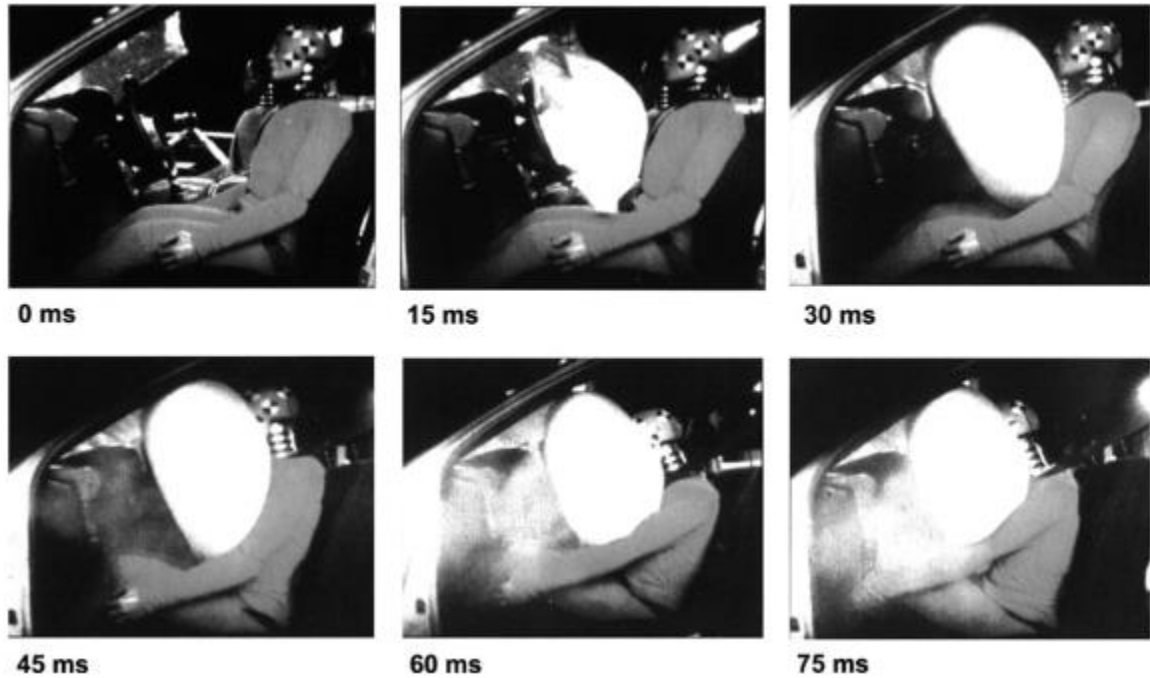


Abbildung 2-8: Insassen-Bewegungsablauf bei einem 55 km/h-Barrieretest (Fahrer) [Kra2013]

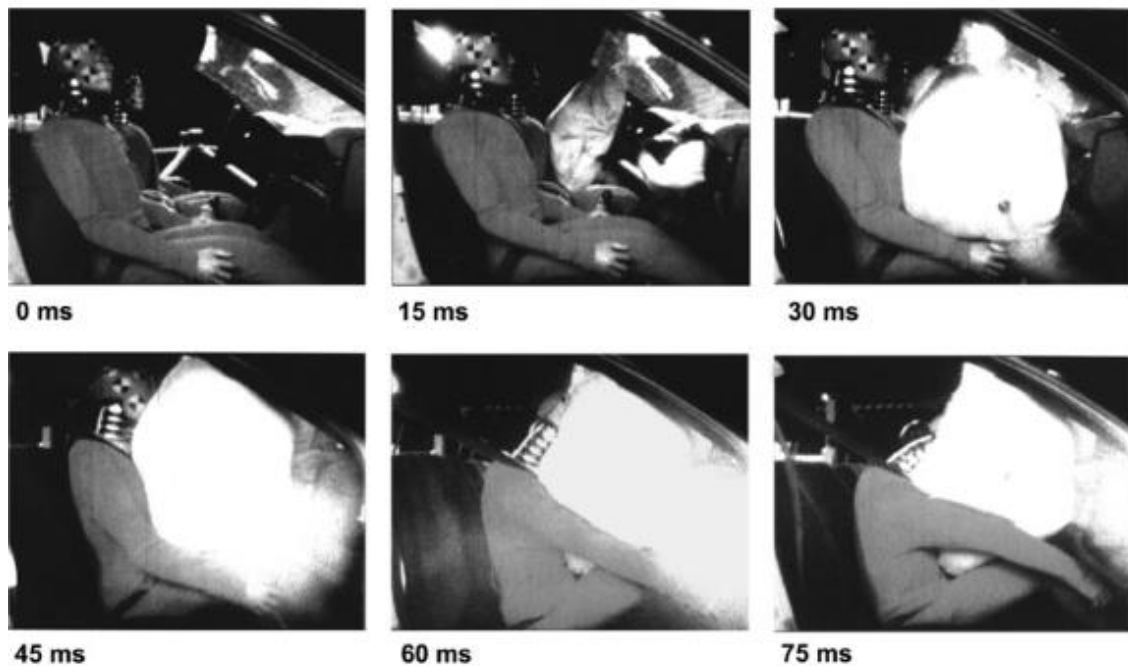


Abbildung 2-9: Insassen-Bewegungsablauf bei einem 55 km/h-Barrieretest (Beifahrer) [Kra2013]

Dabei wurden im Laufe der Zeit verschiedene Positionen der Airbags ausprobiert, die meist für unterschiedliche Crashlastfälle eingesetzt werden. Diese sind mittlerweile meist Stand der Technik und aus sicheren Fahrzeugen heutzutage nicht mehr wegzudenken.

Problematisch beim Einsatz von Airbags ist die Abdeckung von Out-of-Position Fällen. Bei den Out-of-Position Fällen ist der Insasse außerhalb der angedachten Sitzposition oder Haltung, z. B. durch Vorbeugen, um etwas im Fußraum erreichen (vgl. Abbildung 2-10). In diesen Fällen kann das Rückhaltesystem zu einem Sicherheitsrisiko für die Insassen werden. Daher wird versucht, solche Fälle zu erkennen und im Falle dieser Situation die Airbags nicht auszulösen.

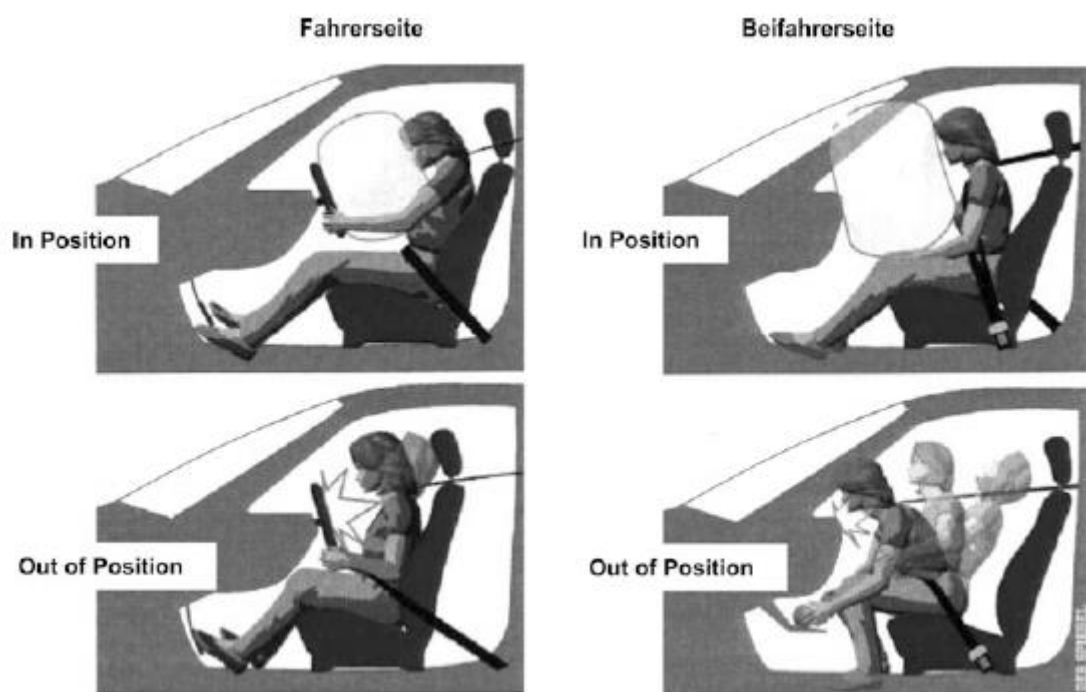


Abbildung 2-10: Out of Position-Situationen im Vergleich zur normalen Sitzpositionen (In Position) auf der Fahrer- und der Beifahrer-Seite [Kra2013]

2.3 Rückhaltesysteme für erweiterte Sitzpositionen

Bei neuen Konzeptideen für autonome Fahrzeuge der Klasse 4 und 5 ist der Trend zu erkennen, den Insassen mehr Freiheiten in der Wahl der Sitzposition zu geben. Damit Verbunden ergeben sich neue Herausforderungen für die Rückhaltesysteme. Verschiedene Lösungsansätze können in den Konzepten der Fahrzeughersteller und der Entwicklungsdienstleister erkannt werden.

Viele Konzepte autonomer Fahrzeuge basieren im Innenraum auf der Möglichkeit eine Zero-Gravity Position einzunehmen (vgl. Abbildung 1-2), die angelehnt an die neutrale Körperhaltung (engl. Neutral Body Posture NBP) ist. Die NBP wurde dabei von der NASA in der Schwerelosigkeit entwickelt und getestet. [NAS1980] Ziel war es Müdigkeit und Belastungen der Astronauten während des Startes zu minimieren. Die NASA Identifizierte diese Sitzhaltung als die Optimale, um eine entspannte Körperhaltung einzunehmen. Dieser Effekt entsteht maßgeblich durch die Entlastung der Wirbelsäule [NAS1980] und die Verteilung der Kraft über die gesamte Sitzfläche [NAS2020]. Um diese Sitzhaltung einzunehmen, gibt es verschiedene Winkel des Körpers und der Gliedmaßen, die einzuhalten sind. Diese können der Abbildung 2-11 entnommen werden. Im Fahrzeug wird diese Position durch ein Lehnen Winkel von 60° zur Vertikalen gekennzeichnet. Diese nahezu liegende Position stellt die bisherigen Rückhaltesysteme vor große Herausforderungen, die zu lösen sind [Laa2019].

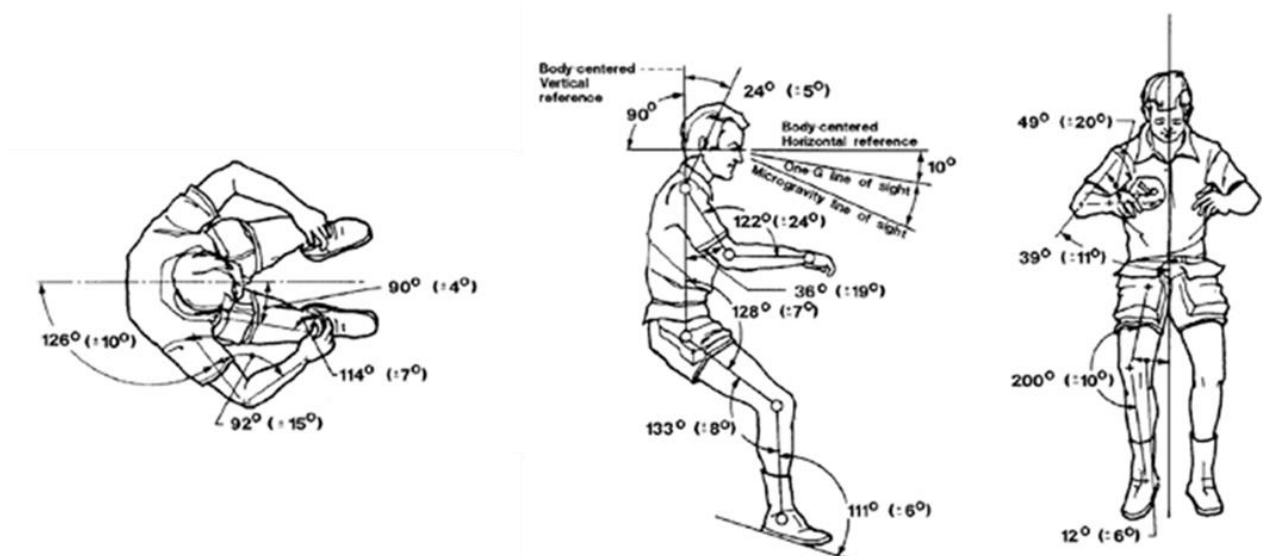


Abbildung 2-11: Grenzwinkel der Neutral Body Posture [NAS1980]

2.3.1 Lösungsansatz der Firma ZF Friedrichshafen [Laa2019]

Die Firma ZF hat bereits die Herausforderungen der konventionellen Rückhaltesysteme an neue Sitzpositionen untersucht und jeweilige Lösungen für die Positionen beschrieben. Der manuelle Fahrmodus kann mit den Standardsicherheitsmaßnahmen abgedeckt werden. Wenn der Sitz im Arbeitsmodus zurückfährt oder der Insasse in die Zero-Gravity-Position gebracht wird, kann die Funktion vom Sicherheitsgurt, der an der B-Säule befestigt wird, nicht mehr erfüllt werden. Außerdem ändert sich die Position des Kopfes. Der Abstand vom Lenkrad zum Kopf vergrößert sich in den neuen Positionen, zusätzlich ändert sich auch die Position in Z-Richtung in der Liegeposition. Als Lösungen wurden daher die Rückhaltesysteme geändert. Einerseits wird das bisherige Gurtsystem durch einen sitzintegrierten Sicherheitsgurt getauscht. Hierdurch wird das Anliegen des Gurtes an den Passagier verbessert, da sich dieser mit dem Insassen verschiebt. Andererseits wird das Volumen der Airbags für die neuen Herausforderungen vergrößert. Beim Frontalcrash soll damit der Kopf früher vom Airbag aufgefangen werden (vgl. Abbildung 2-12).

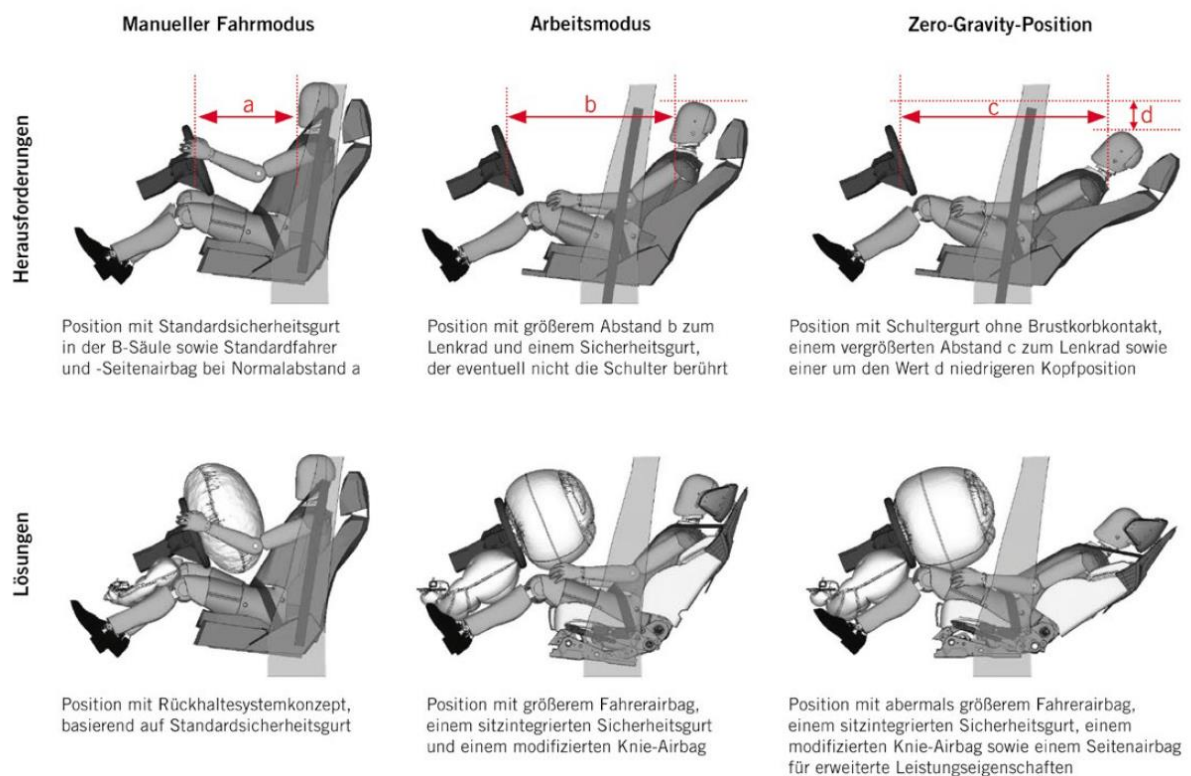


Abbildung 2-12: Auswirkung neuer Sitzpositionen und schematische Konfigurationen entsprechender Insassenschutzsysteme [Laa2019]

Die Lösungsansätze für den Arbeitsmodus wurden mit einem Thor Dummy simuliert und verglichen. Es wurden die konventionellen Rückhaltesysteme und die erweiterten Systeme für den Arbeitsmodus getestet. Aus der Insassenkinematik wurden die Zeitpunkte für den ersten Kopfkontakt zum Airbag und die maximale Insassen-Vorverlagerung verglichen. Bei den erweiterten Rückhaltesystemen kommt es dabei um 6 ms früher zum Kontakt des Kopfes mit dem Airbag. Zusätzlich erhöht sich der Zeitpunkt bis zur maximalen Insassen Vorverlagerung auf 120 ms beim erweiterten Rückhaltesystem. Im Vergleich dazu sind es beim konventionellen System nur 113 ms (vgl. Abbildung 2-13). Daraus resultiert, dass der Kopf über einen längeren Zeitraum und Weg verzögert wird, was zu geringeren Belastungen führt.

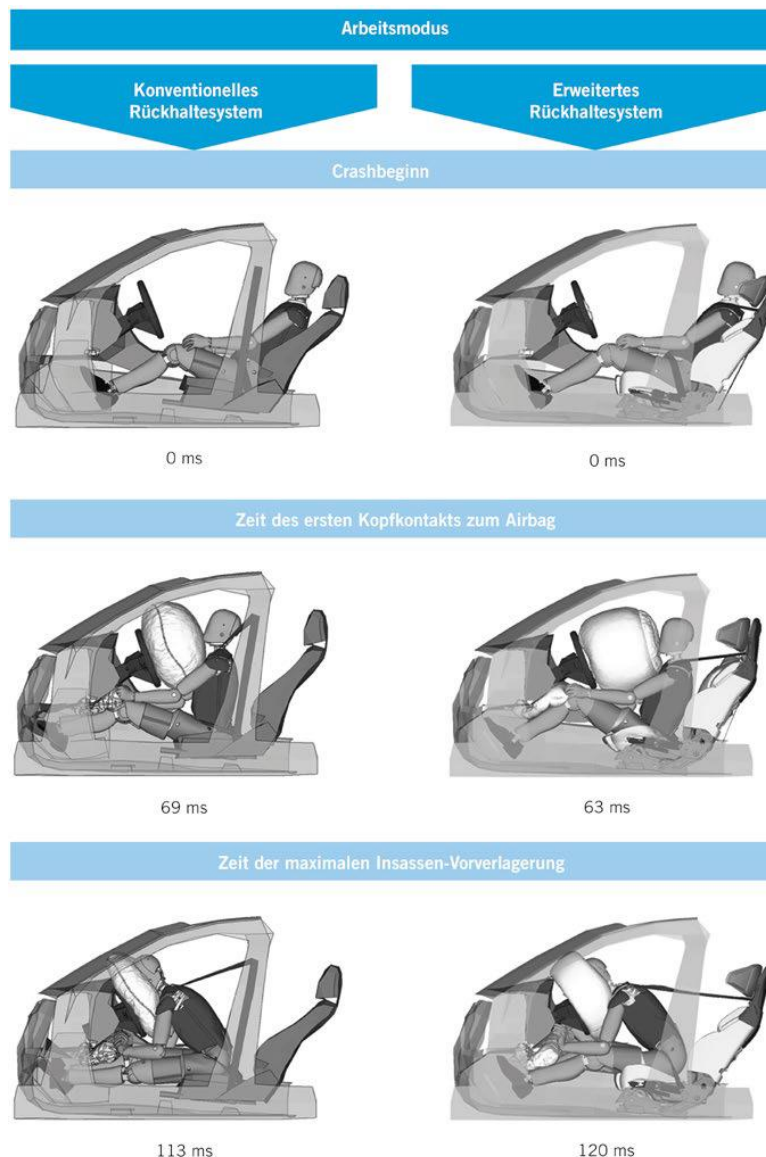


Abbildung 2-13: Vergleich der Insassenkinematik bei konventionellen (links) und erweitertem (rechts) Rückhaltesystem im Arbeitsmodus

Die Effektivität der erweiterten Sicherheitssysteme zeigt sich zusätzlich bei den Belastungswerten aus der Simulation der Lastfälle. Dabei werden zusätzlich die Belastungswerte im manuellen Fahrmodus verglichen. Der Vergleich zwischen dem konventionellen und dem erweiterten Rückhaltesystem zeigt dabei, dass das erweiterte System in jeder untersuchten Belastung geringere Werte erreicht. Beim Vergleich der Sitzpositionen ist festzustellen, dass die Belastungen am Kopf, gemessen durch HIC₁₅, BrIC (Brain Injury Criterion) und N_{ij} bzw. NIC (Neck Injury Criterion), in der neuen Sitzposition höher ausfallen. Dahingegen fallen die Belastungen des Torsos oder der Beine mit den erweiterten Rückhaltesystemen besser aus (vgl. Abbildung 2-14). Ein Grund dafür kann die Steifigkeit der eingesetzten Airbags sein, die durch die größeren Abstände mehr Weg zur Aufnahme der Energie haben.

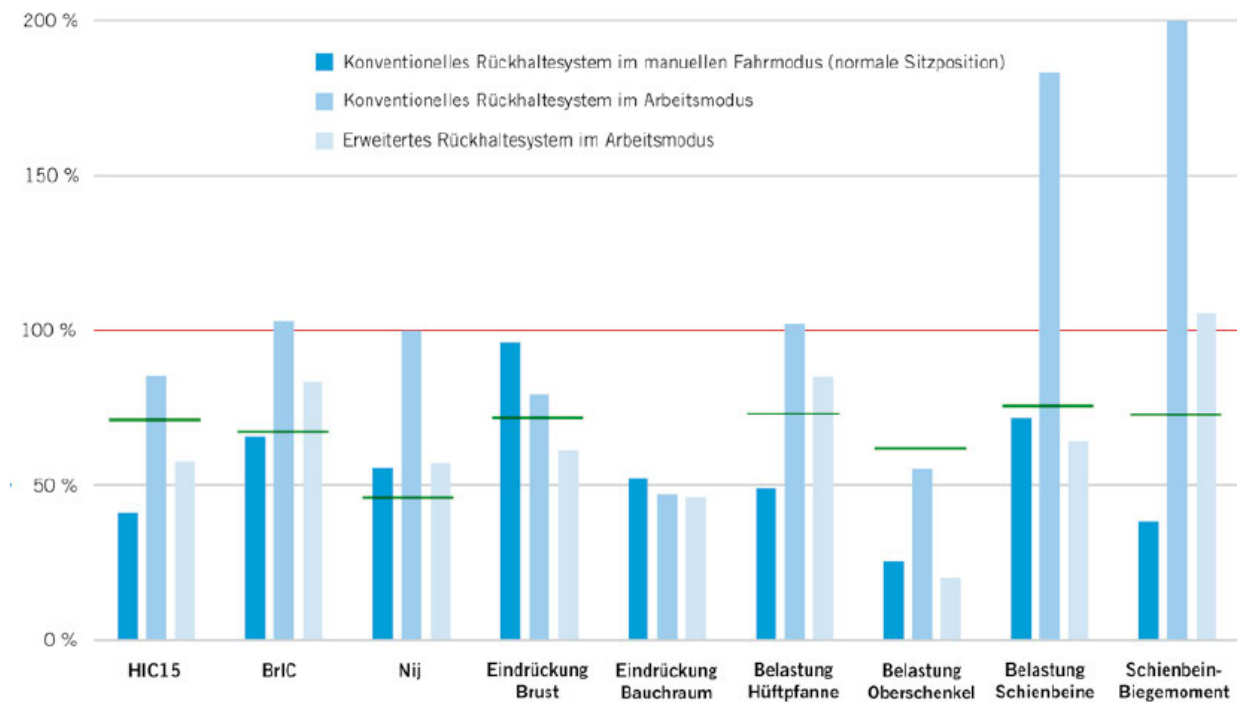


Abbildung 2-14: Maximale relative Belastungswerte am Crashtest-Dummy. Vergleich zwischen dem manuellen Fahrmodus und dem Arbeitsmodus mit konventionellem und erweitertem Rückhaltesystem

ZF hält auch fest, dass im Fahrzeug am Ende ein abgestimmtes System verbaut sein muss, dass alle möglichen Aktivitäten abdeckt. Nur durch neue Techniken und Adaptivität der Systeme ist die Sicherheit der Insassen zu gewährleisten.

2.3.2 Lösungsansatz der Firma Mercedes-Benz [DAI2020]

Mercedes-Benz gibt in ihrem Experimental-Sicherheitsfahrzeug ESF 2019 einen Einblick auf künftige Sicherheitsfunktionen und Rückhaltesysteme, die an zukünftigen Randbedingungen, wie dem autonomen Fahren (Level 4 Fahrzeug), angepasst sind. Ähnlich zu der Untersuchung von ZF sieht auch Daimler die Notwendigkeit des Einsatzes eines Gurtintegralsitzes vor, um die im Konzeptfahrzeug vorgesehene entspannte Sitzposition (Arbeitsposition) mit dem Gurtsystem sicherheitstechnisch abzudecken. Dafür wird der Gurtumroller in der Sitzlehne verbaut (vgl. Abbildung 2-15).



Abbildung 2-15: Gurtintegralsitz des ESF 2019 [DAI2020]

Neben den Änderungen am Gurt wurden auch die Airbagsysteme an die neuen Randbedingungen im Fahrzeug angepasst. Die größte Anpassung wurde dabei am Frontairbag auf der Fahrerseite unternommen. Aus Komfortzwecken bietet man an, das Lenkrad im autonomen Modus einzufahren, um damit mehr Freiraum zu erreichen. Durch das Einfahren des Lenkrades wird Raum zwischen dem Lenkrad und dem Fahrer geschaffen, der mit dem herkömmlichen Lenkradairbag nicht mehr gefüllt werden kann. Daher wird im Konzept der Airbag in der Instrumententafel untergebracht (vgl. Abbildung 2-16 und Abbildung 2-17), der sich durch die Gestaltung und das Ausfallen über das Lenkrad öffnet. Des Weiteren besteht durch den Nutzen eines Gurtintegralsitzes die Möglichkeit, Seitenairbags im Sitz unterzubringen, die neben dem Oberkörper ebenso den Kopf schützen (vgl. Abbildung 2-16).



Abbildung 2-16: Airbagsystem auf der Fahrerseite des ESF [DAI2020]



Abbildung 2-17: Fahrerairbag auf der Fahrerseite sichtbar durch eine Scheibe im Armaturenbrett des ESF [DAI2020]

Neben den vielen von Daimlers gezeigten Innovationen im Innenraum ist es auch wichtig zu erwähnen, dass die Sicherheit bereits mit Maßnahmen zur Vermeidung beginnt. Dabei beginnen Daimlers Ideen mit der Kommunikation über die Heckscheibe und enden mit der Unfallsicherung durch automatisierte Warndreieckroboter.

2.3.3 Lösungsansatz der Firma BMW [BMW2020]

Auf der CES 2020 hat BMW unter anderem ihre Vorstellung der neuen Sitzmöglichkeiten mit dem ZeroG Lounger gezeigt. Dabei ist dieser dem Beifahrer vorbehalten. Der Passagier kann während der Fahrt seine Sitzposition bis zu einer maximalen Ausrichtung, die an die Zero-Gravity-Position angelehnt ist, ändern. Zur Absicherung der Position im Falle eines Crashes, wurde ein Gurtintegralsitz entwickelt, bei dem zusätzlich ein Cocoon-Airbag verbaut ist. Dieser umhüllt den Fahrgast beim Unfall ganzheitlich und das in jeglicher Position. Zusätzlich zum Schutz wird über die Sitzschienen Energie abgebaut.



Abbildung 2-18: Cocoun Airbag für den ZeroG Lounger von BMW [BMW2020]

2.3.4 Zusammenfassung der Lösungsansätze für neue Sitzpositionen

Die Konzeptidee aus der Industrie zeigt die Tendenz für die Zukunft neuer Sitzpositionen in autonomen Fahrzeugen. Dabei sind zwischen den Ideen verschiedene Parallelen zu erkennen. Die wichtigsten Punkte bei den Rückhaltesystemen sind einerseits, dass Systeme, die bisher karosserie-seitig befestigt waren, dazu tendieren am Sitz befestigt zu werden. Des Weiteren müssen die Airbags für den Frontalaufprall, die bisher im Lenkrad verbaut sind, überarbeitet oder andere Konzepte entworfen werden. Hier zeigen sich die größten Unterschiede in den Lösungen. Jede Firma löst die Herausforderung auf unterschiedliche Art und Weise.

2.4 Hamburg Concept Car 2021 (HCC21) [HCC2021]

Das Department Fahrzeugtechnik der HAW Hamburg feiert 2021 das 125-jährige Jubiläum der Wagenbauschule Hamburg. Zu diesem Anlass werden von den Studierenden mithilfe der Professoren in unterschiedlichen Vorlesungen und Projekten, Department übergreifend, ein Prototypfahrzeug entwickelt. Dieses Prototypenfahrzeug soll als begehrtes Showcar vorgestellt werden. Das Konzept des Fahrzeuges sieht vor, ein autonomes E-Fahrzeug Level 4 mit den Grundabmaßen, 4321 mm L x 1801 mm B x 1639 mm H, zu entwickeln (vgl. Abbildung 2-19).


HCC21 Mission: „Focus on your needs“ Markt: Europa, China Volumen: 60.000 Einheiten p.a. Markteinführung: 2025 Laufzeit: 7 Jahre Einstiegspreis: 39.000 € Automatisierungsgrad: Level 4		
<u>Karosserie</u> Karosserieform: MPV Türen: 5 Sitzplätze: 4 Kofferraum: ca 510 L Länge: 4321mm Breite: 1801mm Höhe: 1639mm Radstand: 2900 mm Überhang v/h: 765/656 mm	<u>Antrieb und Fahrwerk</u> Antrieb: 1x PSM, Frontmotor Leistung: 155 kWh Getriebe: feste Übersetzung Batterie: Li-Ion V1: 120 kWh V2: 60 kWh Achse vorne: McPherson Achse hinten: Mehrlenker Räder: 225/50R18 99T (Ø 705 mm) Wendekreis: 11,0 m	<u>Fahrleistung und Verbrauch</u> v_{max}: 180 km/h Max. Drehmoment: ca 350 Nm Verbrauch (WLTP): V1: 21,36kWh/100km V2: 20,19kWh/100km Reichweite (WLTP): V1: 660km V2:352km Leergewicht: 2150kg/2510kg zul. Gesamtgewicht: max. 2.840 kg

Abbildung 2-19: Konzeptsteckbrief des HCC21 [HCC2021]

Neben dem Grundkonzept wurden im Innenraum unterschiedliche Konzepte entwickelt, die insbesondere den Aufenthalt im Fahrzeug aufwerten. Im Folgenden sollen die Ideen und die damit verbundenen Randbedingungen für ein besseres Verständnis vorgestellt werden. Das Highlight im Innenraum ist die Möglichkeit in der vorderen Sitzreihe eine Low-Gravity Position (LG Position) einzunehmen. Auf der Fahrerseite kann dies nur im autonomen Modus genutzt werden. Den Insassen wird durch verschiedene Entertainment Konzepte das Wohlfühl verbessert. Unter anderem können Videos auf einem Bildschirm in der Sonnenklappe abgespielt werden. Zusätzlich ändern sich auch die Bedienungsmöglichkeiten in dieser Position (vgl. Abbildung 2-20).



Abbildung 2-20: LG-Position im HCC21 [HCC2021]

Zusätzlich zur Liegeposition wird ein Arbeitsmodus angeboten. Um in dem Modus das Raumangebot auf der Fahrerseite zu vergrößern, wird ein verfahrbares Lenkrad verbaut (vgl. Abbildung 2-21). Zusätzlich besteht die Möglichkeit, ein Tisch/Bedienfeld auszuklappen, um den gewonnenen Raum sinnvoll zu nutzen. Damit wird das Display in der Instrumententafel noch besser nutzbar. Der Fahrer kann das Bedienfeld dabei aus der Mittelkonsole rausfahren lassen (vgl. Abbildung 2-22).

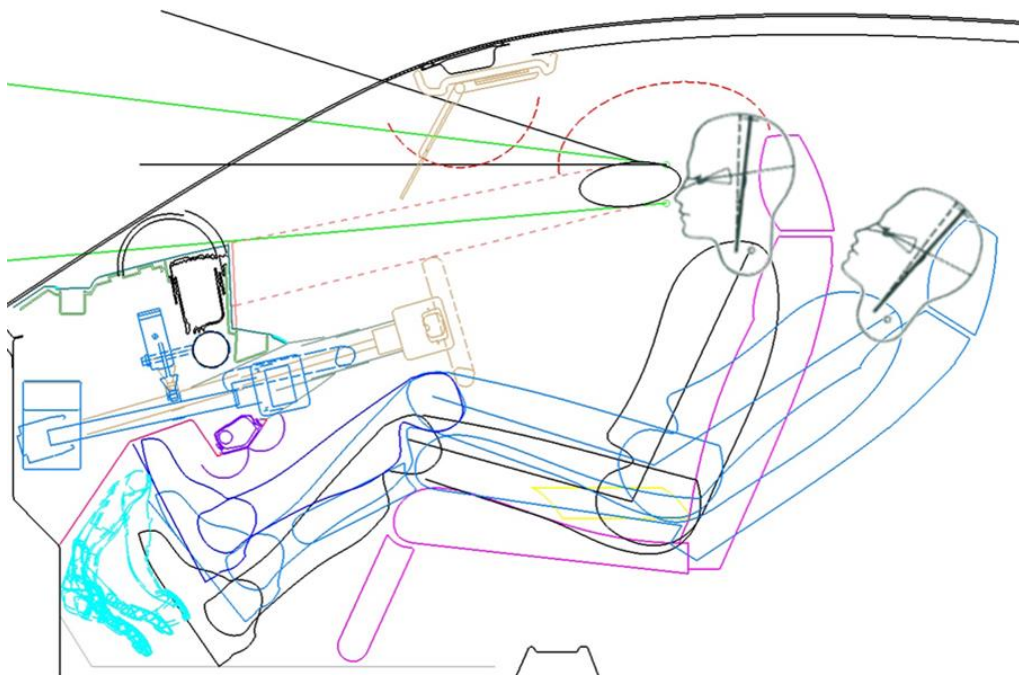


Abbildung 2-21: -350-Y Schnitt vom Fahrerplatz [HCC2021]



Abbildung 2-22: Bedienfeld auf der Fahrer Seite [HCC2021]

Auf der Beifahrerseite kann das Bedienfeld aus der I-Tafel ausgeklappt werden, wodurch unter anderem auch die Fläche des Displays erhöht wird (vgl. Abbildung 2-23 und Abbildung 2-24).

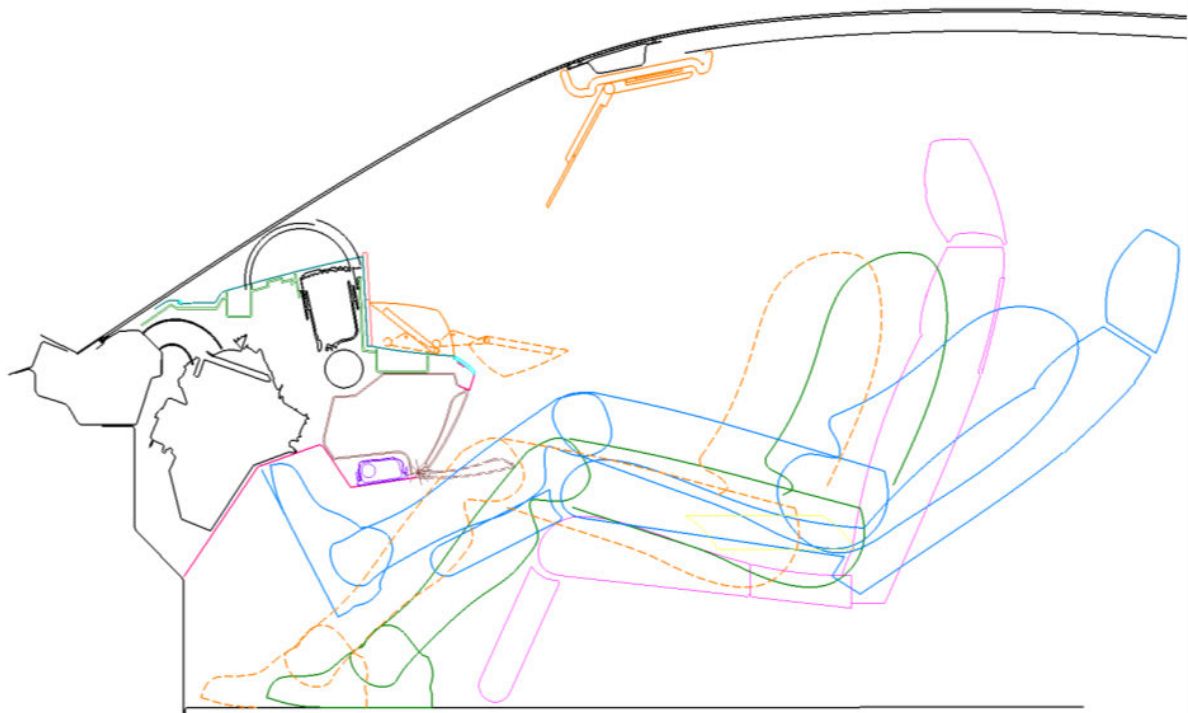


Abbildung 2-23: Klappbare I-Tafel auf der Beifahrer Seite [HCC2021]



Abbildung 2-24: Bedienfeld auf der Beifahrerseite eingeklappt (links) und ausgeklappt (rechts) [HCC2021]

Die Innenraumgestaltung ist maßgeblich für die Insassenpositionierung und die damit verbundene Funktionsweise der Rückhaltesysteme verantwortlich. In den Schnitten sind dabei unter anderem Bauräume für Airbagsysteme zu erkennen. Dazu gehört ein in der I-Tafel verbauter Airbag für den Frontalaufprall sowie Knieairbags im unterem Bereich. Zusätzlich ist im Lenkrad ein Airbag für den Fahrer im Fahrmodus verbaut. Für die Sicherheit ist auch die Struktur des Fahrzeuges und die damit verbundene charakteristische Abbremsung wichtig. Bei der Struktur ist darauf hinzuweisen, dass das Konzept noch in der Entwicklungsphase ist und der bisherige Fokus auf dem Showcar für 2021 liegt. Daher sind zum Zeitpunkt der Arbeit die Karosseriestruktur im CAD, wie auch in den Schnitten, nur sporadisch vorhanden. Diese zeigen mehr den zur Verfügung stehenden Bauraum für die Struktur (vgl. Abbildung 2-25).

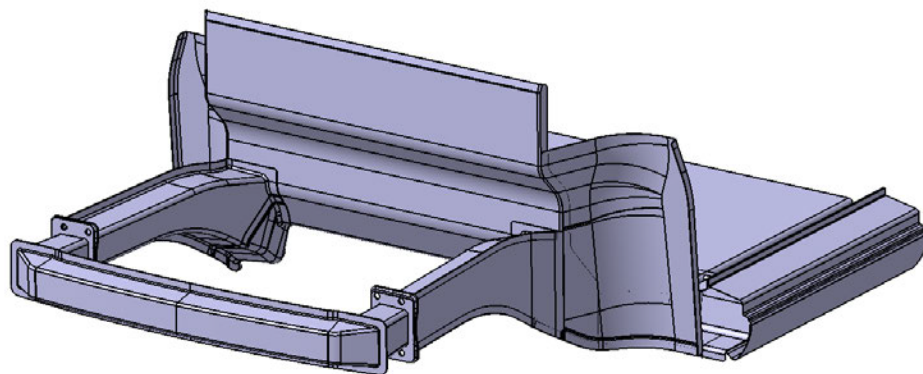


Abbildung 2-25: Karosseriestruktur des HCC21 im CAD [HCC2021]

In dem vereinfachten Schnitt der Frontstruktur werden die Bauräume für die Frontstruktur gezeigt. Der Längsträger ist dabei 682 mm lang, die Crashbox 150 mm und der Querträger 90 mm (vgl. Abbildung 2-26).

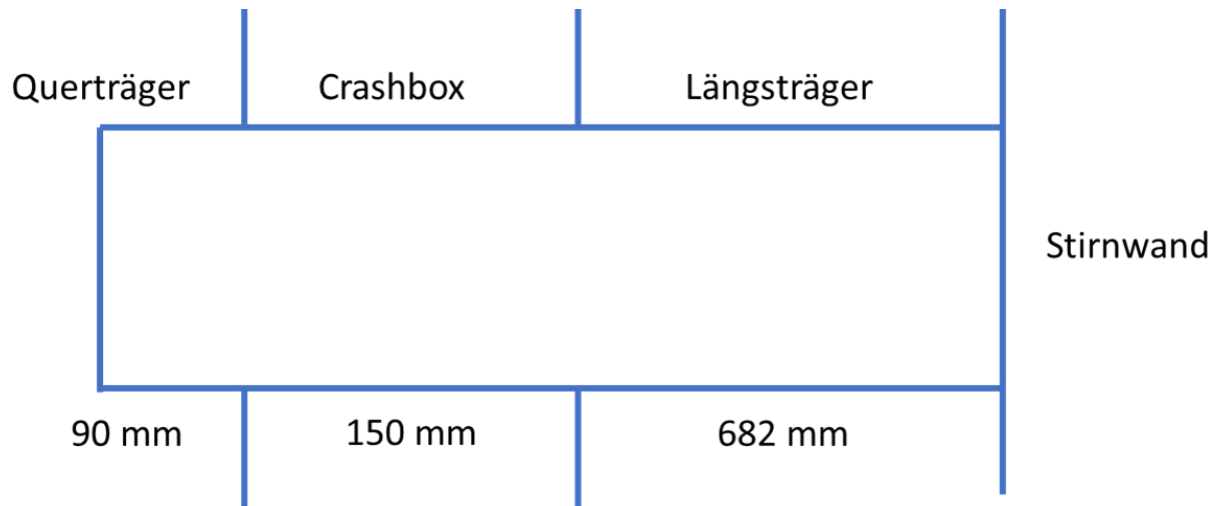


Abbildung 2-26: Schnitt der Front mit Maßen der Struktur [HCC2021]

3. Betrachtung der Karosseriestruktur des HCC21

3.1 Rechnerische Grundauslegung der Karosseriestruktur am Lastfall Frontcrashes

Bei der Auslegung der Karosseriestrukturen werden verschiedene Lastfälle getestet. Die Randbedingungen stammen aus den länderspezifischen Gesetzen für Kraftfahrzeuge. Im Konzeptbuch des HCC21 ist eine Vermarktung im europäischen und chinesischen Markt angedacht. [HCC2021] Hierbei unterscheiden sich die gesetzlichen Crashlastfälle für die beiden Absatzmärkte geringfügig (vgl. Abbildung 3-1). Für die erste Auslegung im Projekt des HCC21 wird der Lastfall „Full Width Frontal“ genauer betrachtet und die notwendigen Kerngrößen der Frontstruktur bestimmt. Dafür wird das Fahrzeug, wie vorgeschrieben, frontal mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h gegen eine starre Wand gefahren. [ECE137]



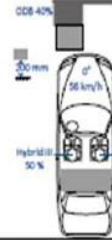
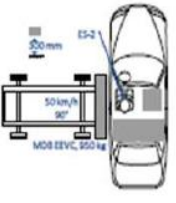


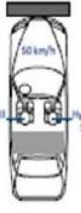

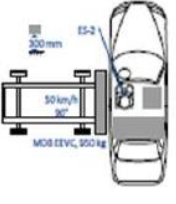
	Full Width Frontal	Offset Frontal	Barriere Seite	Pfahl Seite	Heckaufprall
Europa 	UN R137 ¹ 	UN R94 	UN R95 	UN R135 ¹ 	UN R34
China 	GB 11551-2014 	GB/T 20913-2007 	GB 20071-2006 		GB 20072-2006

Abbildung 3-1: Teilauszug der Gesetzliche Lastfälle für Europa und China [CAR2020]

Wie im Kapitel 2.1 bereits beschrieben und im Eiband Diagramm in Abbildung 2-2 dargestellt wird eine Fahrzeugabbremmung von ca. 40 g festgelegt, um Verletzungen des Insassen zu vermeiden. Auf Grundlage dieser Randbedingung sollen im Folgenden die Kerngrößen der vorderen Struktur des Fahrzeuges berechnet werden. Über die Crashedauer t_0 bis t_1 wird die vordere Struktur mit einer konstanten Verzögerung von 40g abgebremst (vgl. Abbildung 3-2).

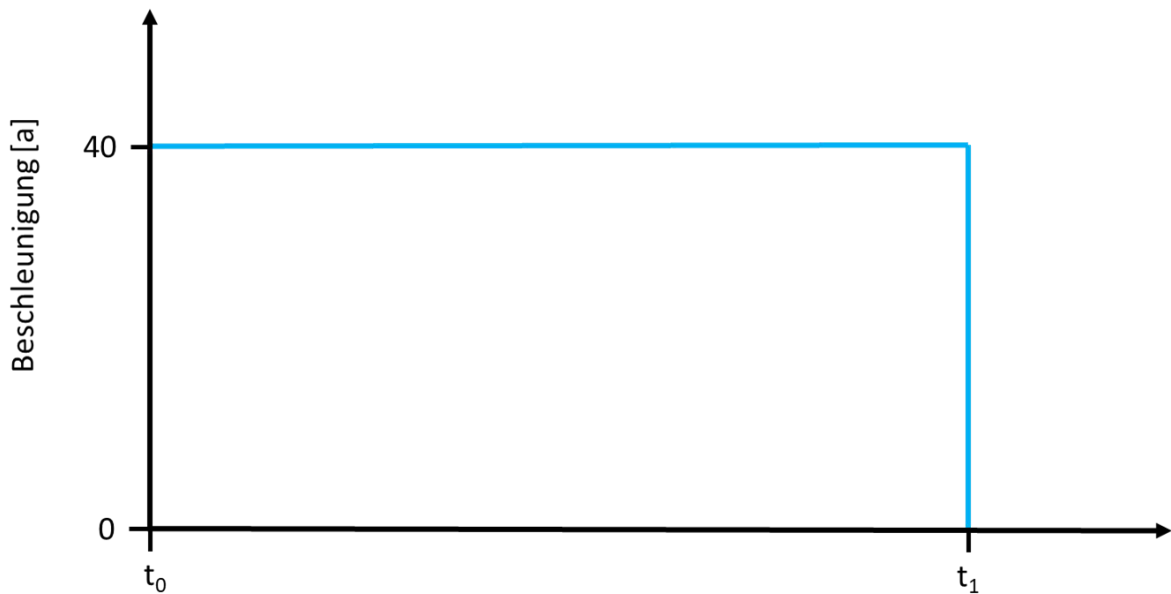


Abbildung 3-2: Annahme der Verzögerung während des frontalen Crashes

Die Geschwindigkeit wird ab Zeitpunkt t_0 , dem Aufprall gegen die starre Wand, bis zum Zeitpunkt t_1 auf 0 km/h abgebremst (vgl. Abbildung 3-3).

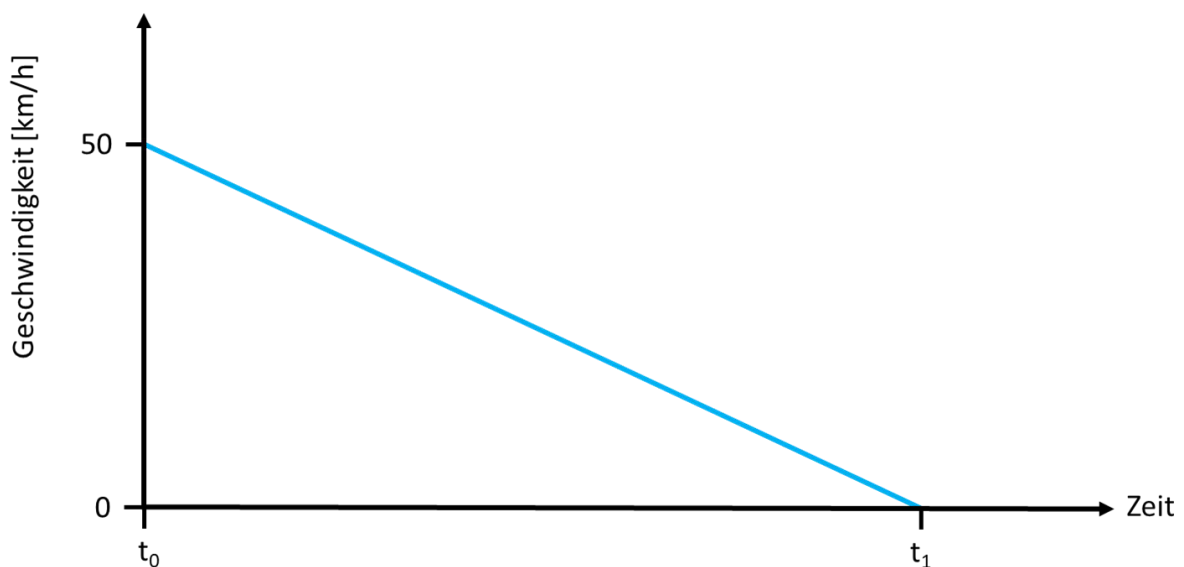


Abbildung 3-3: Annahme des Geschwindigkeitsverlaufes während des frontalen Crashes

Mit der Formel

$$F = m * a \quad (3-1)$$

kann die Steifigkeit der vorderen Struktur bestimmt werden. Bei einem geplanten Fahrzeuggewicht von 2100 kg für das HCC21 ergibt sich dabei eine Steifigkeit von 824 kN. Über die Formel

$$a = \frac{v_e^2 - v_0^2}{2 * s} \quad (3-2)$$

lässt sich durch umformen zu s

$$s = \frac{v_e^2 - v_0^2}{2 * a} \quad (3-3)$$

der Crashweg errechnen. Setzt man die Zahlenwerte aus den Randbedingungen der Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 ein

$$s = \frac{0 \frac{m^2}{s^2} - 13,88 \frac{m^2}{s^2}}{2 * 40 g}$$

$$s = \frac{(0 \frac{m}{s})^2 - (13,88 \frac{m}{s})^2}{2 * 392,4 \frac{m}{s^2}}$$

$$s = -0,245 m$$

ergibt sich damit ein Crashweg von 245 mm für den HCC21.

Die Crashzeit ergibt sich aus der Formel

$$t_1 = \frac{s}{(v_e + v_0)/2} \quad (3-4)$$

$$t_1 = \frac{0,245 m}{(0 \frac{m}{s} + 13,88 \frac{m}{s})/2}$$

$$t_1 = 0,035 s$$

Für den Lastfall des HCC21 ergibt sich eine Crashdauer von 35 ms.

Durch die vereinfachte Betrachtung der vorderen Struktur resultiert ein konstantes Kraftniveau. Jedoch wird in Fahrzeugen der Vorderbau nicht auf ein einziges Kraftniveau ausgelegt. Vielmehr versucht man die Struktur so aufzubauen, dass mehrere Kraftniveaus

über den Deformationsweg entstehen. Der erste Teil der Struktur wird für den Fußgängerschutz und Bagatellunfälle mit niedrigen Geschwindigkeiten verwendet. Dieser besteht aus Schaum, Querträger und Crashbox. Die Längsträger bilden zwei weitere Kraftniveaus ab. Das erste Niveau dient der Kompatibilität mit anderen Verkehrsteilnehmern. Das zweite Niveau dem Selbstschutz der Fahrzeuginsassen. Die auf den Längsträger folgende Fahrgastzelle wird dabei so steif ausgelegt, dass der Überlebensraum gesichert wird. Damit soll sichergestellt werden, dass der Insasse nicht durch Intrusionen in den Innenraum verletzt wird (vgl. Abbildung 3-4). [Kra2013]

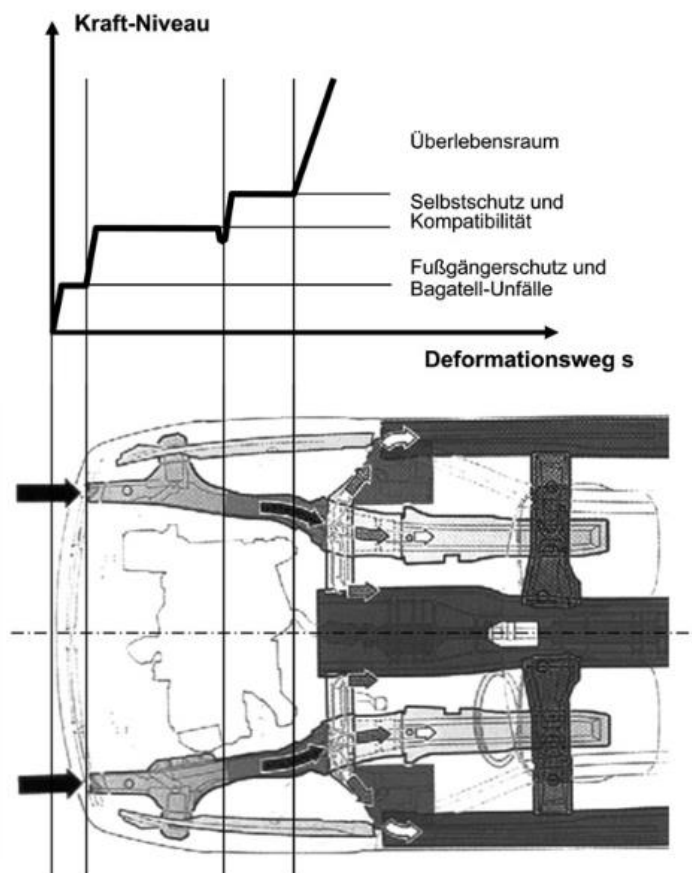


Abbildung 3-4: Kraft-Niveau in Abhängigkeit der vorderen Fahrzeugstruktur [Kra2013]

Um die Randbedingung des Verhaltens der vorderen Struktur besser abzubilden, wird die vorher berechnete Annahme um eine weitere Bedingung für den Kraftverlauf erweitert. Zusätzlich zu den 40 g wird eine Verzögerung von 10 g für das Falverhalten der Crashboxen eingefügt (vgl. Abbildung 3-5).

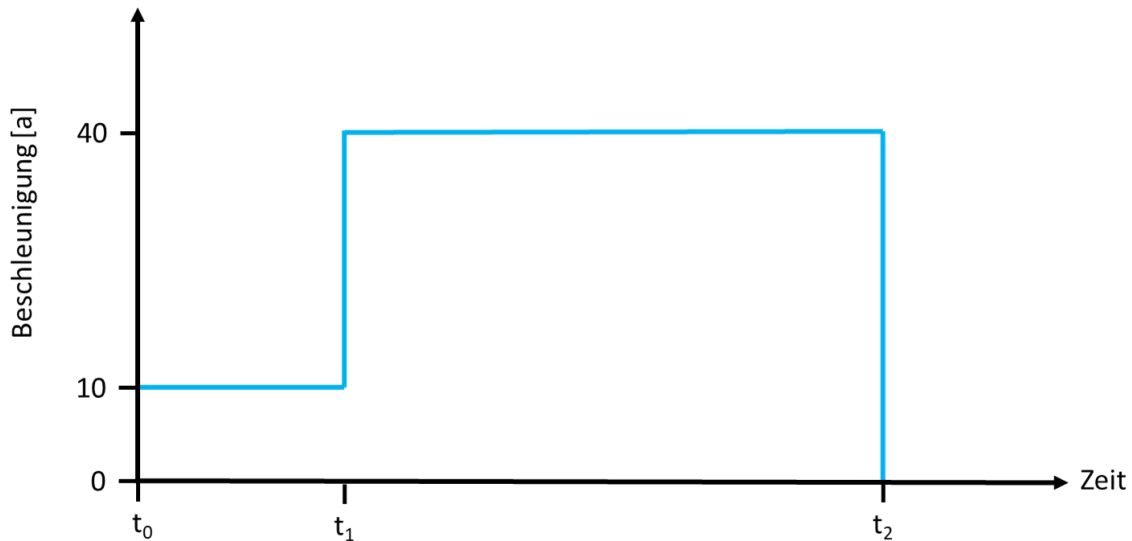


Abbildung 3-5: Annahme des angepassten Kraftverlauf für den vorderen Crash

Im Geschwindigkeitsverlauf entsteht dadurch zum Zeitpunkt t_1 ein Knick im Verlauf, ab dem die Kurve steiler abfällt (vgl. Abbildung 3-6).

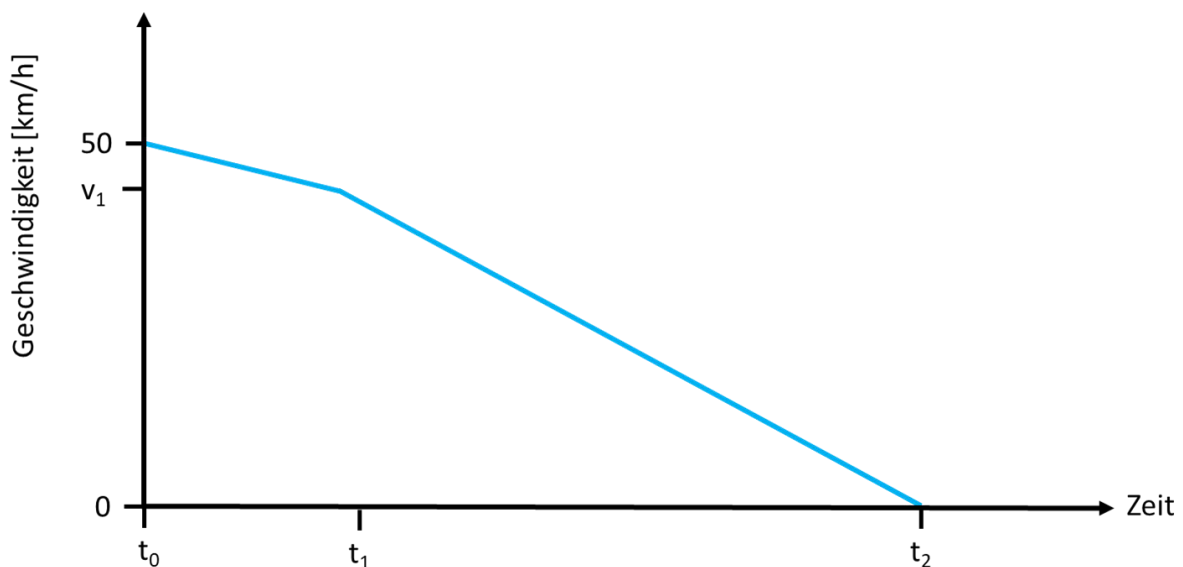


Abbildung 3-6: Annahme des angepassten Geschwindigkeitsverlauf für den vorderen Crash

Die Werte für die Steifigkeit der Struktur, der benötigte Crashweg und die Crashdauer werden auf Grund der zusätzlichen Parameter neu berechnet. Durch die fehlende Größe der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_1 muss zuerst die Eigenschaften der Crashbox bestimmt werden und im Anschluss ein Energiegleichgewicht erstellt werden. Die Steifigkeit der Längsträger ändert sich zur vorherigen Variante nicht und beträgt weiterhin 824 kN. Mit der Formel (3-1) ergibt sich eine Steifigkeit der Crashbox von 206 kN.

Die Crashbox wird meist bis ca. 15 km/h ausgelegt. Daraus ergibt sich mit

$$s_{C_Auslegung} = \frac{(0 \frac{m}{s})^2 - (4,166 \frac{m}{s})^2}{2 * 10 g}$$

$$s_{C_Auslegung} = \frac{(0 \frac{m}{s})^2 - (4,166 \frac{m}{s})^2}{2 * 98,1 \frac{m}{s^2}}$$

$$s_{C_Auslegung} = -0,088 m$$

eine benötigte Crashboxlänge von 88 mm. Wie im Kapitel 2.4 nachzulesen, ist im Package des HCC21 eine Crashboxlänge von 150 mm vorgesehen. Wobei ca. 78 % zur Energieabsorption genutzt werden und die restlichen Prozente durch Blockbildung des Materials zur Energieaufnahme nicht genutzt werden können. Damit bleibt ein Crashweg s_1 von 117 mm für den HCC21 über. Der Anteil der Energie, die von der Crashbox aufgenommen wird, kann mit der Formel

$$E_{Crashbox} = F * s = m * a * s \quad (3-5)$$

berechnet werden. Über ein vereinfachtes Betrachten der Energiezustände kann die Geschwindigkeit des Fahrzeuges zum Zeitpunkt t_1 bestimmt werden. Zu den Zeitpunkten wird die kinetische Energie über

$$E = \frac{m}{2} * v^2 \quad (3-6)$$

bestimmt. Damit ergibt sich folgendes Energiegleichgewicht.

$$E_{t_0} - E_{Crashbox} = E_{t_1}$$

$$\frac{m}{2} * v_0^2 - m * a * s = \frac{m}{2} * v_1^2$$

$$\sqrt{v_0^2 - 2 * a * s} = v_1$$

$$\sqrt{(13,888 \frac{m}{s})^2 - 2 * 10 g * 0,117m} = v_1$$

$$\sqrt{(13,888 \frac{m}{s})^2 - 2 * 98,1 \frac{m}{s^2} * 0,117m} = v_1$$

$$v_1 = 12,783 \frac{m}{s}$$

$$v_1 = 46,02 \frac{km}{h}$$

Für v_1 ergibt sich eine Restgeschwindigkeit von 46,02 km/h. Der Crashweg ab dem Zeitpunkt t_1 wird über

$$s_2 = \frac{v_e^2 - v_1^2}{2 * a_2}$$

berechnet. Durch Einsetzen der Werte

$$s_2 = \frac{(0 \frac{m}{s})^2 - (12,78 \frac{m}{s})^2}{2 * 40 g}$$

$$s_2 = \frac{(0 \frac{m}{s})^2 - (12,78 \frac{m}{s})^2}{2 * 392,4 \frac{m}{s^2}}$$

$$s_2 = -0,2081m$$

ergibt sich ein Crashweg ab dem Zeitpunkt t_1 bis t_2 von 208,1 mm. Das Resultat ist ein Gesamtcrashweg von 325,1 mm.

$$t_1 = \frac{s_1}{(v_1 + v_0)/2}$$

$$t_1 = \frac{0,117m}{(12,78 \frac{m}{s} + 13,88 \frac{m}{s})/2}$$

$$t_1 = 0,0087 s$$

Die Crashdauer für den ersten Abschnitt von t_0 bis t_1 beträgt 8,7 ms.

$$t_2 = \frac{s_2}{(v_1 + v_2)/2}$$

$$t_2 = \frac{0,2081m}{(12,78 \frac{m}{s} + 0 \frac{m}{s})/2}$$

$$t_2 = 0,0325 \text{ s}$$

Die Crashdauer für den zweiten Abschnitt von t_1 bis t_2 beträgt 32,5 ms. Damit ergibt sich eine Gesamtcrashdauer von 41,2 ms.

Parallel zur Masterarbeit werden an der HAW im Masterkurs „Simulation in der Karosserieentwicklung (SIK)“ verschiedene Crashlastfälle simuliert. Einer der untersuchten Lastfälle ist der „Full Width Frontal“. Im Folgendem sollen die berechneten Ergebnisse mit der Simulation verglichen werden.

3.2 Vergleich der Berechnung mit Simulationen des HCC21 [HCC2021]

Bei der Simulation in der Fahrzeugentwicklung verwendet man für verschiedene Lastfälle unterschiedliche aufgebaute und detaillierte Modelle. Die Subsysteme sind auf die verschiedenen Lastfälle angepasst und ermöglichen nur dessen Betrachtung. Das Ziel der verschiedenen Subsysteme ist die Rechenzeit zu optimieren. Zu den Modellarten der Crash-Simulation gehören Modelle zur Unfallrekonstruktion, zur Strukturberechnung, der Insassensimulation, zur Fußgängersimulation sowie der Biomechanik-Forschung (vgl. Abbildung 3-7). Die einzelnen Bereiche können wiederum in weitere Subsysteme unterteilt werden. [Kra2013]

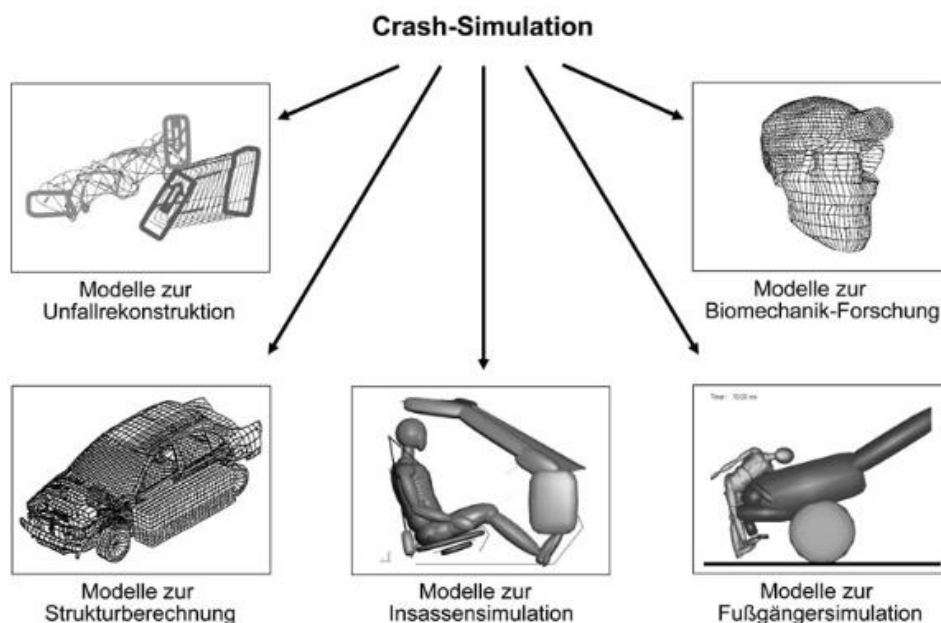


Abbildung 3-7: Modellarten und Einsatzgebiete in der Crash-Simulation [Kra2013]

Im Masterkurs SIK werden verschiedene Lastfälle untersucht. Die für die Arbeit wichtigste Untersuchung ist der Frontalcrash. Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt. Beim aktuellen Datenstand des HCC21 kann für die Strukturberechnung auf keine Gesamtkarosserie zurückgegriffen werden. Daher hat die Gruppe ein eigens aufgebautes Subsystem für den Frontalcrash genutzt. Hierfür wurde die vorhandene Frontstruktur aus dem CAD als vereinfachte Mittelflächen im FEM Programm erstellt (vgl. Abbildung 3-8). Weitere Anbindungen für die Darstellung von Karosseriestrukturen, wie der A-Säule, wurden durch Connectoren oder Bedingungen modelliert. Außerdem wurde ein Ersatzmotorblock mit den Längsträgern verbunden, um diese besser miteinander zu koppeln und ein Ausknicken zu blockieren (vgl. Abbildung 3-9).

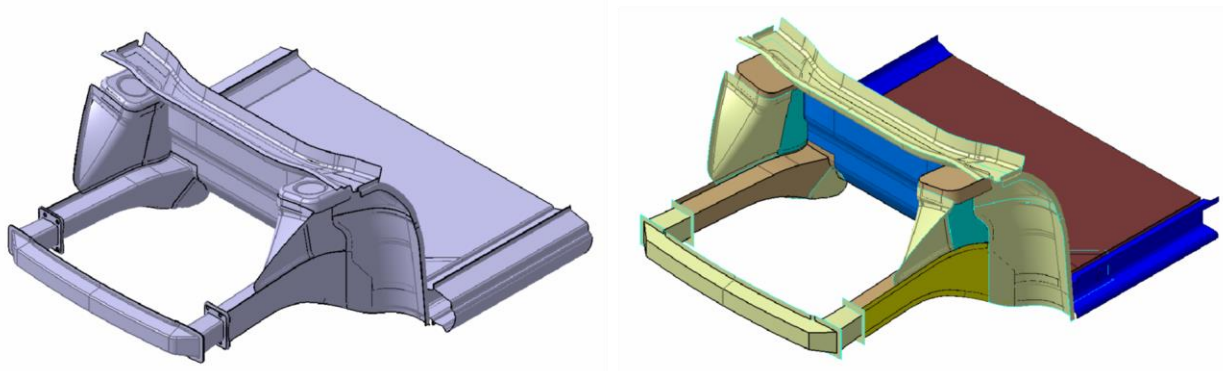


Abbildung 3-8: Frontstruktur im CAD (links) in der FEM (rechts) [HCC2021]

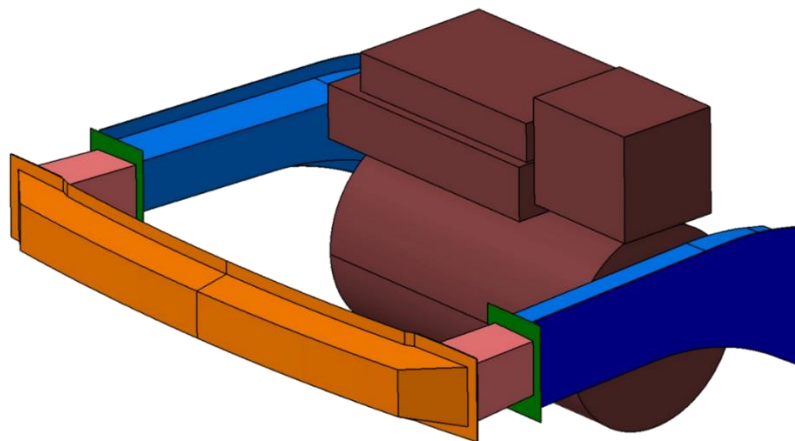


Abbildung 3-9: Längsträger mit Motorblock in Abaqus [HCC2021]

Während der Simulation wurden mehrere Schleifen durchgeführt und Materialstärken oder Anbindungen angepasst. Im Folgenden beziehen sich die gezeigten Ergebnisse auf die Version 15 der Frontstruktur der Gruppe. Das Simulationsergebnis wird mit den berechneten Annahmen aus dem Kapitel 3.1 verglichen. In der Abbildung 3-10 wird die Kraft über den Weg abgebildet. Die berechneten Annahmen sind dabei idealisiert betrachtet worden und im Diagramm als grüne Kurve dargestellt. Der Vergleich mit den Simulationsergebnissen, siehe blaue Kurve, zeigt einerseits, dass die Kraft in der Realität nicht auf einem konstanten Wert gehalten werden kann. Vielmehr schwingt die Kraft auf einem Niveau. Auch ein schlagartiger Anstieg auf ein neues Kraftniveau ist in der Realität nicht möglich (vgl. Abbildung 3-10). Vielmehr wird mehr Weg benötigt, um die Kraft ansteigen zu lassen. Außerdem entstehen durch die Struktur Kraftpeaks, die ein Beul- oder Faltverhalten einleiten. Jedoch zeigt der Vergleich der Kraftwerte der Crashbox ähnliche Verhalten der Simulation und der Annahme. Allerdings liegt die mittlere Kraft von ca. 725 kN der Längsträger unter der Annahme von 824 kN. Der Crashweg ist mit einer Gesamtlänge von 420 mm um 100 mm länger, als in der Berechnung angenommenen.



Abbildung 3-10: Vergleich der Kraft-Weg Verlaufs aus der Simulation und der Randbedingungen

Der Verlauf aus Abbildung 3-11 ähnelt dem Kraft-Weg-Diagramm, was durch den Zusammenhang der Beschleunigung und der Kraft aus der Formel (3-1) entsteht. Die simulierte Beschleunigungskurve (blau) folgt daher annäherungsweise dem Verlauf der Kraftkurve (blau, vgl. Abbildung 3-10). Die mittlere Beschleunigung der Längsträger liegt somit bei ca. 35 g und damit ca. 7 g unter der getroffenen Annahme (grün).

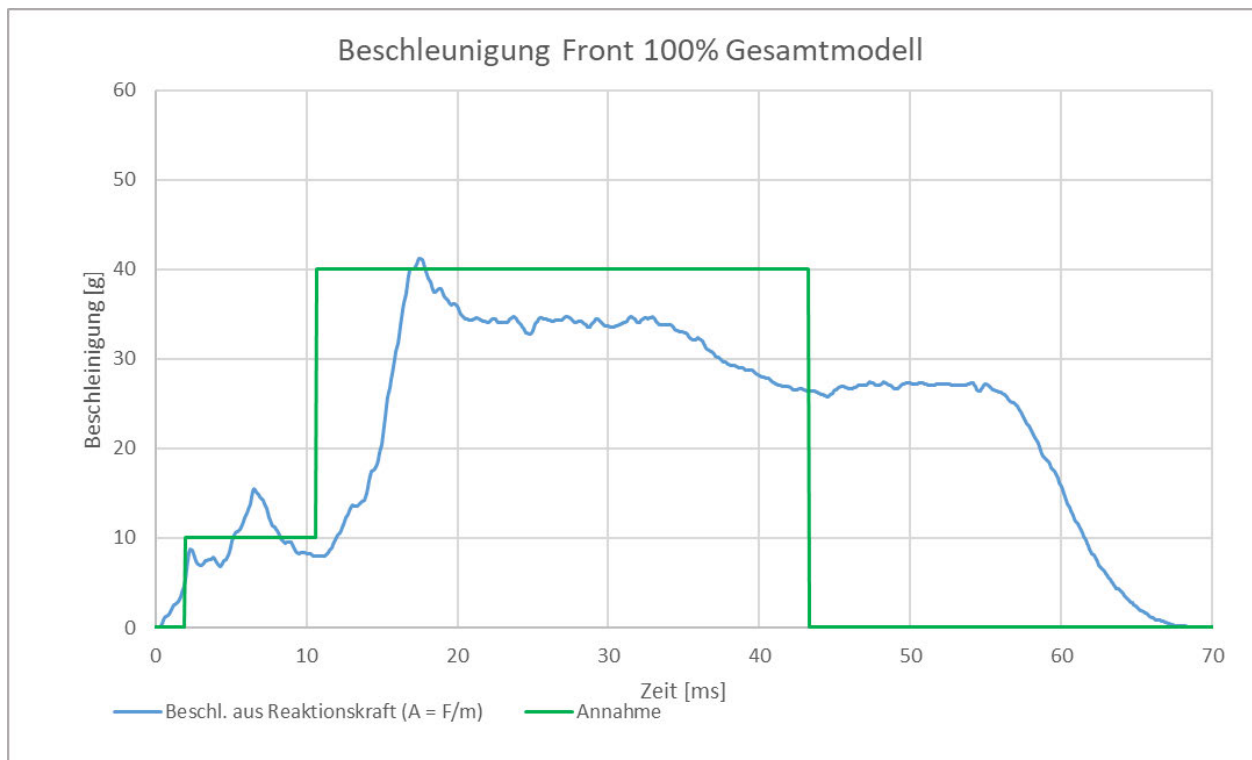


Abbildung 3-11: Vergleich der Beschleunigungsverläufe aus der Simulation und der Randbedingungen

Daher ergeben sich auch bei dem Geschwindigkeitsverlauf Unterschiede. Durch das nahezu gleiche Kraftniveau der Crashbox verlaufen die Kurven in diesem Bereich bis 13 ms jedoch ähnlich. Erst im Bereich der Längsträger weichen die Kurvenverläufe voneinander ab. Hierdurch verlängert sich die Dauer des Crashes um ca. 10 ms auf eine Gesamtdauer von 50 ms (vgl. Abbildung 3-12). Zusätzlich wurden bei den berechneten Annahmen ein Abprallen sowie elastisches Verhalten nicht mit betrachtet. In der Simulation erkennt man, anhand der Fahrzeuggeschwindigkeit, das Abprallen des Fahrzeuges. Der Verlauf der Geschwindigkeit wechselt, ab dem Zeitpunkt des Abprallens, in eine negative Geschwindigkeit.

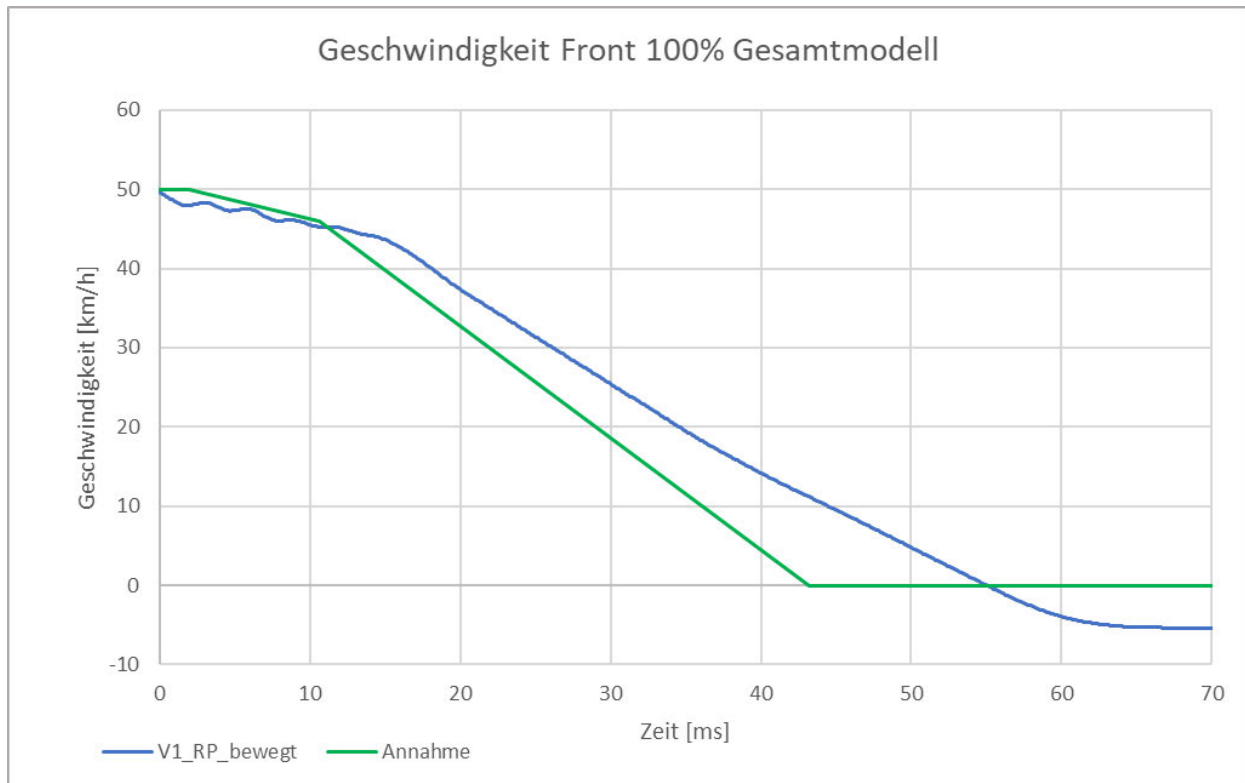


Abbildung 3-12: Vergleich des Geschwindigkeitsverlauf aus der Simulation und der Randbedingungen

Alles in allem zeigt der Vergleich der Simulation mit den Annahmen einen ähnlichen Verlauf. Einzig das Verhalten der Längsträger weicht um ca. 15% von den getroffenen Annahmen ab. Damit sind die Randbedingungen für die Simulation in Kapitel 6 plausibilisiert und die folgenden Simulationsergebnisse aus dem Kapitel 6 werden zum jetzigen Stand des Projektes passen. Für die Simulation werden weiterhin die berechneten Annahmen genutzt, da diese den kritischeren Lastfall abdecken und sich die Simulationsergebnisse im Laufe der Projektreife noch ändern können.

4. Konzepte der Insassensicherheit

Um die Sicherheit des Insassen zu gewährleisten, können verschiedene einzelne Maßnahmen oder ein Zusammenspiel verschiedener Lösungen genutzt werden. Im Folgenden werden einzelne Lösungen vorgestellt, bewertet und eine Vorauswahl von Systemen getroffen.

4.1 Morphologischer Kasten

Mittels eines morphologischen Kastens werden für verschiedenen Anforderungen einzelne Lösungen zusammengestellt (vgl. Tabelle 4-1). Hierfür werden für den Lastfall Frontalcrash Teilfunktionen für das Rückhaltesystem aufgelistet. Den einzelnen Teilfunktionen werden Lösungen zugeordnet. Diese bilden einen Überblick über die Möglichkeiten eines zusammenwirkenden Sicherheitssystems.

Tabelle 4-1: Morphologischer Kasten für Rückhaltesysteme in autonomen Fahrzeugen

Teilfunktion	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5
Anbindung Gurt	Karosriefeste Anbindungspunkte	Gurtsystem im Sitz integriert	3-Punkt-Gurt	Mehrpunkt-gurtsystem	
Airbagposition für die Fahrposition	Airbag im Lenkrad integriert	Airbag in der I-Tafel integriert	Airbag im Dachrahmen integriert	Airbag im Sitz integriert	Knieairbag
Airbagposition für den Arbeitsmodus	Airbag im Lenkrad integriert	Airbag in der I-Tafel integriert	Airbag im Dachrahmen integriert	Airbag im Sitz integriert	Knieairbag
Airbagposition für den Relaxmodus	Airbag im Lenkrad integriert	Airbag in der I-Tafel integriert	Airbag im Dachrahmen integriert	Airbag im Sitz integriert	Knieairbag
Teilfunktion Gurtsystem	Aktiver Gurtstraffer	passiver Gurtstraffer	Gurtblockierung	Gurtkraftbegrenzer	Gurt-Bag
Funktionen am Sitz	Passive Rückenlehne	Aktive Rückenlehne	Energieabsorption durch die Sitzschienen	Submarining Ramp	Aktive Kopfstütze

4.2 Bewertungsmatrix der Konzepte

Die einzelnen Lösungen aus dem morphologischen Kasten werden in der Tabelle 4-2 anhand ihrer Effektivität mit Blick auf die verschiedenen Modi, Fahrmodus (1), Arbeitsmodus (2) und Relaxingmodus (3) für den frontalen Crash bewertet. Dafür sind folgende Bewertungsmöglichkeiten möglich „++“ sehr positiver Effekt, „+“ positiver Effekt, „o“ kaum

positiver Effekt, „-“ sehr wenig positiver Effekt, „/“ keinen Effekt. Die Bewertung der einzelnen Lösungen, ist dabei nicht an ein spezielles Fahrzeug oder räumliche Gegebenheiten gekoppelt.

Für ein besseres Verständnis wird die aus der Bewertungsmatrix resultierende Entscheidung aus der Tabelle 4-2 umfassend erläutert.

Die Lösung der karosseriefesten Anbindungspunkte ist nur für den Fahrmodus geeignet. Die Anbindungspunkte an der B-Säule werden dabei durch gesetzliche Richtlinien so gewählt, dass im Fahrmodus das Sitzverstellfeld bestmöglich abgedeckt ist. Durch die neuen Sitzpositionen befindet sich der Oberkörper der Insassen hinter der B-Säule. Hierdurch liegt der Gurt nicht mehr am Oberkörper des Insassen an. Durch den Einsatz eines Gurtintegralsitzes verschiebt sich die Anbindungsposition des Gurtes mit der Verschiebung des Insassen. [Laa2019] Bei den bisherigen Konzeptsitzen ist jedoch Verbesserungspotential im Bereich der Anpassung an unterschiedliche Körperabmessungen zu erkennen. Ein 3-Punkt-Gurt wird in bisher allen Fahrzeugen verwendet. Dieser ist ein Kompromiss zwischen Sicherheit und Bewegungsfreiheit im Auto und erfüllt in Fahr- und Arbeitsposition die Funktion. Beim Frontalaufprall kann es jedoch zum Submarining kommen, also dem Durchrutschen des Insassen unter dem Beckengurt. [Seat2020] In Liegeposition wird dieser Effekt noch verstärkt. Erst mit einem Mehrpunktgurtsystem kann diese Problematik minimiert werden. [Wik2020] Zusätzlich kann die Bewegung des Insassen mit einem Mehrpunktgurtsystem während des Crashes besser geführt werden, insbesondere, wenn dieser durch den Airbag erst später aufgefangen wird. Des Weiteren kann durch eine Anstellung der Sitzfläche dem Submarining entgegengewirkt werden. In der Liegeposition, die in vielen Fällen an die Zero-Gravity-Position angelehnt ist, sind die Beine bereits angewinkelt (vgl. Abbildung 2-21) und eine weitere Anstellung könnte zu anderen Problemen, wie der Überstreckungen der Bänder, führen. Die zusätzlichen Lösungen im Gurtsystem, wie dem aktiven und passiven Gurtstraffer, der Gurtblockade und dem Gurtkraftbegrenzer, erfüllen dabei in jeder Position die gewünschte Funktion. Auch eine aktive Kopfstütze verbessert die Sicherheit in jeder Lage. Die Bewertung der Airbagsysteme ist dabei schwieriger. Bei dieser Bewertung wird angenommen, dass die Position der Airbags unabhängig von der Funktionsweise verändert werden können. Daher bezieht sich die erste Bewertung auf die Annahme, dass ein Standard Airbag die Fahrposition optimal absichert. Abhängig von der Abweichung des Arbeitsmodus zu der Fahr-

position, kann der Insasse mit dem gleichen Airbag aufgefangen werden. Die Liegeposition hingegen kann nicht mehr abgedeckt werden. Erst durch den Einsatz eines größenadaptiven Airbags kann auch die Relax-Position abgedeckt werden. [Laa2019] Weitere Maßnahmen zur Absicherung der Liegeposition sind ohne weitere Untersuchungen schwer zu bewerten. Es wird aber angenommen, dass Maßnahmen, die in der Rückenlehne verbaut sind, zur Verbesserung der Sicherheit in den Positionen führt.

Tabelle 4-2: Bewertungsmatrix verschiedener Lösungen für autonome Fahrzeuge

Lösung	Bewertung Fahrmodi		
	1	2	3
Karosseriefeste Befestigungspunkte	+	-	-
Gurtintegralsitz	+	+	+
3-Punkt Gurt	++	+	0
Mehrpunkt Gurt	++	++	+
Gurtairbag	+	+	+
Aktiver Gurtstraffer	++	++	++
Passiver Gurtstraffer	++	++	++
Gurtkraftbegrenzer	++	++	++
Gurtstraffer	++	++	++
Aktive Kopfstütze	+	+	+
Submarining Airbag/Rampe	+	+	-
Airbag	++	+	-
Größen adaptiver Airbag	++	+	+
Passive Rückenlehne	/	/	+
Aktive Rückenlehne after crash	/	/	+
Aktive Rückenlehne precrash	/	/	+

Bei der Bewertung der aufgeführten Lösungen fällt auf, dass einige nicht ausreichend bewertet werden können. Sollen die Rückhaltesysteme zusätzlich in einem bereits vorhandenen Fahrzeug untergebracht werden, ist eine Bewertung nur durch eine genauere Betrachtung der Randbedingungen möglich. Außerdem können bei neuen Maßnahmen, wie denen die im Sitz verbaut werden, auf keine Vorerfahrungen zurückgegriffen werden. Daher werden im Nachfolgenden Kapitel die Herausforderungen der Lösungen am Beispiel des HCC21 zusammengestellt.

4.3 Herausforderung der Konzepte am HCC21

Einige Teillösungen aus der Tabelle 4-2, deren Beurteilung weiterer Untersuchungen Bedarf, werden auf mögliche Herausforderungen mit Bezug zum Konzeptfahrzeug HCC21 in der Tabelle 4-3 zusammengestellt. Aus den Randbedingungen des HCC21 entstehen räumliche Gestaltungen, die den Einsatz der Airbags erschweren. Ein Airbag im Lenkrad ist dabei nur nutzbar, wenn das Lenkrad nicht eingefahren ist. Im eingefahrenen Zustand wird der Lenkkranz vor dem Airbagtopf positioniert, womit ein Auslösen blockiert ist. Bei der Positionierung des Airbags in der I-Tafel ist nur wenig Platz zwischen dem Display und der Windschutzscheibe. Im Schnitt wird ein Abstand von 100 mm gemessen. Beim Dachairbag ist durch das geplante Panoramadach das Package im Dach ein Problem. Durch die neuen Sitzpositionen im HCC21 wird der Abstand zwischen den Beinen und der unteren I-Tafel verringert. Damit können beim Knie-Airbag, als auch bei der Absorption durch die Sitzschiene, möglicherweise die Funktionen nicht abgebildet werden. Es kann im Gegenteil eher zu Verletzungen der Beine kommen. Bei den Maßnahmen zur Sicherheitsverbesserung, die am Sitz durchgeführt werden, können weitere Probleme entstehen. Dabei ist neben einem möglichen Packageproblem auch die Ungewissheit der Kinematik des Insassen und dem Sitz eine Herausforderung. Aber auch höheren Belastungen durch die Winkelgeschwindigkeit, insbesondere am Kopf, bei aktiver Rückenlehne kann problematisch sein (vgl. Abbildung 4-1).

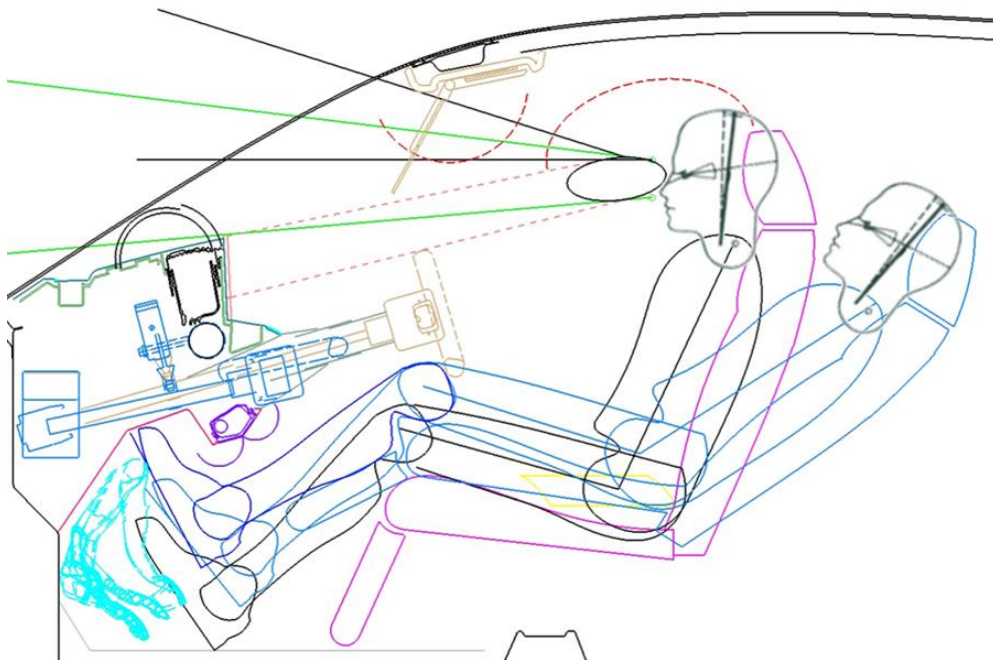


Abbildung 4-1: Fahrerschnitt -350-Y des HCC21 [HCC2021]

Tabelle 4-3: Herausforderungen der Lösungen mit Bezug auf das Konzeptfahrzeug HCC21

Lösung	Herausforderungen
Airbag Lenkrad	Einfahrbares Lenkradkonzept im HCC21
I-Tafel Airbag	Platzierung und Package in der I-Tafel, Display im Weg
Dachairbag	Package-Raum benötigt, Glasdach
Knie Airbag	Raumprobleme, da die Positionen den Abstand zwischen der Beine und I-Tafel verringern
Sitzintegrierte Airbags	Package des Sitzes
Passive Rückenlehne	Ungewissese Insassenkinematik und Kinematik des Sitzes
Aktive Rückenlehne	Geringe Zeit = hohe Belastungen Hohe Winkelgeschwindigkeiten am Kopf
Absorption durch die Sitzschiene	Raumprobleme, da die Positionen den Abstand zwischen der Beine und I-Tafel verringern

4.4 Zusammenfassung der Konzepte für den Insassenschutz

Anhand des Bewertungsschemas können einige Lösungen identifiziert werden, die in jedem möglichen Gesamtsicherheitskonzept für den frontalen Aufprall verbaut sein sollten. Zu diesen Lösungen gehören unter anderem der Gurtstraffer, der Gurtkraftbegrenzer und der Gurtintegralsitz. Für eine genauere Empfehlung der Frontalairbags sowie der Maßnahmen zur Verbesserung in der Liegeposition werden weitere Untersuchungen benötigt. Dafür wird in Kapitel 5 eine räumliche Untersuchung der Airbagsysteme unternommen. In Kapitel 6 wird eine Insassensimulation in der Liegeposition durchgeführt, um damit ein Verständnis der Kinematik und den Einfluss der Maßnahmen zu erhalten.

5. Untersuchung der Airbagsysteme für das HCC21

Ein stimmiges Gesamtsicherheitskonzept für das HCC21 benötigt ein für alle möglichen Sitzpositionen abgestimmtes Frontalairbagsystem. Die Verwendung eines einzelnen gleichbleibenden Airbags deckt jedoch nicht die Vielzahl der möglichen Sitzpositionen im HCC21 ab. Vielmehr muss ein technisch abgerundetes System bereitgestellt werden. Aufgrund der Komplexität der Airbags und der fehlenden Ressourcen werden keine rechnergestützten Simulationen durchgeführt. Viel mehr wird für die Untersuchung die Annahme getroffen, dass die Effektivität der Airbags unabhängig von der Position ist. Im Folgenden wird daher eine räumliche Untersuchung der möglichen Einbaulagen der Airbags sowie eine Funktions- und Fehleranalyse durchgeführt.

5.1 Räumliche Untersuchung der Airbagsysteme für das HCC21

Für eine räumliche Untersuchung der Airbags werden die Schnitte -350-Y auf der Fahrerseite (vgl. Abbildung 4-1) und 350-Y auf der Beifahrerseite des HCC21 genutzt. In die Schnitte werden die jeweilige Position sowie die Ausdehnung des Airbags eingezeichnet.

5.1.1 Räumliche Untersuchung der Airbagsysteme auf der Fahrerseite

Fahrmodus

In der Fahrposition ist es wichtig, den Oberkörper und den Kopf daran zu hindern, am Lenkrad aufzuprallen. Bei der räumlichen Betrachtung der Airbags in der Fahrposition schneidet der Lenkradairbag am besten ab. Einerseits muss dieser den geringsten Raum ausfüllen und passt sich den einzelnen Positionen des Lenkrades an. Andererseits öffnet sich dieser zwischen den Armen des Fahrers, weshalb es zu keiner Verletzung der Arme kommt. Der Airbag aus der I-Tafel bietet die schlechteste Lösung an. Dieser muss auf der einen Seite einen langen Weg aus der I-Tafel, hinterm Display, bis zum Oberkörper zurücklegen und auf der anderen Seite auch hinter dem Lenkrad abfallen, um den Raum zwischen Insassen und Lenkrad zu füllen. Zusätzlich könnte eine ausgeklappte Sonnenblende zum Hindernis für den Airbag werden. Weiterhin ist der Querschnitt durch den Abstand vom Display zur Windschutzscheibe nur 100 mm, was ein Ausfallen des Airbags aus der I-Tafel erschwert. Der Airbag aus dem Dach bietet die zweitbeste Möglichkeit an. Dieser kann von oben den Raum ausfüllen und sich am Lenkrad abstützen. Jedoch ist von einer Verletzung der Arme auszugehen, da diese möglicherweise beim Auffalten des

Airbags nach unten gedrückt werden. Außerdem könnte es bei einem kleinen Insassen dazu kommen, dass der Airbag über dem Kopf öffnet, da kleine Personen für das sichere Führen des Fahrzeuges näher an der I-Tafel sitzen müssen (vgl. Abbildung 5-1).

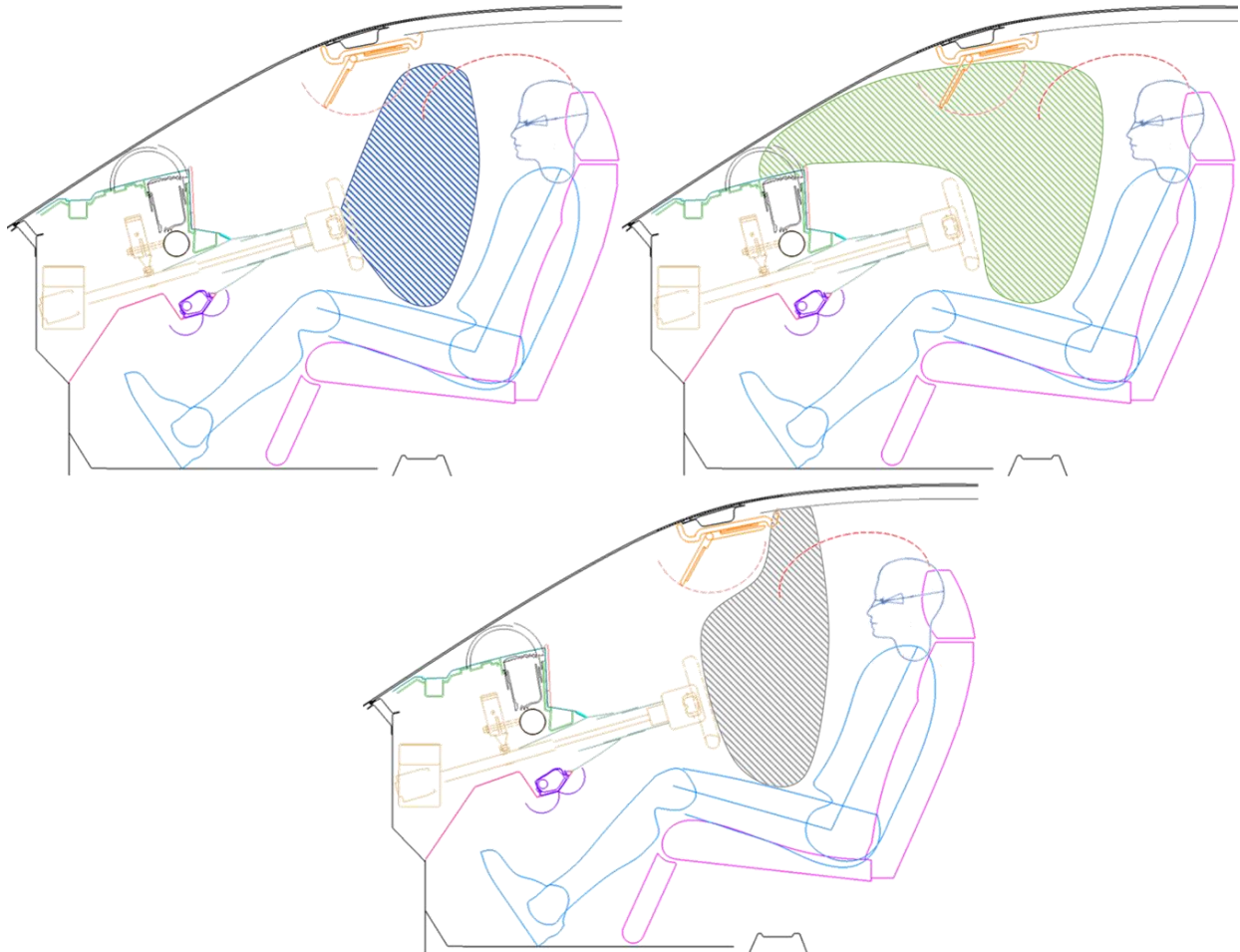


Abbildung 5-1: Räumliche Abdeckung mit Airbags in Fahrereposition Lenkrad(links), I-Tafel(rechts), Dachairbag(unten),

Arbeitsmodus

Der Arbeitsmodus kann in drei Hauptzuständen definiert werden. Nummer eins ist der Zustand, in dem das Lenkrad noch ausgeklappt ist, das Fahrzeug ist jetzt aber autonom unterwegs. Hier bestehen die gleichen Vor- und Nachteile wie beim Fahrermodus. Das Lenkrad in den beiden anderen Zuständen ist eingefahren und der Lenkradkranz befindet sich über einem möglichen Airbag im Lenkrad. Unterscheiden tun sich die beiden Zustände darin, dass bei der einen Variante der Fahrer noch einen kleinen Tisch vor sich hat, an dem er den vorderen Bildschirm bedienen kann. Durch die Blockade des Fahrerairbags werden im Folgenden nur noch die Airbags in der I-Tafel und im Dach betrachtet. Für diese beiden Zustände stützen sich die Airbags an der Instrumententafel ab. Der

I-Tafel-Airbag kann sich im Arbeitsmodus neben der Sonnenblende auch am Tisch verhängen. Der Tisch (gelb) kann auch gegen den Torso gedrückt werden, wodurch es zu Verletzungen der Organe kommen kann. Beim Airbag aus dem Dachrahmen hat der Airbag genügend Raum zur Entfaltung. Außerdem drückt der Airbag den Tisch (gelb) auf die Oberschenkel und die Sonnenblende weg vom Kopf. Eine Verletzung der Beine ist dabei weniger schlimm, als eine Verletzung der Organe. Nachteilig beim Dachairbag ist weiterhin, dass dieser in der Nähe des Kopfes auslöst. (vgl. Abbildung 5-2). Aus Sicht der Produkthaftung sollte jegliche Benutzung im Fahrzeug abgesichert sein. Das beinhaltet auch die Benutzung des Bedienfeldes als Tisch und Ablagefläche. Mithilfe des Dachairbags und einer Rechtzeitigen Ausfaltung können lose Gegenstände daran gehindert werden den Torso des Insassen zu verletzen. Wohingegen der I-Tafel-Airbag, durch die Ausfaltung in X-Richtung, die Gegenstände immer auf den Insassentorso zu bewegt.

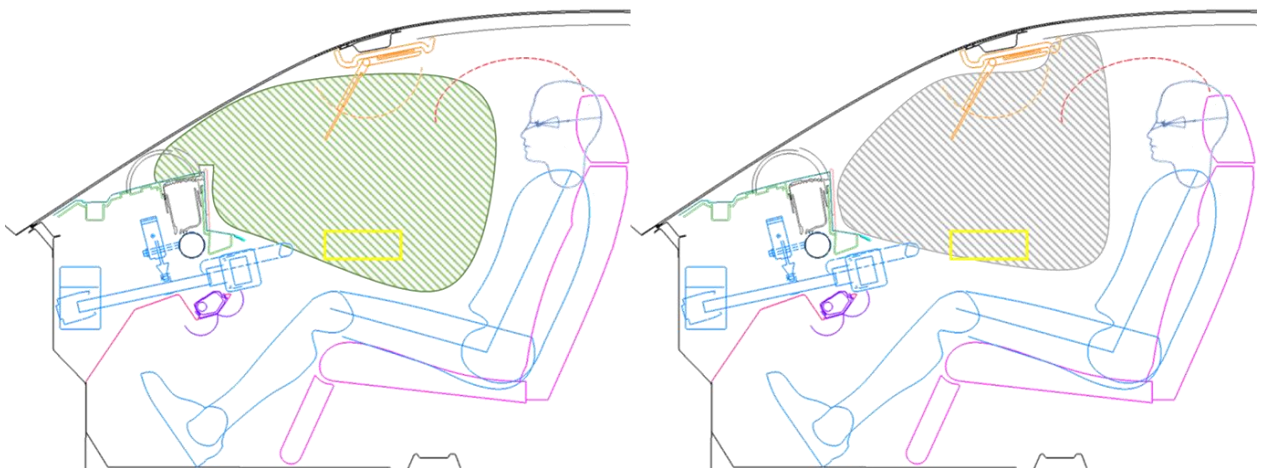


Abbildung 5-2: Räumliche Abdeckung mit Airbags im Arbeitsmodus, I-Tafel (links), Dachairbag (rechts)

Relaxmodus

Beim Relaxmodus ähneln die Vor- und Nachteile dem Arbeitsmodus. Zusätzlich kann in der LG-Position die Sonnenblende ein noch größeres Hindernis für den Airbag aus der I-Tafel werden. Das aus der Sonnenblende ausgeklappte Display verringert noch einmal den Abstand zur Entfaltung. Damit wird das Display der Sonnenblende in Richtung des Insassen geklappt und kann zu einer potenziellen Gefahrenquelle werden. Weiterhin fällt der Nachteil weg, dass der Dachairbag über dem Kopf öffnet, da sich der Insasse in der Liegeposition vom Dach wegbewegt (vgl. Abbildung 5-3).

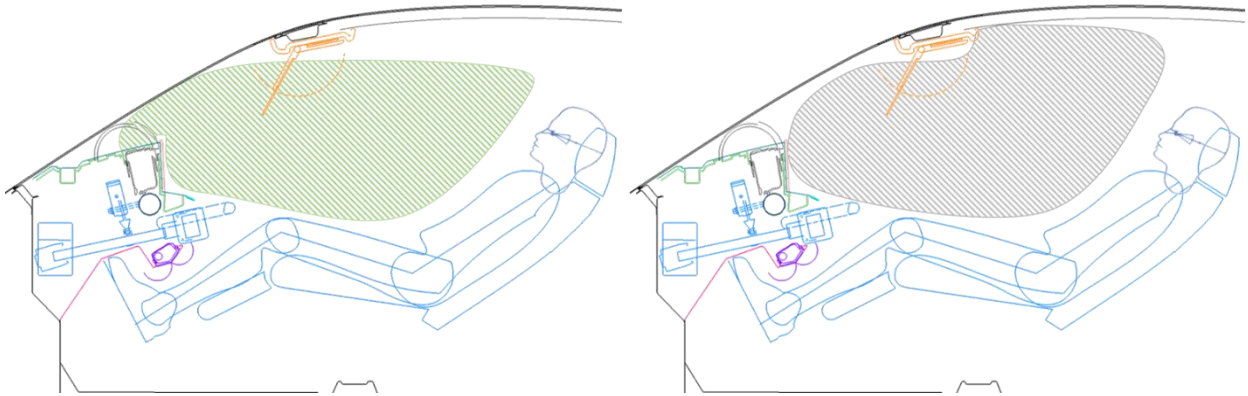


Abbildung 5-3: Räumliche Abdeckung der Relaxposition mit Airbags, I-Tafel (links), Dachairbag (rechts)

Zusätzlich könnte der Relaxmodus aus einer Kombination eines Airbagsystems des Arbeitsmodus mit einem aus dem Sitz entfaltendem Airbag abgesichert werden (vgl. Abbildung 5-4). Der integrierte Airbag im Sitz würde dabei aus der Fahrzeuginnenseite ausgeklappt werden und sich in Form eines „L“ ausfalten (vgl. Abbildung 5-4). Damit würde die Front des Insassen vollständig abgedeckt werden. Im Frontalaufprall stützt sich dieser am Arbeitsmodus Airbag ab. Für die Umsetzung ist dabei wichtig, dass die Systeme aufeinander abgestimmt sind. Das bedeutet, die Airbags behindern sich nicht in der Ausfaltung und stützen sich so aufeinander ab, dass keiner der Airbags bei Belastung ausknickt.

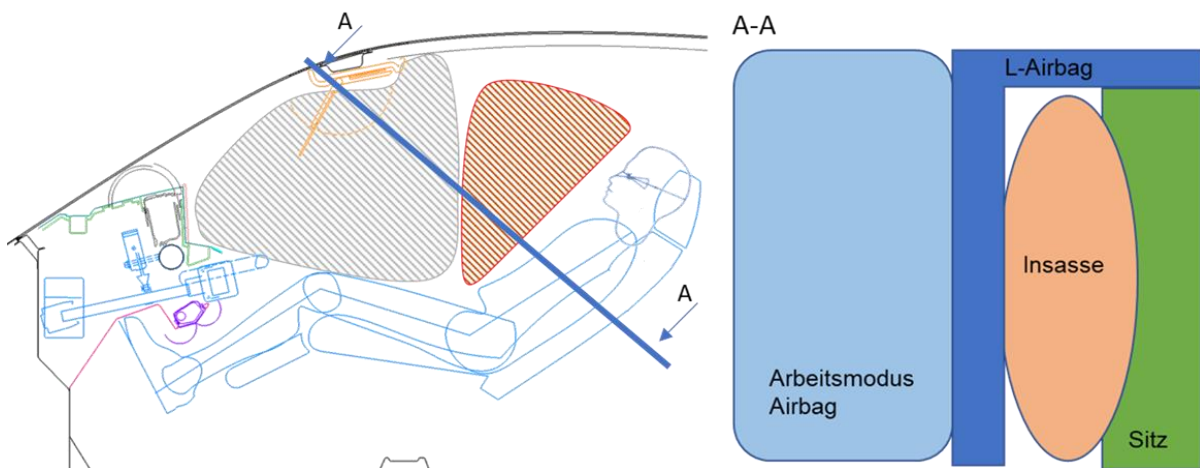


Abbildung 5-4: Räumliche Abdeckung der Relaxposition mit Kombination aus L-Airbag und Dachairbag (links) und Schnitt A-A (rechts)

Knieairbag

Durch die Differenz der Beinposition in den einzelnen Modi müssten verschiedene Volumina des Knieairbags gefüllt werden. Dafür wird eine adaptive Technik benötigt, um die Beine bestmöglich zu schützen. Möglicherweise reicht für einen guten Rundumschutz ein Knieairbag für die Liegeposition aus. Dieser könnte auch in den anderen Sitzpositionen auslösen und einen harten Aufprall der Beine an der I-Tafel verhindern. Herausfordernd ist auch die gedachte LG-Position der Frau, da die Füße sich dabei direkt vor der Airbagöffnung befinden (vgl. Abbildung 5-5).

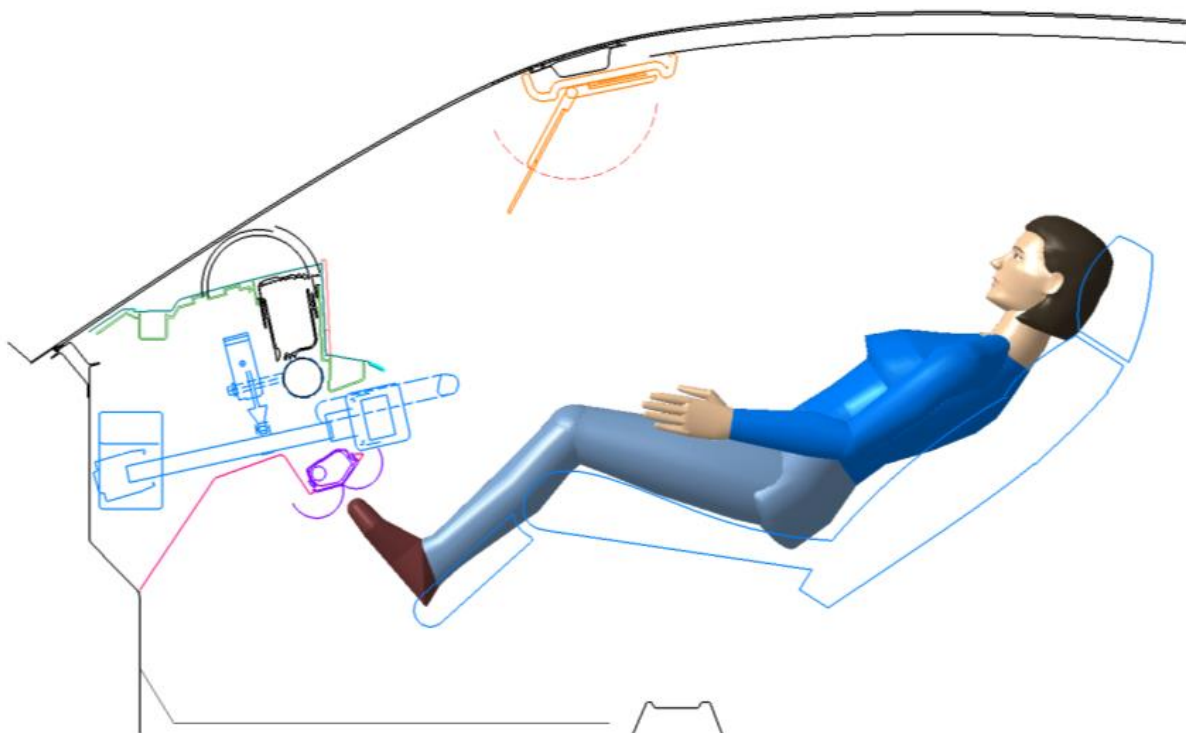


Abbildung 5-5: Position der 5% Frau in der LG-Position [HCC2021]

5.1.2 Räumliche Untersuchung der Airbagsysteme auf der Beifahrerseite

Der Beifahrer muss im Fahrzeug keine Fahraufgaben übernehmen. Damit müssen die Airbagsysteme nur für zwei Modi abgestimmt werden. Die räumliche Gestaltung der Fahrer und Beifahrerseite ähnelt sich einander. Die Maßnahmen zur Absicherung der Relaxposition auf der Fahrerseite können so auch auf der Beifahrerseite übernommen werden, jedoch unterscheidet sich das ausklappbare Bedienfeld auf beiden Seiten (vgl. Abbildung 2-23). Damit wird eine weitere Betrachtung des Arbeitsmodus auf der Beifahrerseite notwendig.

Es muss überprüft werden, wie sich der Airbag im eingeklappten und ausgeklappten Bedienfeld auf der I-Tafel abstützen kann. Möglicherweise verändert sich das Verhalten des Airbags nicht. Damit könnte auf eine adaptive Lösung, um den entstanden Raum zu füllen, verzichtet werden. Eine Aussage darüber lässt sich jedoch nur durch eine Simulation treffen.

5.2 Fehleranalyse der Airbagsysteme für den HCC21

Die räumliche Untersuchung zeigt die Stärken und Schwächen des Airbagsystems. Es wurden bereits einige Vor- und Nachteile der Systeme bei der räumlichen Betrachtung erwähnt. Im Folgenden sollen die Fehler in der Tabelle 5-1 zusammengestellt werden.

Tabelle 5-1: Fehleranalyse der Airbagsysteme für den HCC21

Lösung	Fehler
Lenkrad-Airbag	Airbagtopf blockiert durch den Lenkradkranz im eingefahrenen Zustand
I-Tafel-Airbag	Bauteile der Sonnenblende können auf den Insassen geschossen werden
	Tisch/Bedienfeld kann die Ausfaltung des Airbags blockieren
	Tisch/Bedienfeld kann den Torso des Insassen auf der Fahrerseite verletzen
	geringer Abstand zwischen I-Tafel-Bildschirm und Windschutzscheibe
Dachairbag	Tisch/Bedienfeld kann die Beine des Insassen verletzen
	Airbag könnte in einigen Positionen über dem Kopf explodieren
	Arme könnten verletzt werden
L-Airbag	Mittelkonsole verringert den Raum zur Ausfaltung
	Arme könnten verletzt werden
Knie-Airbag	Nicht alleine nutzbar, da keine Abstützung
	Beine und Füße können verletzt werden
	Öffnung kann durch den Insassen blockiert werden

Einige auftretende Fehler der Lösungen sind dabei so kritisch anzusehen, dass ein Nutzverhalten, wie vorgesehen, nicht umzusetzen ist. Dazu gehören Fehler, die zu schweren Verletzungen oder Tod des Insassen führen können. Bei den aufgelisteten Punkten in der Tabelle 5-1 gehören die Fehler der I-Tafel zu K.O.-Kriterien, die Bauteile auf den

Torso und Kopf des Insassen schleudern. Zusätzlich kann auch der Dachairbag durch eine vordere Sitzposition beim Auslösen über dem Kopf zum Tod führen. Die Fehler der anderen Airbags können im kritischen Lastfall möglicherweise zu Brüchen oder Blutergüssen führen. Für eine ausführliche Aussage müssten aber genauere Versuche durchgeführt werden.

Eine weitere Idee sieht vor, den Airbag durch das Display der I-Tafel hindurch und sich bis kurz vor dem Insassen schlauchförmig zu öffnen. Die Idee des Öffnens durch das Display kann dabei nur auf der Fahrerseite realisiert werden, da die gleiche Größe des Bildschirms auf der Beifahrerseite nur mit ausgeklappter I-Tafel gegeben ist. Bei der schlauchförmigen Entfaltung könnte es zum Ausknicken des Airbags kommen, da dieser nicht bestmöglich abgestützt wird. Durch die einseitige Abdeckung und die Problematik des Abstützens, wurde diese Idee in dieser Arbeit nicht genauer verfolgt.

5.3 Funktionsanalyse der Airbagsysteme für den HCC21

Der räumliche Vergleich, sowie die Fehleranalyse der Airbagsysteme zeigt die Stärken und Schwächen jedes einzelnen Systems. Noch einmal deutlicher wird daraus, dass ein einziges Airbagsystem nicht alle Sitzpositionen abdeckt. Zur Funktionsabdeckung muss daher entweder ein größenadaptives Airbagsystem verbaut werden oder ein Zusammenspiel verschiedener Airbags genutzt werden. Für das Rückhaltesystem des HCC21 bietet sich an, im Lenkrad einen Airbag für die Fahrposition zu verbauen. Für den Arbeitsmodus wird vom angedachten I-Tafel Airbag abgesehen. Dieser hat in dem Konzept des HCC21 zu viele Nachteile, die nur mit Änderungen der Funktionen des Bildschirms in der Sonnenblende und dem Wegfallen des bisherigen Tisches beseitigt werden könnten. Zwar hat der Dachairbag auch einen kritischen Nachteil, dieser kann aber damit gelöst werden, dass die Sitzverstellung im Arbeitsmodus begrenzt wird. Für die Relaxposition können zwei Varianten genutzt werden. Einerseits kann ein adaptives System im Dach verbaut werden, andererseits auch eine Kombination des Dachairbags mit dem L-Airbag ausgeführt werden. Beim Knieairbag reicht zum aktuellen Stand eine Absicherung des Fahrer- und Arbeitsmodus. Insbesondere da die Varietät in der Liegeposition auch keine Öffnung des Airbags ermöglicht. Stellt man hingegen in Simulationen fest, dass auch eine Abstützung der Füße benötigt wird, muss eine neue Möglichkeit entwickelt werden.

6. Simulative Bewertung von Rückhaltesystemen

Wie aus der Tabelle 4-1, in dem der morphologische Kasten dargestellt wird, können auch Funktionen und Nutzen einzelner Lösungen in der computer-gestützten Simulation überprüft werden. Dabei sollen mittels der Simulation, sitzgebundene Lösungen zur Verbesserung in der LG- Position untersucht werden. Das Ziel der Simulation ist auch ein besseres Verständnis über das Bewegungsverhalten des Insassen zu gewinnen und die Möglichkeit zu bieten, den Nutzen einiger Lösungsansätze besser nachzuvollziehen.

6.1 Aufbau der Simulation

Für die durchgeführte Simulation wird ein im Zuge einer Studentenarbeit entwickeltes Prinzip Modell eines Dummys genutzt. Die Körperteile wurden mittels Ellipsoiden und die Gelenke über Konnektoren in Abaqus modelliert. Konnektoren können verschiedene Verbindungstypen im Programm abbilden und verbinden zwei Punkte mit ihren verschiedenen Eigenschaften, wie Elastizität und Plastizität, und Freiheitsgraden. Des Weiteren besteht das Modell aus starren Flächen für das Sitzkissen, die Sitzlehne sowie für den Gurt. Die Bewegungscharakteristik des Dummys wurde mithilfe eines Schlittenversuches plausibilisiert (vgl. Abbildung 6-1). [SCH2015]

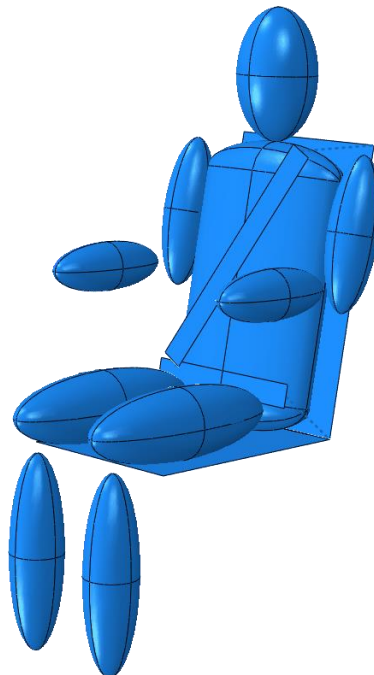


Abbildung 6-1: Prinzipmodell des Dummys von Simon Schwolow [SCH2015]

Für die Untersuchung der Lösungsansätze der Rückhaltesysteme für die Relaxposition wird die Position des Dummies an die Liegeposition aus dem HCC21 angepasst. Die Winkel zwischen den einzelnen Körperteilen werden aus der Schnitt Mappe entnommen. (vgl. Abbildung 6-2). [HCC2021]

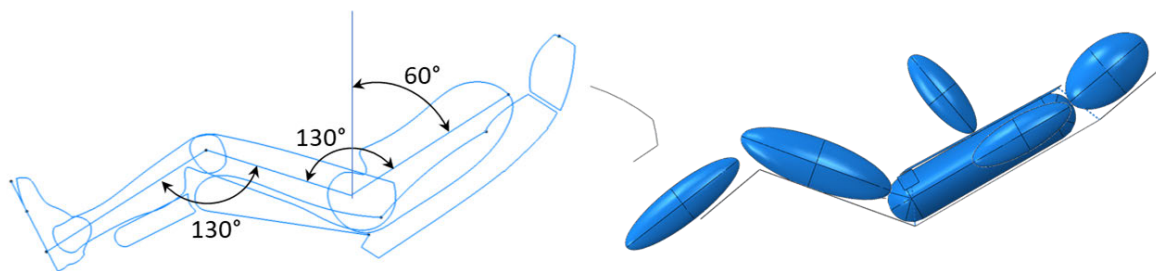


Abbildung 6-2: Liegeposition des Körper im Schnitt (links) in Abaqus (rechts)

Nach der Rotation der Körperteile in Abaqus werden anschließend die Position der Konnektoren und die Bereiche der Bewegung kontrolliert. Bei einer Probesimulation zur Überprüfung der neuen Position ist aufgefallen, dass die Bewegung durch das Kniegelenk nicht mehr richtig abgebildet wird (vgl. Abbildung 6-3). Bei genauerer Betrachtung der Konnektor Positionen ist festzustellen, dass der Verbindungspunkt des Knies nicht, wie die anderen Gelenkpunkte, mit rotiert ist. Dies ist auf eine andere modellierungsweise des genutzten Referenzpunktes zurückzuführen. So wurden die mitrotierten Referenzpunkte in den einzelnen Parts der Körperteile definiert und folgen den translatorischen und rotatorischen Bewegungen der Körperteile. Einzig die Konnektor Punkte des Kniegelenks wurden im Zusammenbau erstellt, wodurch sich diese nicht mit den Körperteilen mitbewegen. Für die Untersuchung wurde die Position im Zusammenbau angepasst, um damit die Bewegung des Knies richtig abzubilden.

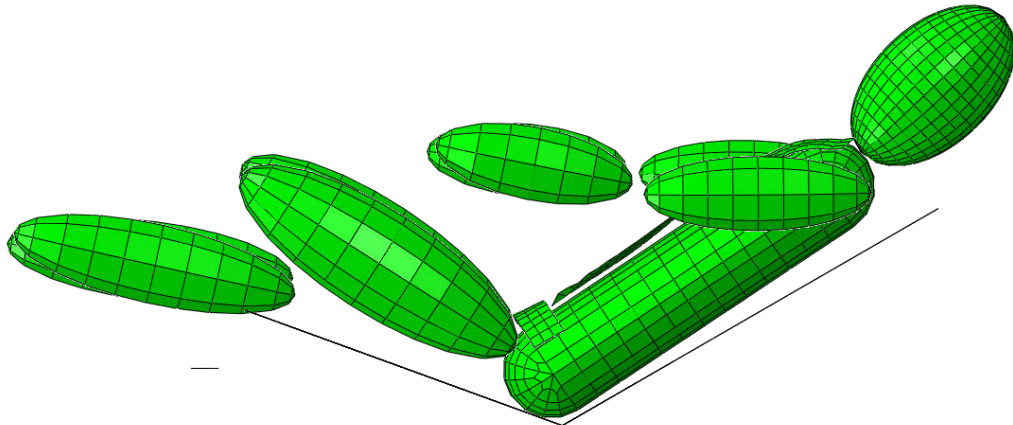


Abbildung 6-3: Fehlbewegung des Kniegelenks in der neuen Position

Zusätzlich zur neuen Liegeposition wurden neue Randbedingungen für die Simulation definiert. Mit der Simulation soll der Lastfall „Frontalcrash gegen die starre Wand“ untersucht werden. Aus dem Gesetzesauszug wird eine Anfangsgeschwindigkeit von 50 km/h definiert (vgl. Abbildung 3-1). Das genutzte Subsystem für die Simulation bildet keine Struktur der Fahrzeugkarosserie ab. Daher wird angenommen, dass der Sitz fest an die Struktur des Fahrzeuges angebunden ist und der gleichen Verzögerung während des Crashes ausgesetzt ist. Im Kapitel 3 wurde die Verzögerung des Fahrzeuges berechnet und hier als Randbedingung für die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt verwendet (vgl. Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Randbedingung der Fahrzeuggeschwindigkeit über die die Zeit

Zeitpunkt (s)	Geschwindigkeit (m/s)
0	13,888
0.0087	12,777
0.0412	0

6.2 Erweiterung des Subsystems

Bauteil Erweiterung

In den ersten Testsimulationen mit den neuen Randbedingungen sind einige Probleme des bisherigen Subsystems aufgefallen. Unter anderem fällt auf, dass beim Frontalcrash durch die Bewegungsfreiheit der Unterbeine kommt es zu einem starken Impuls in den

Körper. Durch diese zusätzliche Energie wird der Körper aus dem Sitz katapultiert. Daher wurde das Subsystem um den unteren Teil der Instrumententafel, wie auch um eine Fußstütze, die am Sitz befestigt wird, erweitert. Aus Testsimulationen von Variante mit aktiver Rücklehne wird deutlich, dass eine Kopfstütze benötigt wird, um eine übermäßige Überstreckung des Kopfes zu verhindern (vgl. Abbildung 6-4).

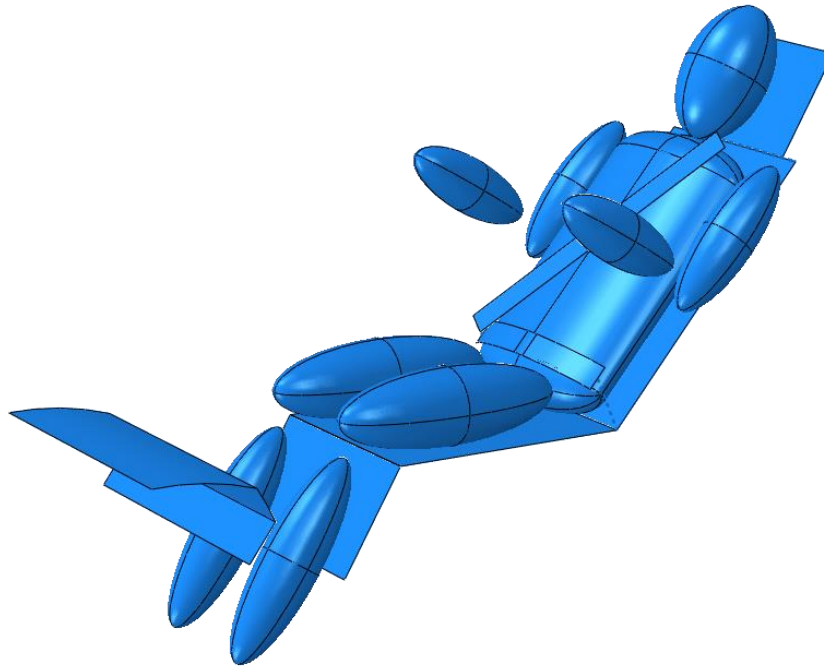


Abbildung 6-4: Erweitertes Subsystem des Dummy Modells

Gurtsystem Erweiterung

Auch das Gurtsystem des Ausgangsmodells wurde für die Untersuchung neu modelliert. Angefangen mit der Änderung der Eigenschaften des Gurtes. Die bisher starren Schalelemente werden durch plastisch verformbare Elemente ausgetauscht. Die Materialkarte des Gurtes wurde aus den Abaqus Beispielen entnommen. [ABA2014] Um die Realität noch besser abzubilden, soll die Wirkung eines Gurtkraftbegrenzers über einen Konnektor modelliert werden. Wie im Kapitel „Stand der Technik“ bereits erwähnt begrenzt der Gurtkraftbegrenzer die wirkende Kraft auf den Brustkörper. Hierfür wurden wiederum die Connector Eigenschaften aus der Abaqus Dokumentation untersucht [ABA2014] und Werten aus der Literatur verglichen (vgl. Abbildung 2-5) [Kra2013]. Der Verbindung des Gurtes mit dem oberen Punkt des Sitzes wird der Konnektor Translator mit den Eigenschaften, des Gurtkraftbegrenzers, zugeordnet (vgl. Abbildung 6-5).

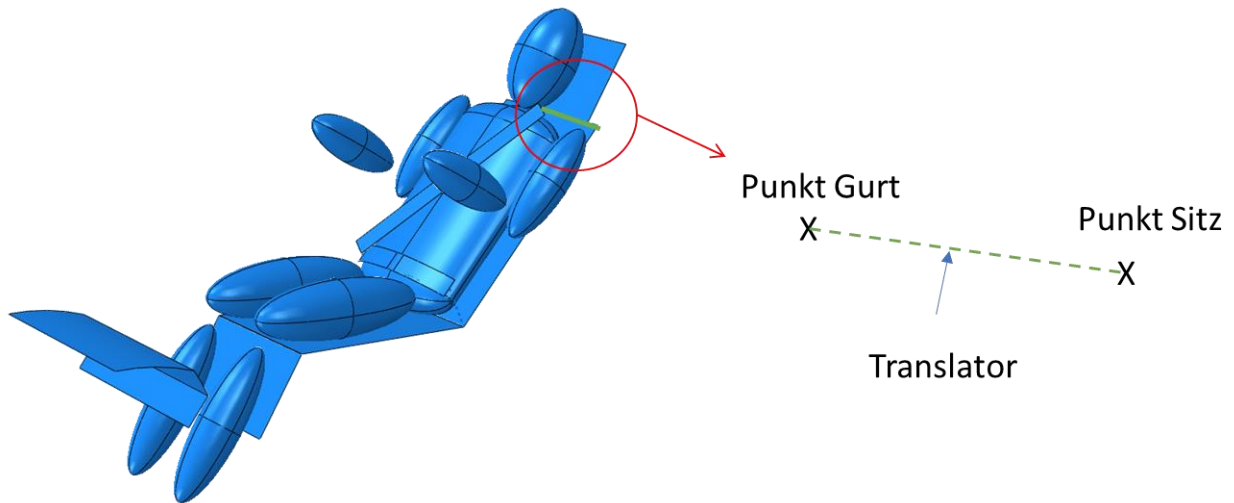


Abbildung 6-5: Verbindung des Gurtes mit Sitz über einen Translator

Der benutzte Kraftverlauf für den Gurtkraftbegrenzer kann der Tabelle 6-2 entnommen werden. Für die Simulation wurde vereinfacht angenommen, dass der Gurt bereits blockiert.

Tabelle 6-2: Kraftwerte zum Weg beim Gurtkraftbegrenzer

Weg	Kraft
0	150
5	3500
300	3500
301	350000

Die ersten Testsimulationen mit dem modellierten Gurtkraftbegrenzer zeigen jedoch auf, dass weitere Anpassungen am Gurtsystem notwendig sind. Die bisherige Modellierung nimmt durch die Einspannung und die Eigenschaft des Translators die Kräfte in jegliche Richtungen auf. Jedoch führt nur eine Kraft in Normalen-Richtung dazu, dass der Gurt abrollt. Die restlichen Kräfte werden durch die Einspannung aufgenommen, wodurch es teilweise zu starken Belastungen kommt (vgl. Abbildung 6-6).

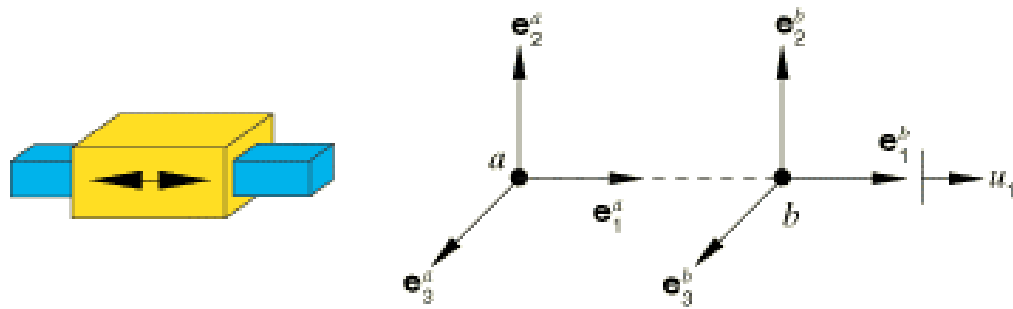


Abbildung 6-6: Kraftaufnahme durch den Translator [ABA2014]

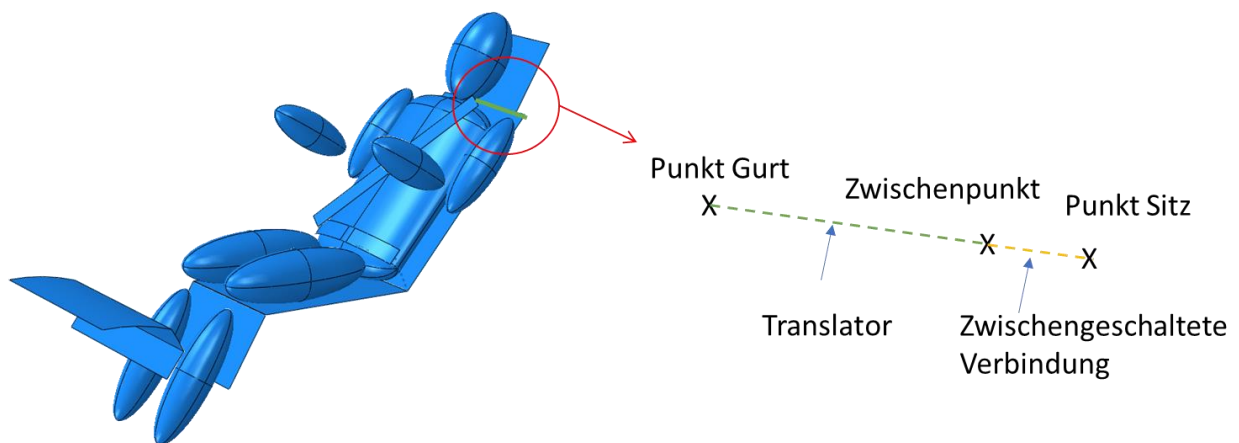


Abbildung 6-7: Zwischengeschaltete Verbindung

Daher wurde zu dem Translator zusätzlich eine zweite Verbindung modelliert, um auch abweichende Kräfteerichtungen durch den Gurtkraftbegrenzer aufzunehmen (vgl. Abbildung 6-7). Dafür gibt es drei verschiedene Konnektoren Typen, die genutzt werden können. Dazu gehört der Hinge, Link und Join Connector. Beim Hinge handelt es sich um einen Connector, der die Bewegung eines Scharniers abbildet. Damit ist nur die Rotationsachse in x-Achse frei, die restlichen Freiheitsgrade sind durch den Connector blockiert. Der Link Connector repräsentiert eine Verbindung eines Stabes, der mit zwei Kugelgelenken verbunden wird. Diese Verbindung blockiert alle translatorischen Bewegungen. Die rotatorischen Bewegungen sind durch diesen Connector möglich. Die Join-Verbindung hat die gleichen Freiheitsgrade wie der Link-Connector. Es wird jedoch nur ein Kugelgelenk repräsentiert (vgl. Abbildung 6-8).

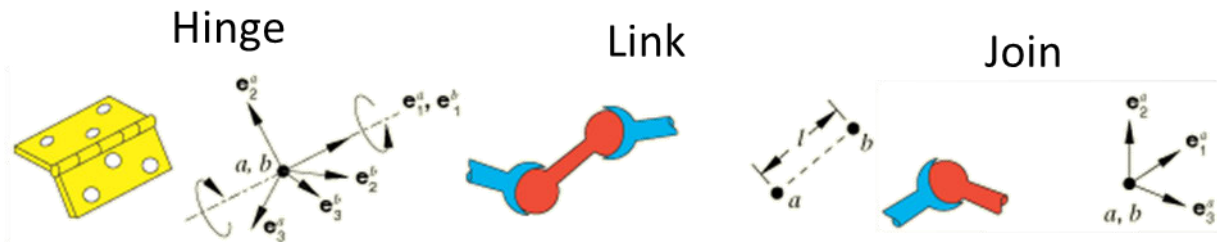


Abbildung 6-8: Konnektoren Typen Hinge (links), Link (mitte), Join (rechts) [ABA2014]

Die verschiedenen Verbindungstypen werden über durchgeführte Simulation verglichen, um den Unterschied zwischen den Eigenschaften der Konnektoren auf die Insassenkinematik herauszufinden und die für das Subsystem beste Verbindung zu wählen. Dafür werden Verschiedene Parameter ausgewertet. Dazu gehört die Punkte wie Gurtausrollung, der Verlauf der Gurtkraft, als auch die Beschleunigung und Geschwindigkeit der Brust und des Kopfes. Für den Vergleich der Varianten werden die Werte in Diagrammen gegenübergestellt. In den Diagrammen ist die Farbe der Kurven für jede Variante gleich, Translator (gelb), Link (blau), Hinge (orange) und Join (grau).

Für die Auswertung des Kopfes und der Brust werden die Werte mit dem SAE60-Filter gefiltert. Für die gefilterten Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte wird jeweils der Betrag bestimmt. Dafür werden die Formeln (6-1) und (6-2) benutzt.

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (6-1)$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (6-2)$$

Bei der Ausrollung des Gurtes, während des Crashes, verhalten sich die Verbindungen Join und Link sowie Hinge und Translator ähnlich. Alle Varianten beginnen mit der Ausrollung nach ca. 25 ms. Vorher ist die Relativbewegung zwischen Insassen und Sitz nur sehr gering. Der Translator erreicht dabei den maximal Wert von 120mm bei ca. 55 ms. Nach 95 ms rollt sich der Gurt wieder auf 90 mm ein. Der Hing erreicht auch einen maximal Wert von 120 mm zum Zeitpunkt 70 ms. Nach Erreichen des Wertes fällt dieser wieder auf 110 mm ab. Die Link Verbindung erreicht eine maximale Ausrollung von 165 mm zum Zeitpunkt. 70 ms und fällt nach 95 ms wieder auf 155 mm. Die Kurve der Join Verbindung verhält sich dabei wie bei dem Link.

Der Vergleich der Ausrollung des Gurtes zeigt, dass die Hinge-Verbindung sich nur im Verlauf der Kurve, nicht aber in den Werten zum Translator unterscheidet. Die beiden

Verbindungen Link und Join verhalten sich gleich und ermöglichen, dass der Gurt weiter ausgerollt wird. Dies entsteht unter anderem dadurch, dass der Punkt des Gurtes sich durch die Verbindungen, im Raum in Y-Richtung bewegen kann. Das Einrollen des Gurtes bei allen Varianten kann entweder auf Druckkräften auf den Translator oder Elastizitäten des Materials zurückzuführen sein (vgl. Abbildung 6-9).

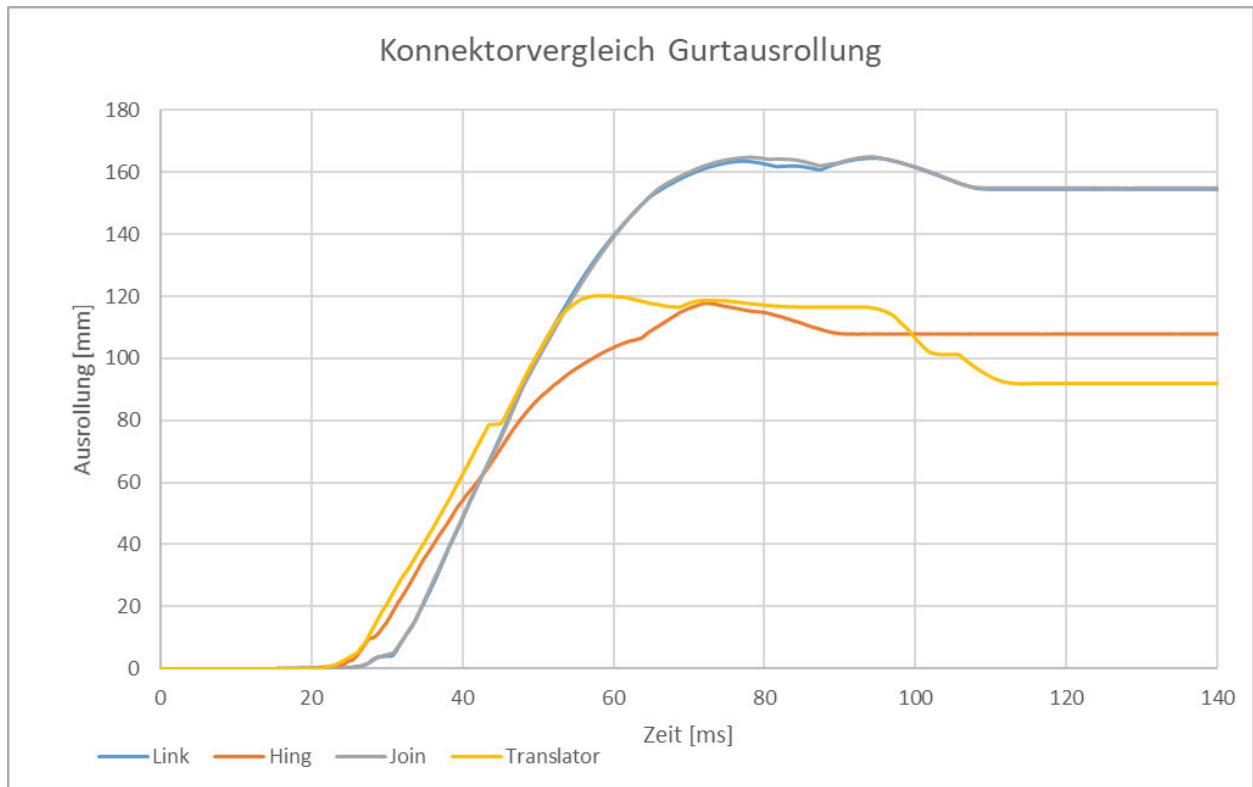


Abbildung 6-9: Vergleich der Gurtbewegung durch die verschiedenen Konnektoren

Die Gurtkraft wird dabei durch die Connector Eigenschaft auf 3500 N begrenzt. Auffällig ist dabei, dass beim Translator auch negative Kräfte von -3500 N auftreten. Die Elemente Verhaken sich in der Simulation dabei am Oberkörper, wodurch auch eine Druckkraft am Translator auftritt. Die maximale Kraft beim Translator wird nach 27 ms, beim Hing nach 30 ms und beim Join sowie Link nach 33 ms erreicht. Die Kraft auf den Gurt fällt dabei beim Translator ab 115 ms, beim Hing ab 90 ms und beim Link und Join ab 110 ms nach. Beim Kraftverlauf des Joins und Links fällt die Gurtkraft im Bereich von 80-90 ms ab, bevor wieder die maximale Kraft erreicht wird. Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Extremitäten oder der Kopf einen Impuls in den Oberkörper geben und daher einen Ruck am Gurt bewirken.

Der Vergleich der Gurtkraft zeigt, dass die Realität insbesondere beim Translator nicht

richtig abgebildet wird. Ein Gurt ist vergleichbar zu einem Seil und kann daher nur Zugkräfte aufnehmen. Druckkräfte führen zu Falten im Gurt und können nicht übertragen werden. Die Annahme, dass Druckkräfte zum Zurückrollen des Gurtes führen, lässt sich dabei bei den anderen drei Varianten nicht feststellen. Vielmehr wird wohl eher die Elastizität des Materials den Effekt bewirken (vgl. Abbildung 6-10).

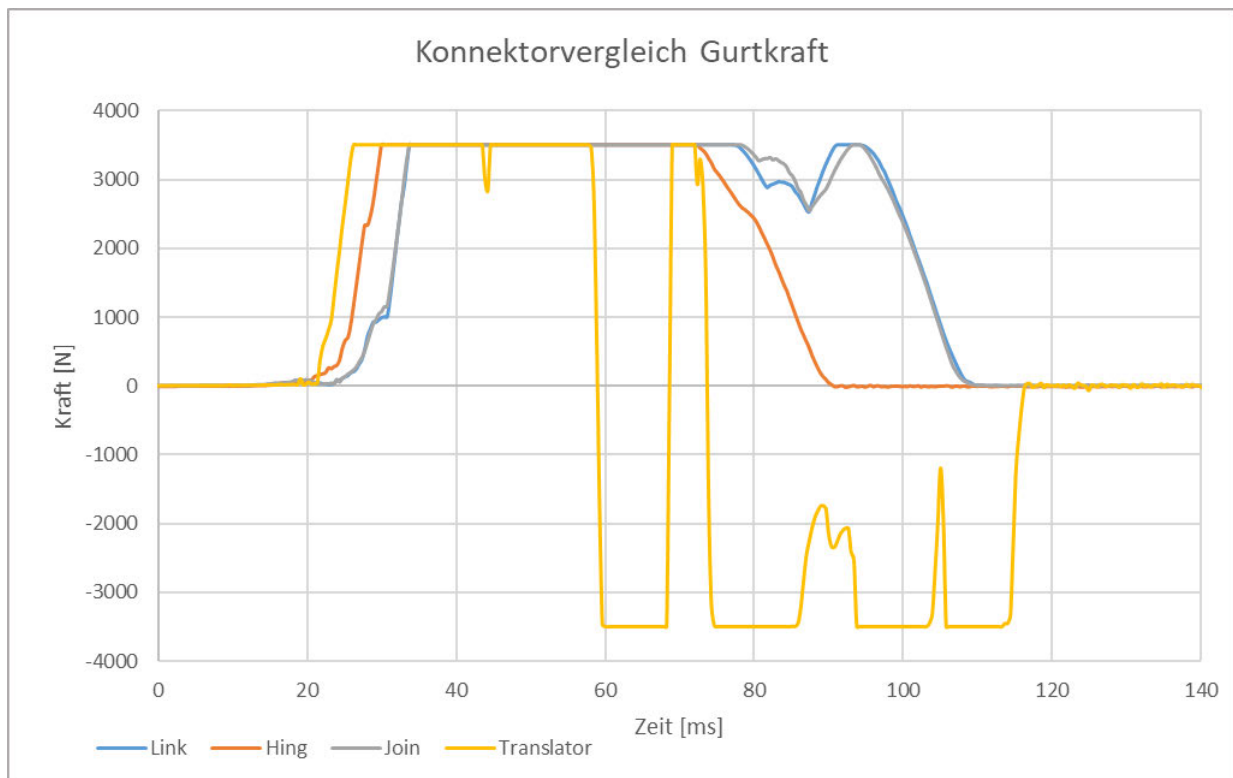


Abbildung 6-10: Vergleich der Gurtkraft durch die verschiedenen Konnektoren

Die Verläufe der Kopfbeschleunigung verlaufen bei allen Varianten ähnlich und schwingen in ähnlichen Wertebereichen über die Dauer des Crashes. Auffällig ist jedoch, dass in den Simulationen jeweils ein Peak der Beschleunigung auftritt. Zum Vergleich der Varianten wird der maximale Wert betrachtet. Der höchste Wert wird dabei beim Translator mit 200 g zum Zeitpunkt 70 ms gemessen. Beim Hing wird zum Zeitpunkt 65 ms ein Wert von 180 g erreicht. Die Verbindung mit dem Link und Join erreicht zum Zeitpunkt 82 ms einen Wert von 150 g und hat damit im Vergleich den niedrigsten Wert. Beim Vergleich der Kopfbeschleunigung schneiden die Join und Link Verbindungen am besten ab. Die hohen Peaks entstehen, wenn der Kopf die Connector Begrenzung des Genicks erreicht. Zusätzlich fällt mit Betrachtung der Gurtkräfte auf, dass die Zeitpunkte der Peaks mit den Zeitpunkten der Impulse in der Gurtkraft gleich liegen. Hiermit kann ein Zusammenhang über die Kopfbeschleunigung und zusätzlichen Kräften am Oberkörper getroffen werden (vgl. Abbildung 6-11).

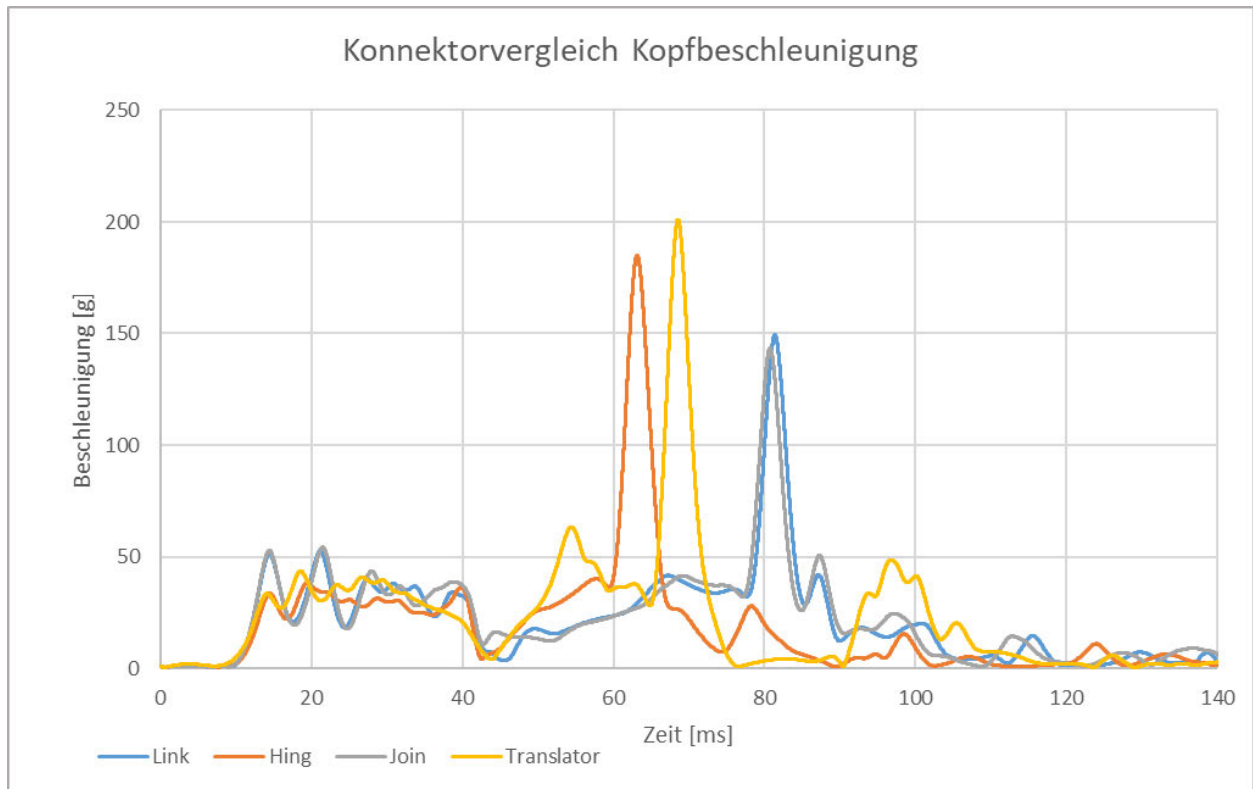


Abbildung 6-11: Vergleich der Kopfbeschleunigungen durch die verschiedenen Konnektoren

Der Vergleich der Brustbeschleunigungsverläufe zeigt keine eindeutige Bewertungsmöglichkeit. Die Beschleunigung der einzelnen Varianten unterscheidet sich, jedoch liegen die maximalen Werte in ähnlichen Größenbereichen. Im Zeitbereich von 10 ms bis 40 ms ähneln sie sich den Beschleunigungsverläufen für die 4 Varianten. Darüber hinaus lassen sich lokale Unterschiede feststellen, wie bei 55 ms, wo die Beschleunigung beim Translator bei 60 liegt. Durch eine unterschiedliche Insassenkinematik entstehen auch unterschiedliche Verläufe der Brustbeschleunigung. Jedoch geben diese Unterschiede keine Entscheidungsmöglichkeit über bessere oder schlechtere Konnektor-Modellierung (vgl. Abbildung 6-12).

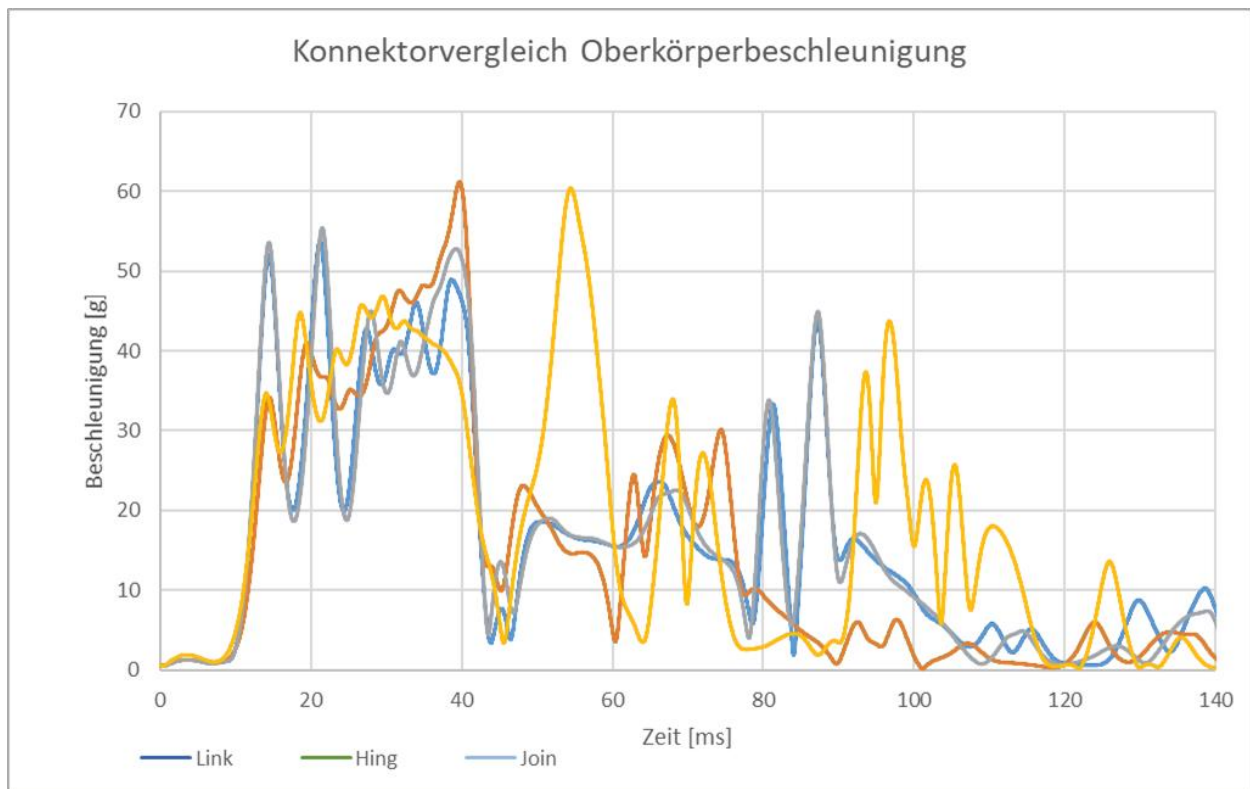


Abbildung 6-12: Vergleich der Brustbeschleunigung durch die verschiedenen Konnektoren

Die Kopfgeschwindigkeit während des Crashes verläuft bis zum Zeitpunkt 40 ms für alle Varianten gleich. Die Geschwindigkeit des Kopfes sinkt bei den einzelnen Varianten zu den Zeitpunkten der Beschleunigungspeaks ab. Da die Peaks bei dem Link und Join erst bis zu 20 ms später auftreten, ist auch die Geschwindigkeit des Kopfes bei den Varianten um ca. 4km/h niedriger. Damit verlängert sich aber auch der Bewegungsweg des Kopfes. Jedoch ist in der Liegeposition genügend Raum vorhanden, um sicherzustellen, dass es zu keinem Kontakt zwischen Innenraumbauteilen und Insassen kommt.

Damit lässt sich festhalten, dass sich die beiden Konnektoren Varianten, Link und Join, den Geschwindigkeitsverlauf des Kopfes am besten abbilden (vgl. Abbildung 6-13).

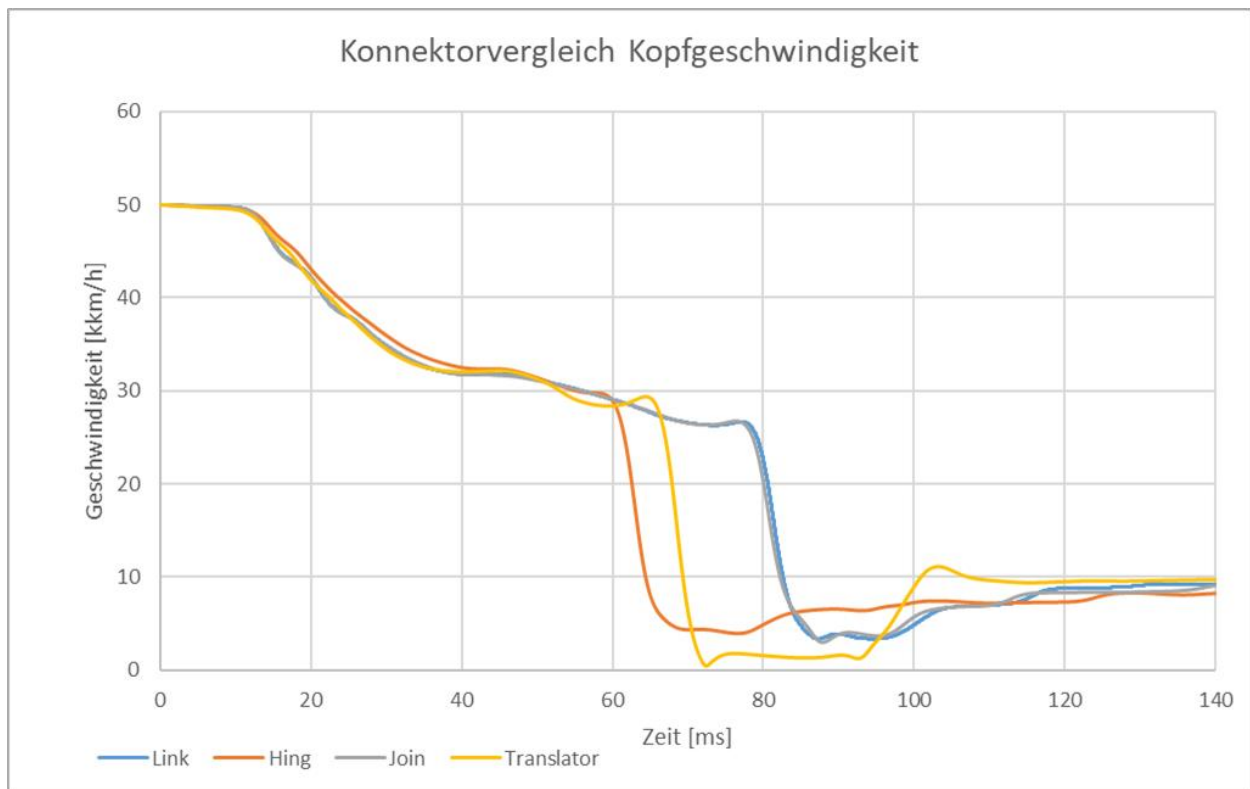


Abbildung 6-13: Vergleich der Kopf Geschwindigkeiten durch die verschiedenen Konnektoren

Ähnliche Tendenzen der Kopfgeschwindigkeit weist auch die Oberkörpergeschwindigkeit auf. Die Geschwindigkeitsabnahme verhält sich dabei bis zum Zeitpunkt 35 ms gleich. Erst danach entstehen, bedingt durch die unterschiedliche Insassenkinematik, andere Kurvenverläufe. Hiermit ist festzuhalten, dass alle Varianten zum ungefähren Zeitpunkt von 42 ms einen leichten Anstieg der Geschwindigkeit aufweisen. Dies ist daran verknüpft, dass die Arme des Insassen nach vorne geworfen werden und zum Zeitpunkt der stärksten Streckung einen Impuls an den Oberkörper geben. Positiv fällt bei den Varianten des Joins und Links dabei auf, dass die Geschwindigkeit nach dem Impuls mit ähnlicher Steigung wie zu Beginn abfällt. Beim Translator hingegen fällt die Geschwindigkeit steiler ab (vgl. Abbildung 6-14).

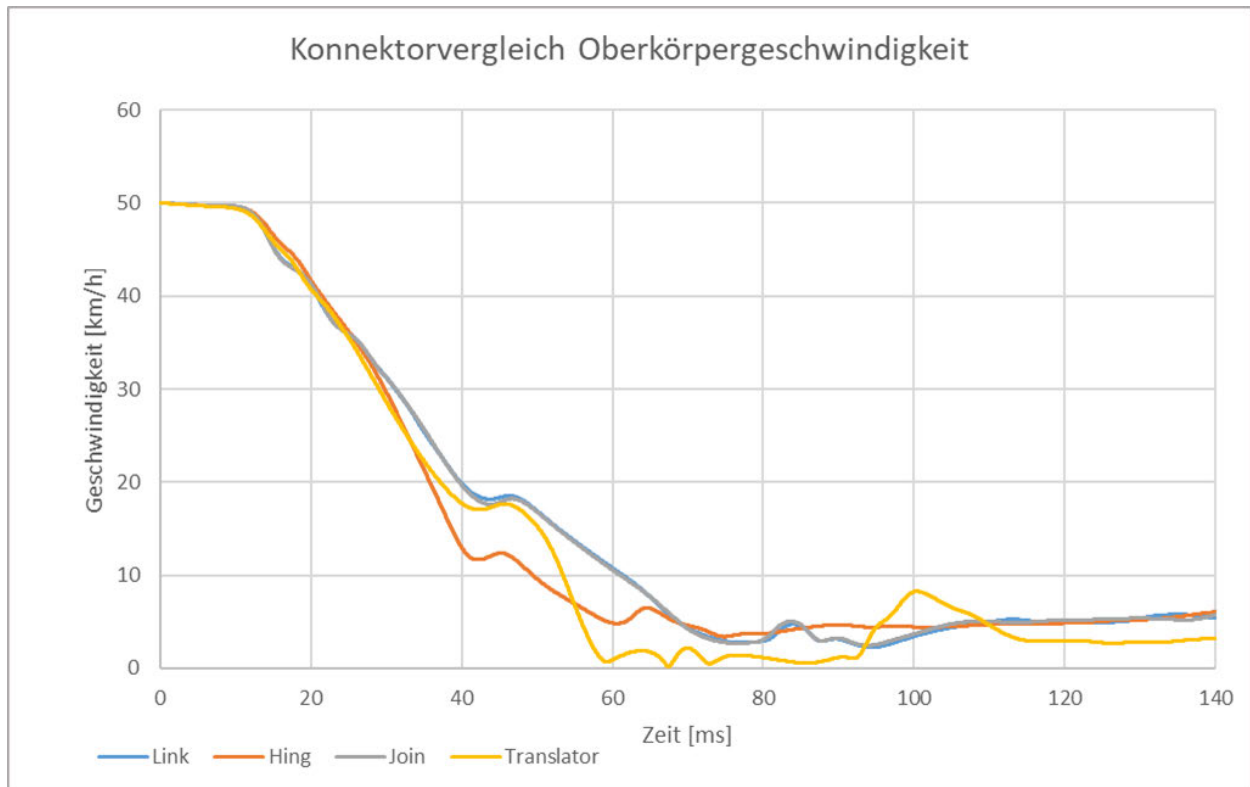


Abbildung 6-14: Vergleich der Brustgeschwindigkeit durch die verschiedenen Konnektoren

Alles in allem ist nach dem Vergleich der verschiedenen Konnektoren festzuhalten, dass mit der Join oder Link Verbindung die besten Ergebnisse auftreten, mit denen die Realität wahrscheinlich gut abgebildet wird. Durch die Modellierung des Links mit einer sehr kleinen Länge des Stabes zwischen den beiden Kugelgelenken ähnelt den Ergebnissen des Joins. Der Join ist ein Spezialfall des Links, bei dem die Stablänge null beträgt. In der Simulationsdarstellung fällt beim Link auf, dass die Link Verbindung zum Ende der Simulation, wenn die Gurtkraft abfällt, anfängt zu zittern und Positionen entstehen, die in Realität nicht abgebildet werden würden. Für weitere Simulation für die Abbildung des Gurtkraftbegrenzers über eine Kombination aus Translator und Join entschieden. Wichtig ist aber zu erwähnen, dass dies nur eine Annahme ist, wie der Gurtkraftbegrenzer und die Verbindung sich im realen Fahrzeug verhalten würden. Für eine genaue Plausibilisierung müssten Ergebnisse aus realen Tests vorliegen, die mit der Simulation und dem Verhalten verglichen werden können.

Zusätzlich zur Anpassung des Gurtkraftbegrenzers und der Konnektoren wurden auch die restlichen Anbindungspunkte des Gurtes versucht zu plausibilisieren. Dabei wurde mit einem vorhandenen Versuch versucht die Kinematik zu verstehen und ein ähnliches

Verhalten in der Simulation abzubilden. Einerseits wurde festgestellt, dass sich der Beckengurt während des Crashes durch Nachgiebigkeit des Bauches erst am Becken des Insassen abstützt und während des Crashes die relative Position zum Insassen nicht mehr ändert. Andererseits blockiert der Beckengurt nach einiger Bewegung den unteren Bereich des Körpers. Das in der Simulation eingesetzte Dummymodell bildet den menschlichen Körper dabei nur vereinfacht wieder. Wodurch in den Simulationen der Gurt, durch fehlende Nachgiebigkeit und die Möglichkeit des Verhakens, der Torso hochrutscht. Es kann aber auch passieren, dass der Gurt nach unten durchrutscht, da dieser durch eine fehlende geometrische Verbindung des Torsos mit den Beinen nicht blockiert wird (vgl. Abbildung 6-15).

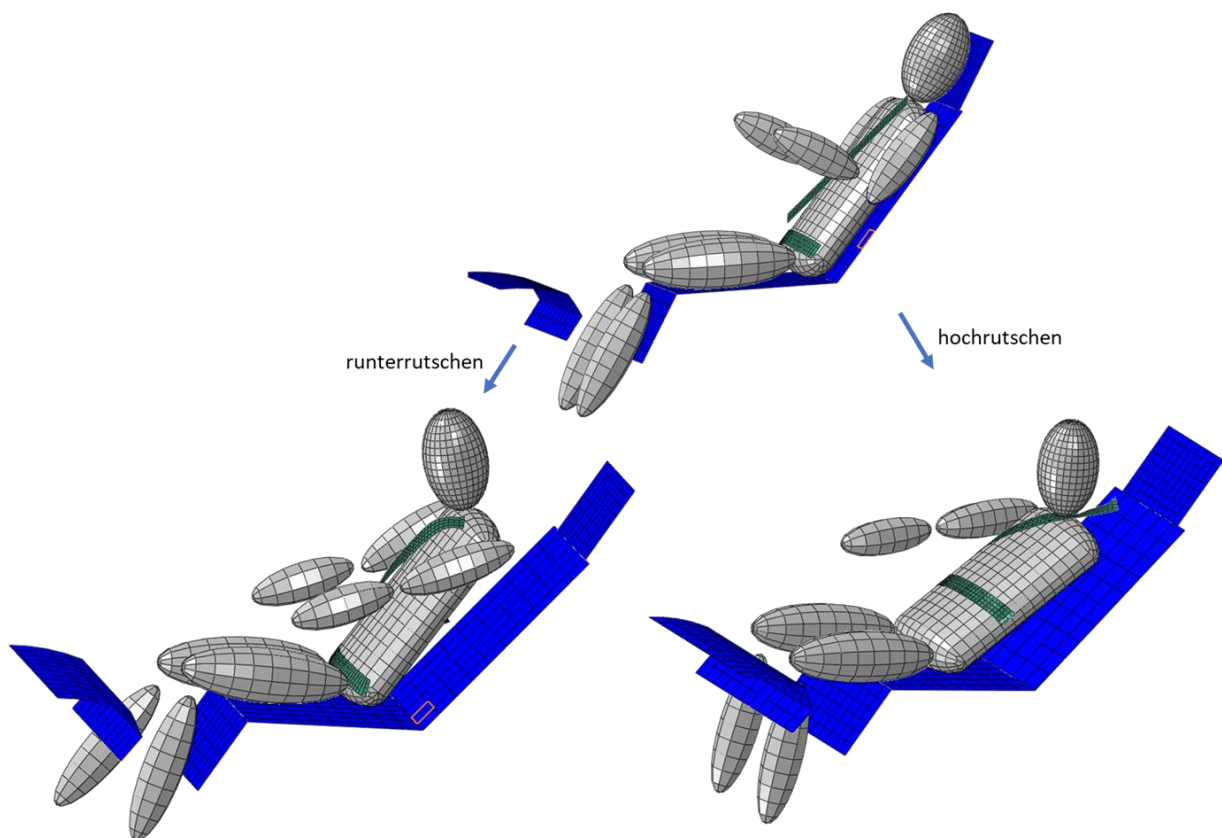


Abbildung 6-15: Fehverhalten des Beckengurtes während der Simulation, Position vorm Crash (oben), Fehverhalten durch runterrutschen (links), Fehverhalten durch hochrutschen (rechts, Arm ausgeblendet)

Das Dynamic Test Center (DTC) hat einen Versuch zur Untersuchung von möglichen Anforderungen an Rückhaltesystem der Zukunft in automatisiert fahrenden Fahrzeugen durchgeführt. Dafür wurde der Insasse in einer Liegeposition mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h mit 10 g abgebremst. [FER2019] Der Versuch zeigt dabei, dass das auffallende Fehverhalten aus der Simulation nicht auftritt, vielmehr bleibt die Position zum

Torso während des Crashes größtenteils unverändert (vgl. Abbildung 6-16). Daraus resultierend wurde für die Simulation der Beckengurt über eine Teilfläche mit dem Torso verklebt.

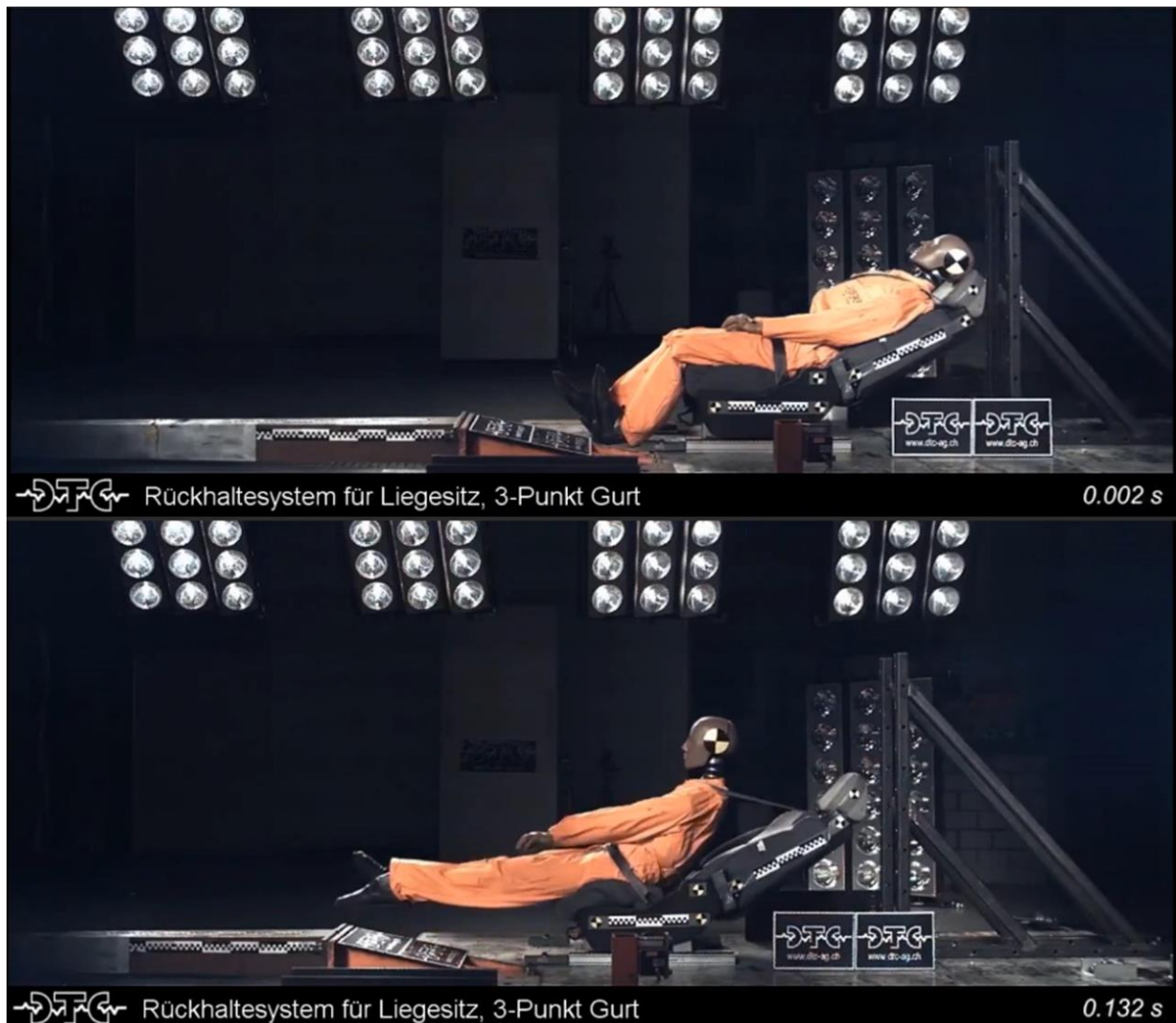


Abbildung 6-16: Rückhaltesystem für Liegesitz, 3-Punkt Gurt zum Zeitpunkt 0.002 s und 0.132 s [FER2019]

Zusätzlich wurde festgestellt, dass die Distanz zwischen dem gemeinsamen Verbindungspunkt des Becken- und des Torsogurtes zum Fehler führt. Die Verbindung, der Gurte mit dem Sitz, wurde durch eine rote Linie gekennzeichnet. Während der Simulation führt der Verbindungspunkt und die Spreizung dazu, dass die Gurte sich auseinander bewegen (vgl. Abbildung 6-17).

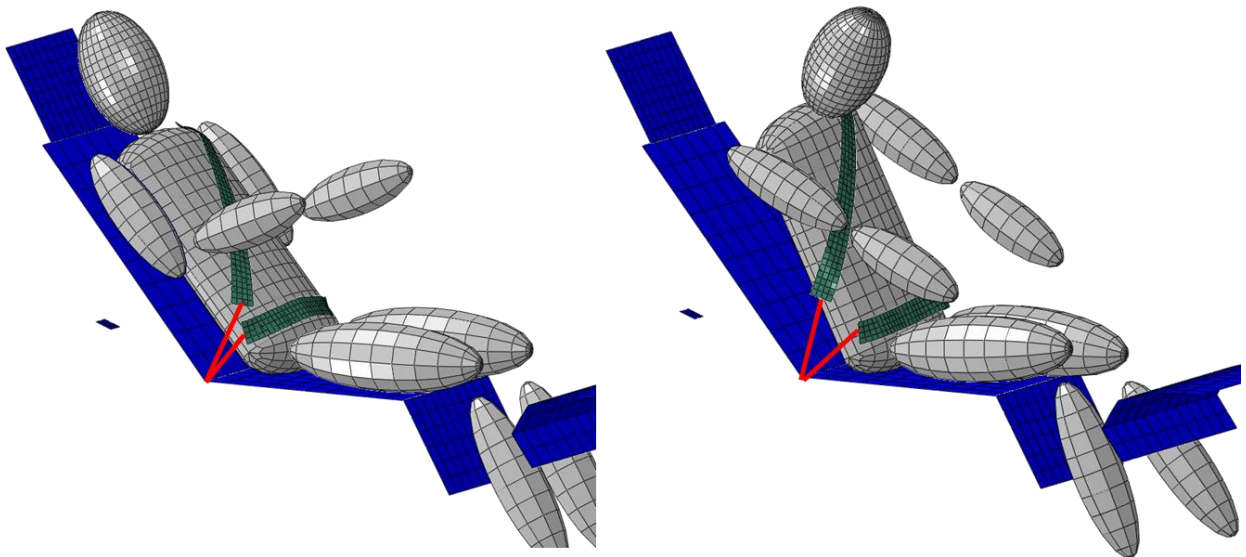


Abbildung 6-17: Fehlverhalten des Beckengurtes mit dem Torsogurt

Bei Betrachtung eines realen Gurtesystems fällt auf, dass die beiden Gurtteile durch die Gurtschlossschnalle verbunden sind. Das Gurtschloss befindet sich in der Seitenansicht dabei weiter von der Sitzfläche entfernt, als bei der bisherigen Modellierung. Daher wurde der Verbindungspunkt (orange) in Abaqus verschoben und mit einer Ersatzverbindung für das Gurtschloss mit dem Sitz verbunden (vgl. Abbildung 6-18).

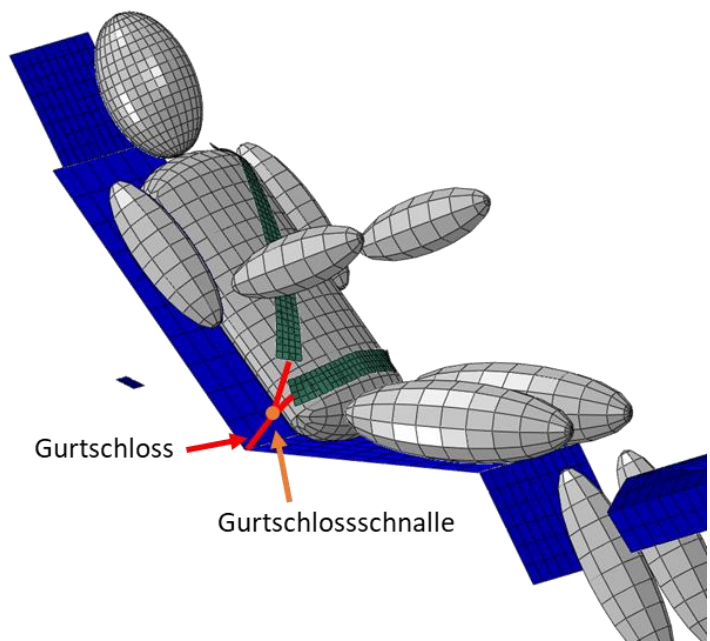


Abbildung 6-18: Detaillierter Simulationsaufbau eines Insassen (rechts) [MPA2012] und angepasste Modellierung des Dummymodells (links)

Durch alle Änderungen und Anpassungen ergibt sich ein gesamtheitliches Gurtsystem für das Simulationsmodell. Die Abbildung 6-19 fasst alle Punkte abschließend zusammen und gibt einen Überblick der Modellierung.

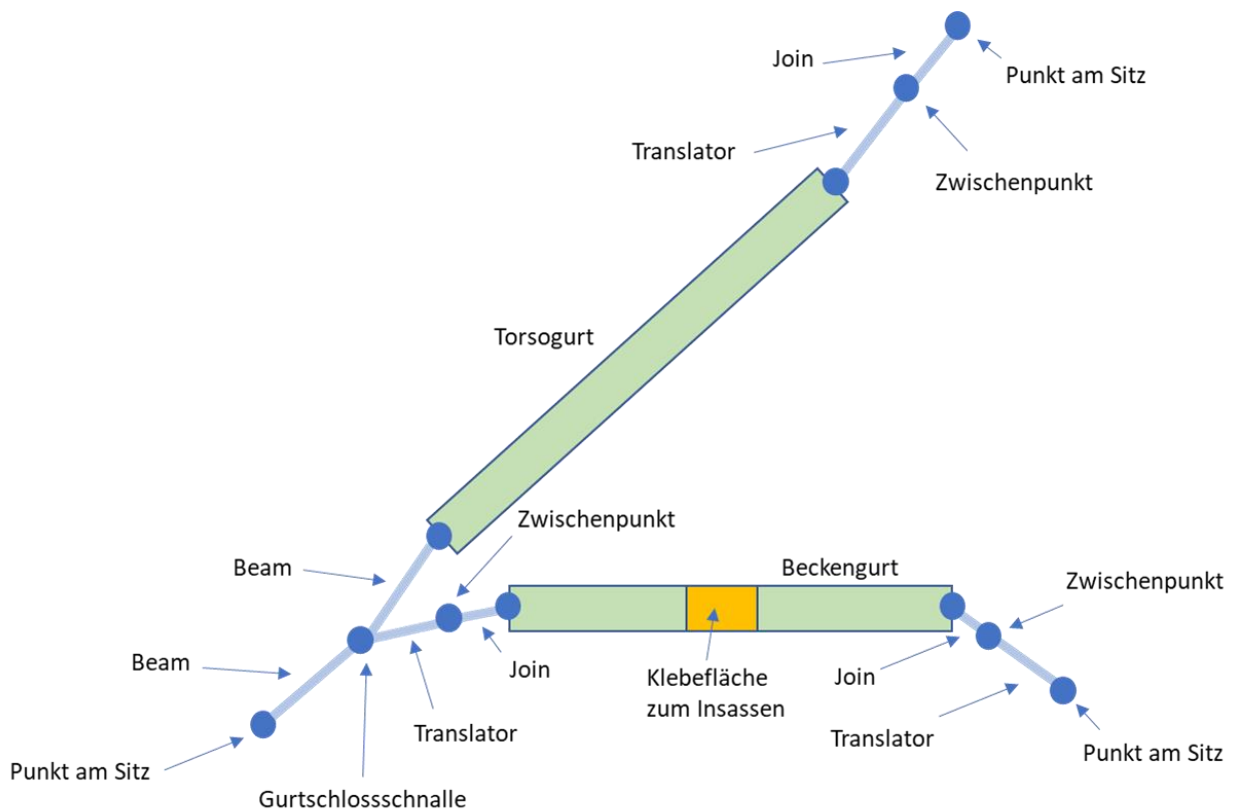


Abbildung 6-19: Aufbau des Gurtsystems in Abaqus

6.3 Auswertung der Ausgangslage

Nach allen Anpassungen ist das Subsystem für die Insassensimulation fertig. Zur Bewertung der einzelnen Varianten werden verschiedene Kriterien definiert. Dazu wird die Gurtausrollung, die Genickkraft, das Genickmoment und Geschwindigkeiten sowie Beschleunigung der Brust und des Kopfes ausgewertet. Als Vergleich werden die maximalen Werte und Zeitpunkte ausgemessen. Bei der Gurtkraft wird zusätzlich die gehaltene Dauer der Kraft verglichen. Die Geschwindigkeiten des Kopfes und der Brust werden im Diagramm gegenübergestellt. Bei der Bewertung der Beschleunigung des Kopfes wird zusätzlich der HIC_{15} und HIC_{36} berechnet. Für die Brust wird ein Vergleichskriterium geschaffen, ähnlich der Berechnung des HIC-Wertes. Dieser wird im Folgenden TIC-Wert (Thorso

Injury Criterion) genannt. Diese werden mithilfe von Excel über die Formel (2-1) berechnet. Dabei wird über die Sehnentrapezformel eine numerische Annäherung des Integrals berechnet (vgl. (6-3)).

$$T(f) = (b - a) \frac{f(a) + f(b)}{2} \quad (6-3)$$

Wie beim Gurtvergleich werden die Kopf- und Brust-Werte über den SAE60-Filter gefiltert. Zusätzlich werden die Genick-Werte mit dem SAE100-Filter gefiltert.

Zuerst werden die Bewegungsabläufe für die Ausgangslage dargestellt und beschrieben (vgl. Abbildung 6-20). Das Fahrzeug und der Insasse haben zum Anfang der Simulation die gleiche Geschwindigkeit. Daher ist die relative Bewegung des Insassen zum Sitz zu den Zeitpunkten 0 und 15 ms nicht zu erkennen. Die eingesetzten Rückhaltesysteme bremsen den Oberkörper erst passiv durch entstandene Relativbewegungen zum Fahrzeug ab. Erst ab dem Zeitpunkt 30 ms ist durch die Abbremsung des Fahrzeuges eine Bewegung des Insassen zu erkennen. Anfänglich wird jegliches Spiel zwischen dem Gurt und Oberkörper beseitigt, anschließend legt sich dieser an den Oberkörper an. Das Gurtsystem beginnt die Funktion als Rückhaltesystem. Im Verlauf schwenken die Unterschenkel um das Knie bis zum Zeitpunkt 45 ms, wo die Beine die untere I-Tafel berühren. Das Spiel und die Nachgiebigkeit im Beckengurt bewirken anfänglich, dass der Körper sich translatorisch in x-Richtung bewegt. Die Arme werden nicht abgebremst und rotieren um das Schultergelenk nach vorne und werden ausgestreckt. Zwischen 40 ms und 45 ms blockiert der Beckengurt die Bewegung des unteren Torsobereichs, was zur Rotation des Oberkörpers und Hals bewirkt. Die maximale Insassenvorverlagerung fällt ungefähr auf den Zeitpunkt um 75 ms. Am Kopf des Insassen hat die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Oberkörper und dem Kopf zur Folge, dass sich der Kopf um den Oberkörper bzw. das Genick rotiert. Der Kopf erreicht dabei den Anschlag des vordefinierten Genickgelenks bis zum Zeitpunkt 90 ms. Die Beine bewegen sich durch den Aufprall an der I-Tafel rückläufig und führen zur Anstellung der Beine in Richtung des Oberkörpers bis zum Zeitpunkt 105 ms (vgl. Abbildung 6-20).

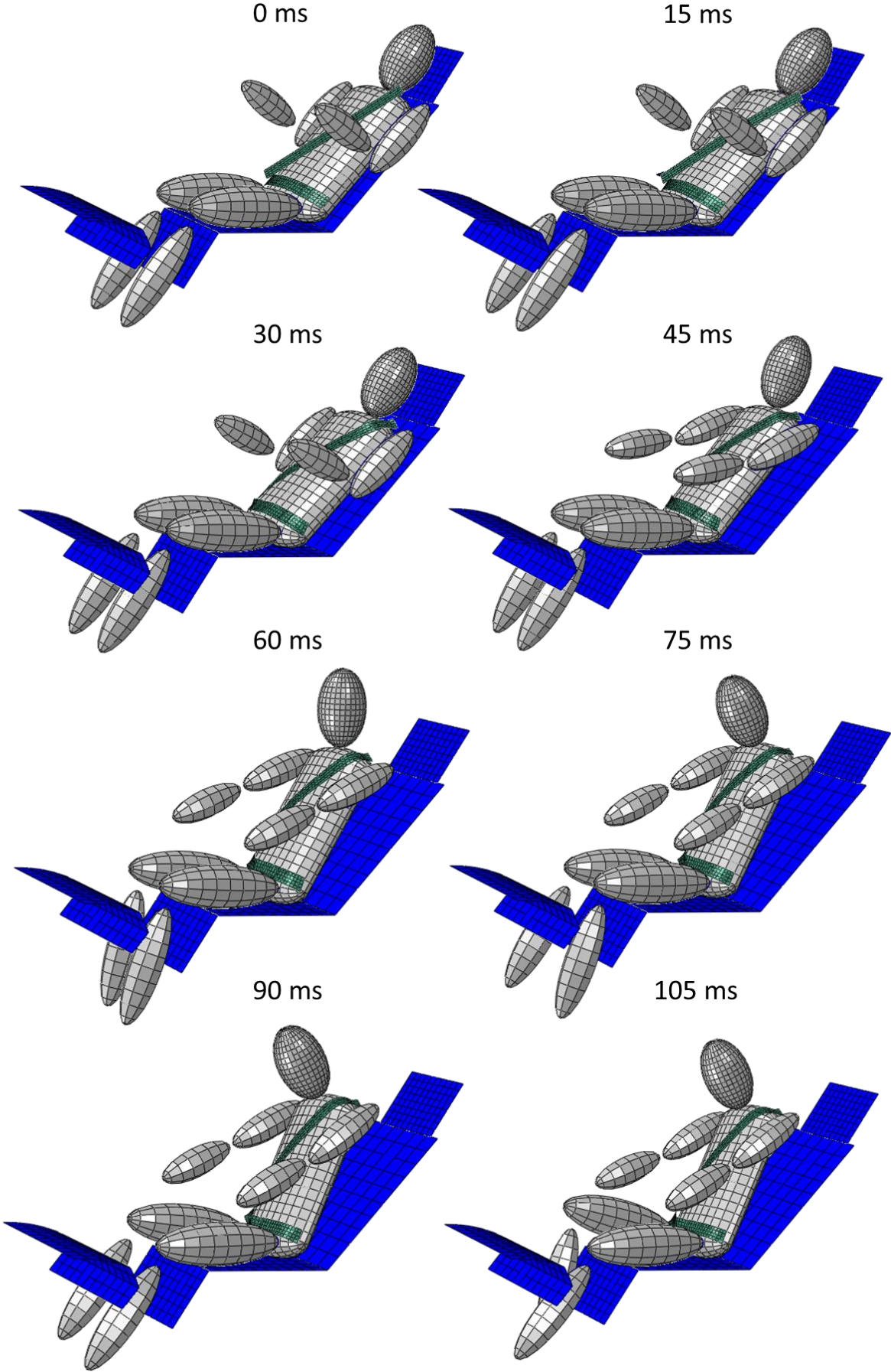


Abbildung 6-20: Bewegungsablauf der Ausgangssimulationen

Bei der Ausgangslage wird die resultierende Geschwindigkeit des Fahrzeuges, Oberkörpers und Kopfes im Diagramm dargestellt. Die Kurve für die Fahrzeuggeschwindigkeit dient dem Vergleich der beiden anderen Kurven, da die Geschwindigkeit des Fahrzeuges als Randbedingung vorgegeben wird. Aus der Kurve für die Geschwindigkeit des Oberkörpers ist der Zeitpunkt bei 17 ms zu erkennen, ab dem das Rückhaltesystem anfängt zu wirken. Die Geschwindigkeit sinkt ab 20ms annähernd parallel zur Fahrzeuggeschwindigkeit. Zum Zeitpunkt des Stillstandes des Fahrzeuges bei ca. 40 ms hat der Oberkörper eine Restgeschwindigkeit von ca. 18 km/h und der Kopf von 32 km/h. Außerdem ist die Abbremsung des Kopfes ab dem Zeitpunkt 40 ms nur noch gering, was dazu führt, dass die Differenzgeschwindigkeit zwischen Oberkörper und Kopf ansteigt und ein Maximum von ca. 24 km/h zum Zeitpunkt 75 ms erreicht. 3 ms Millisekunden später fällt die Geschwindigkeit von 27 km/h innerhalb auf 7 km/h ab. Wichtig ist zu erwähnen, dass durch die Betrachtung der resultierenden Geschwindigkeiten, des Oberkörpers und des Kopfs, nicht null erreichen können. Daher wird angenommen, dass ab einer geringen Geschwindigkeitsänderung die Wirkungen des Crashes auf den Insassen vorbei ist. Damit wäre der Crash nach ca. 90 ms vorbei (vgl. Abbildung 6-21).

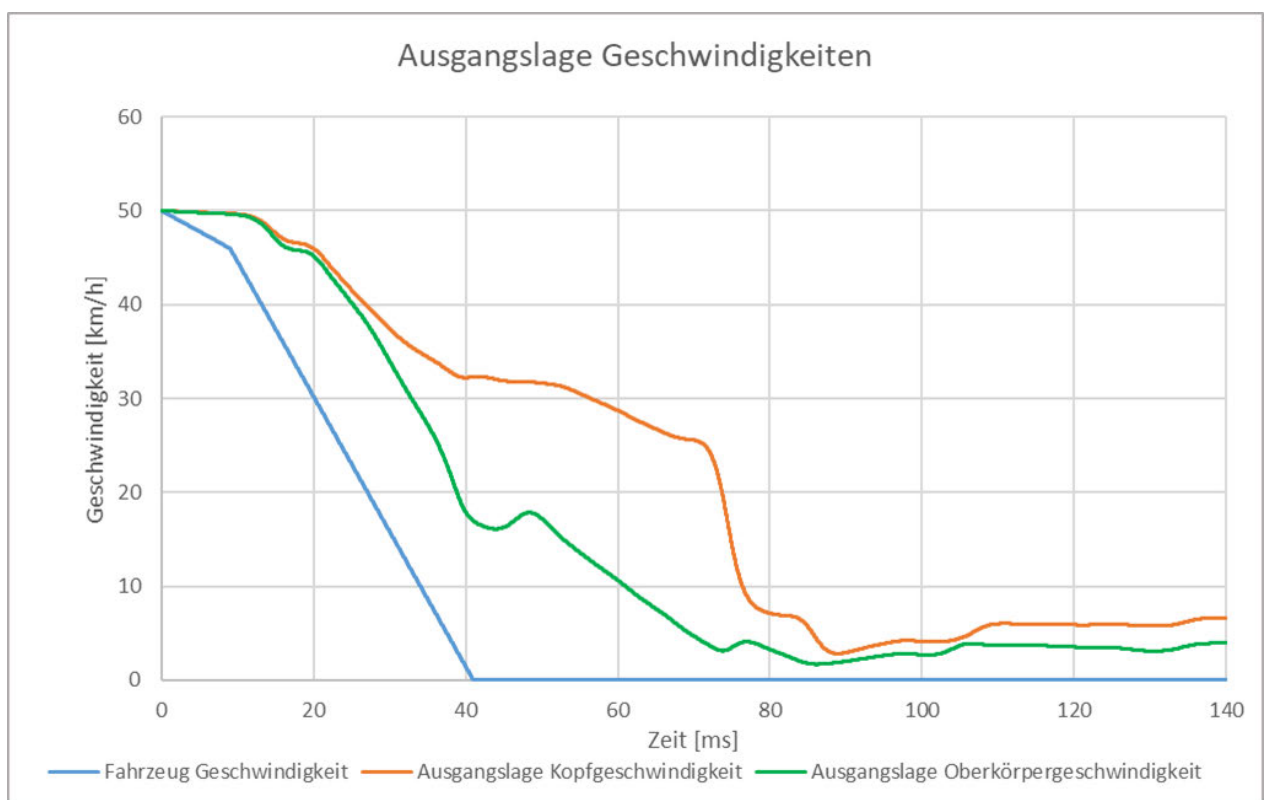


Abbildung 6-21: Geschwindigkeitsverlauf der Ausgangslage

Die gefilterten Beschleunigungswerte des Kopfes werden im Diagramm der Abbildung 6-22 dargestellt. In dem Bereich sind die beiden Peaks zum Zeitpunkt 39 ms mit 95 g und 75 ms mit 132 g auffällig. Diese stehen im Zusammenhang mit dem Knick der Geschwindigkeitskurve zu den gleichen Zeitpunkten. Der erste Peak entsteht dabei durch das Auffangen des unteren Torsobereichs mittels des Beckengurtes. Der zweite Peak hingegen durch das Erreichen des Genickanschlages des Konnektors (vgl. Abbildung 6-22).

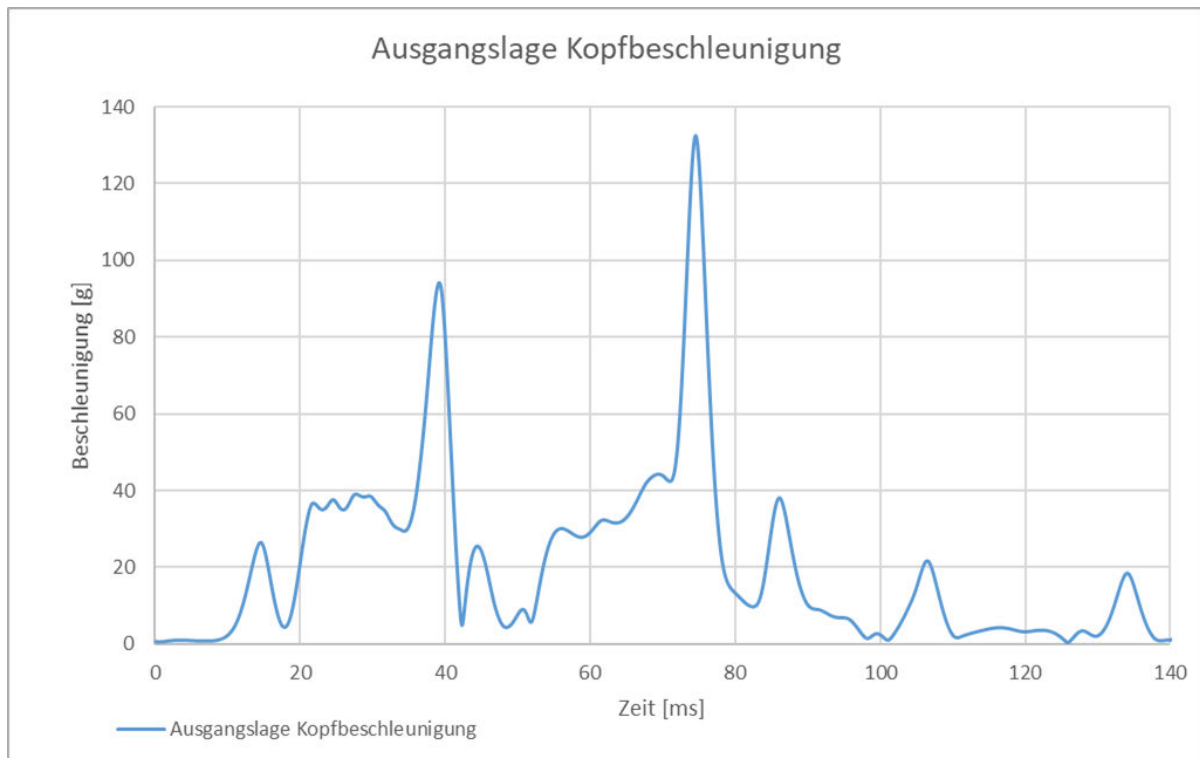


Abbildung 6-22: Kopfbeschleunigungsverlauf der Ausgangslage

Zusätzlich zu der Kurve der Kopfbeschleunigung werden der Hic_{36} und HIC_{15} für die Ausgangslage berechnet. Dabei ergibt sich für den HIC_{36} ein Wert von 316 und liegt im zeitlichen Bereich von 53-89 ms. Der HIC_{15} Wert liegt bei 372 im Zeitabschnitt von 62-77 ms (vgl. Tabelle 6-3). Die Aussagekraft über ein Überleben des Insassen ist bei den Werten dabei nur eingeschränkt möglich. Vielmehr dienen die Werte dem Vergleich mit den Varianten.

Tabelle 6-3: HIC-Werte der Ausgangslage

	Wert [-]	t1 [s]	t2 [s]
Hic36	316	0,053	0,089
Hic15	372	0,0626	0,0776

Die gefilterten Beschleunigungswerte des Oberkörpers werden im Diagramm der Abbildung 6-23 dargestellt. In dem Bereich ist der Peak zum Zeitpunkt 39 ms mit 115 g auffällig. Diese stehen im Zusammenhang mit dem Peak des Kopfes und dem Knick der Geschwindigkeitskurve zu dem gleichen Zeitpunkt. Der Peak entsteht dabei durch das Auffangen des unteren Torsobereichs mittels des Beckengurtes.

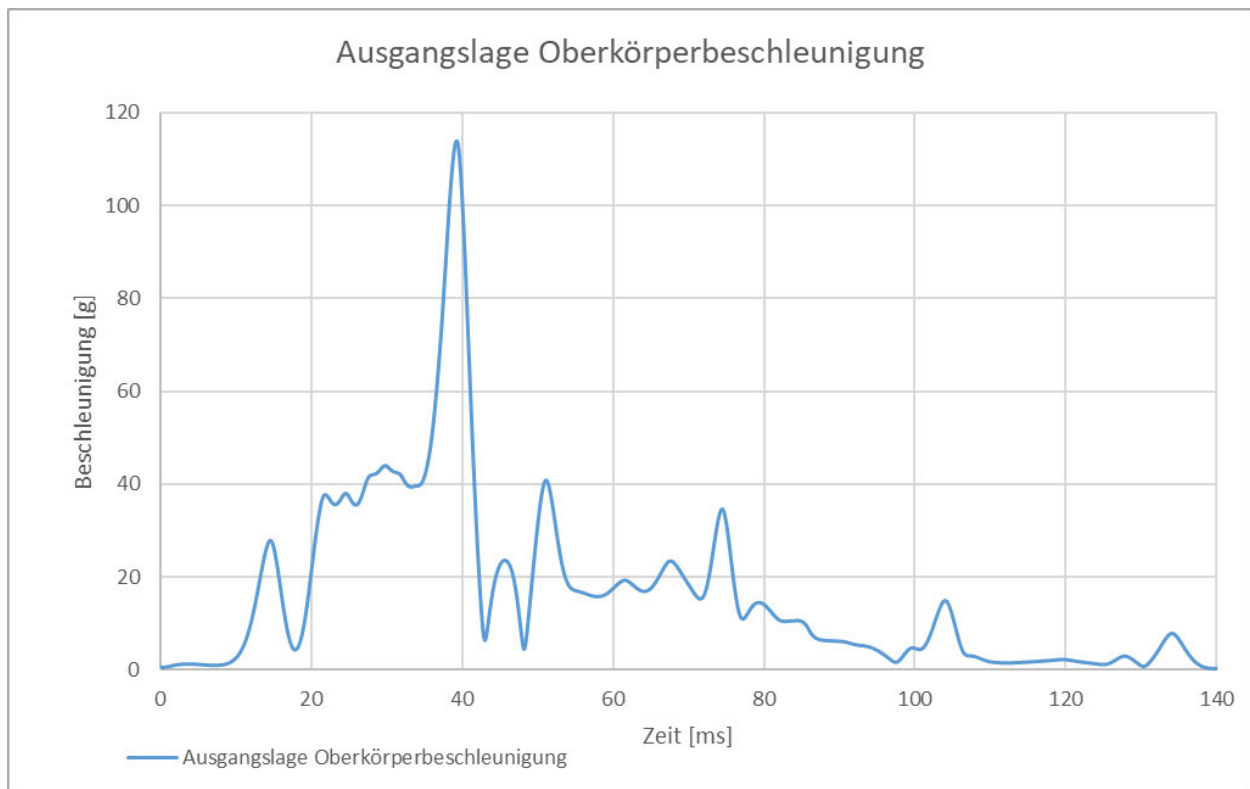


Abbildung 6-23: Brustbeschleunungsverlauf der Ausgangslage

Für die Brustbeschleunigung wurde ähnlich zum Verfahren vom Hic ein Wert berechnet, der als Vergleichswert dient. Es wird ein TIC_{36} von 339 im Zeitabschnitt von 19-55 ms und ein TIC_{15} von 373 im Zeitraum 26-41 ms berechnet (vgl. Tabelle 6-4).

Tabelle 6-4: TIC-Wert der Ausgangslage

	Wert [-]	t1 [s]	t2 [s]
Tic36	339	0,019	0,055
Tic15	373	0,026	0,041

Bei der wirkenden Kraft entlang der Wirbelsäule im Bereich des Genicks ist eine Wechselkraft zu erkennen, wobei ein negativer Wert eine Stauchung der Wirbelsäule bedeutet. Der Spitzenwert für die Stauchung liegt dabei bei 100000 kN zum Zeitpunkt 18 ms. Die

maximale Zugkraft liegt bei 200 kN zum Zeitpunkt 23 ms. Bei den Wertegrößen der Genickkraft ist festzustellen, dass diese viel größer sind als die Festgesetzten Belastungsgrenzen. Daher dienen die Werte nur dem Vergleich mit anderen Varianten des Modells (vgl. Abbildung 6-24).

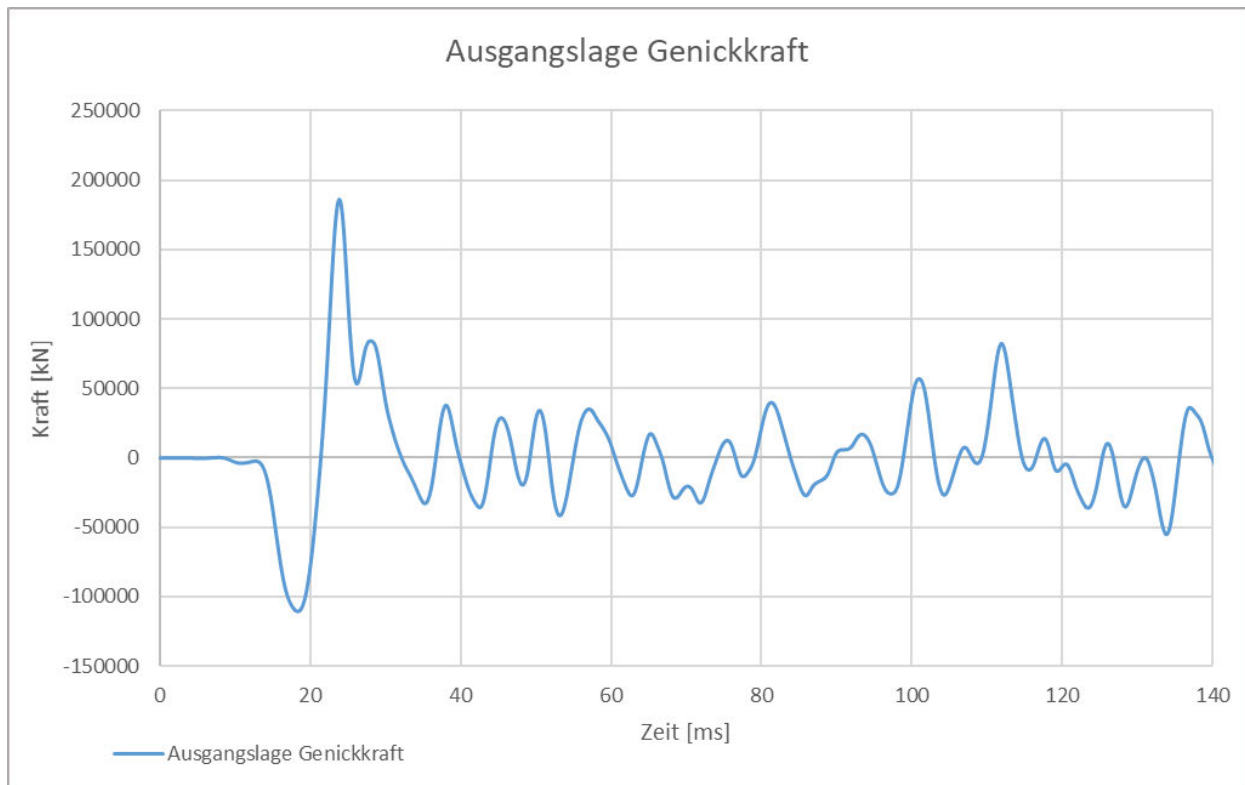


Abbildung 6-24: Genickkraft der Ausgangslage

Das Moment am Genick ist während des Crashes null, erst ab 75 ms wird ein Moment gemessen. Der Kraftpeak liegt dabei bei 16 kNm zum Zeitpunkt 90 ms. Der Anstieg des Moments bewirkt den zweiten Beschleunigungspeak des Kopfes zum Zeitpunkt 79 ms (vgl. Abbildung 6-25).

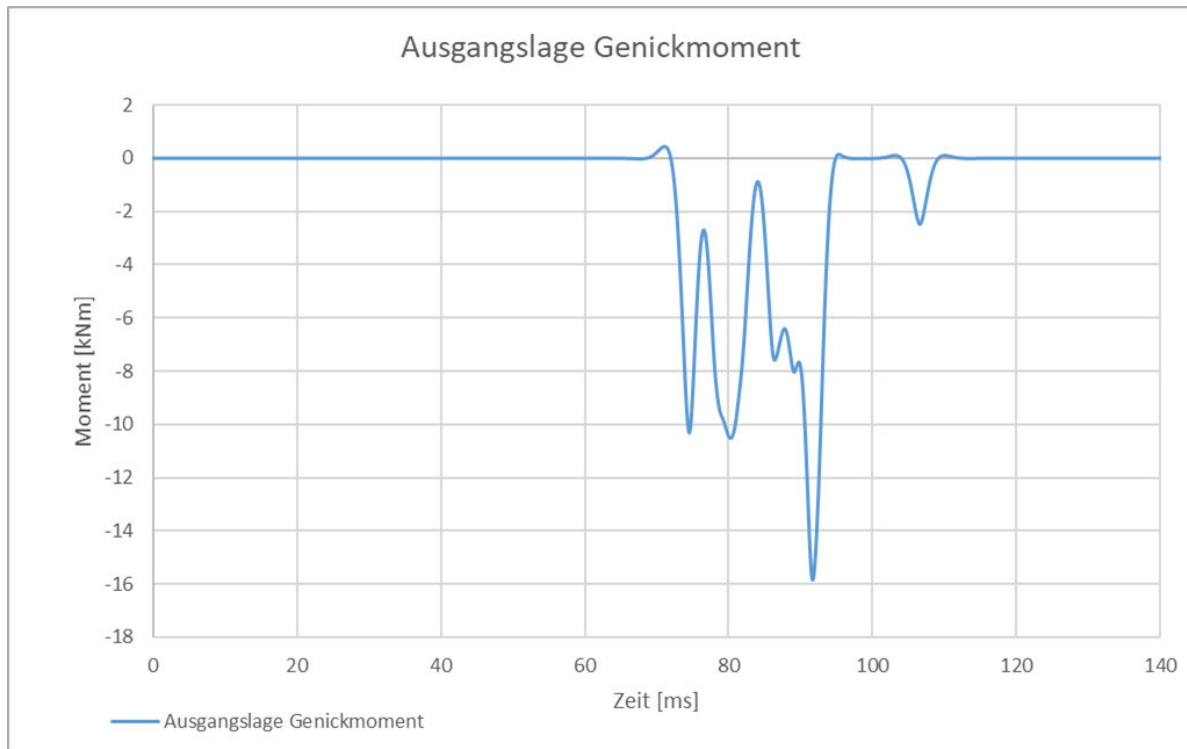


Abbildung 6-25: Genickmoment der Ausgangslage

Der Gurt rollt während des Crashes in der Ausgangslage um ein Maximum von 170 mm zum Zeitpunkt 75 ms aus (vgl. Abbildung 6-26).

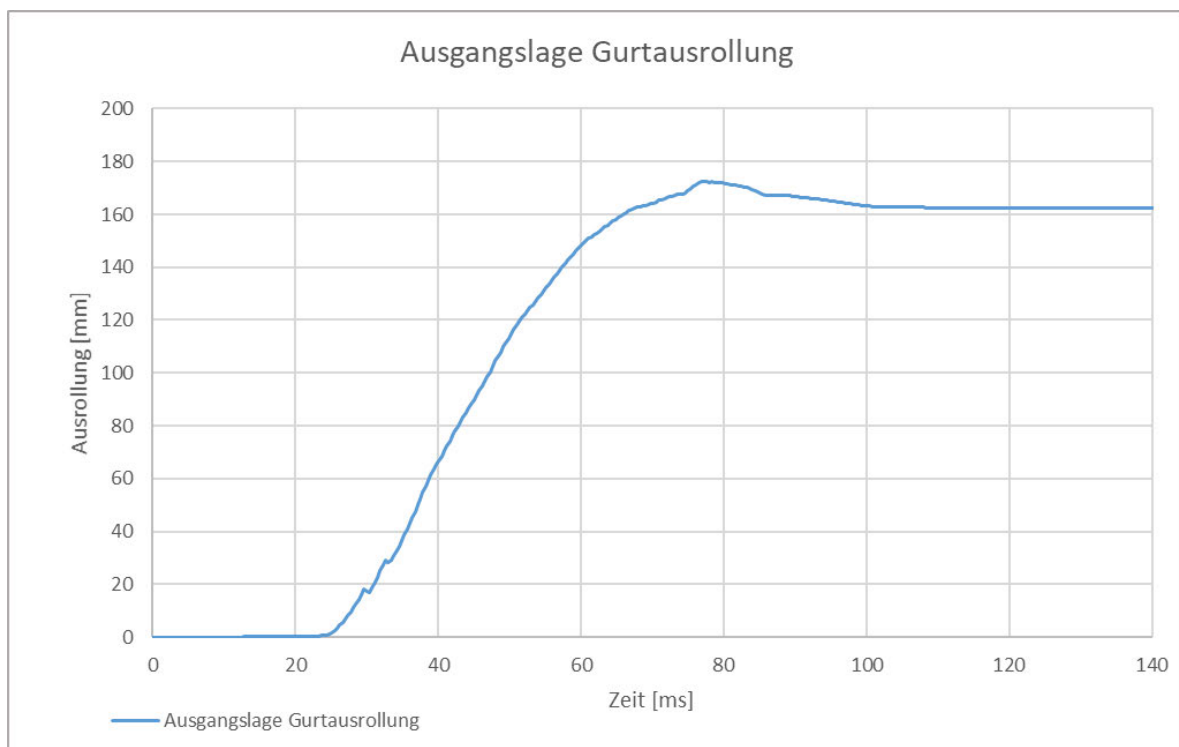


Abbildung 6-26: Ausgangslage Gurt Ausrollung

Zusätzlich wird die Insassenkinematik während der Simulation untersucht. In der Abbildung 6-27 wird die maximale Insassenvorverlagerung im -305-Y Schnitt des HCC21 dargestellt. Bei Betrachtung des Vergleichs erkennt man, dass in der Ausgangslage der Oberkörper nicht die Position des Arbeitsmodus erreicht.

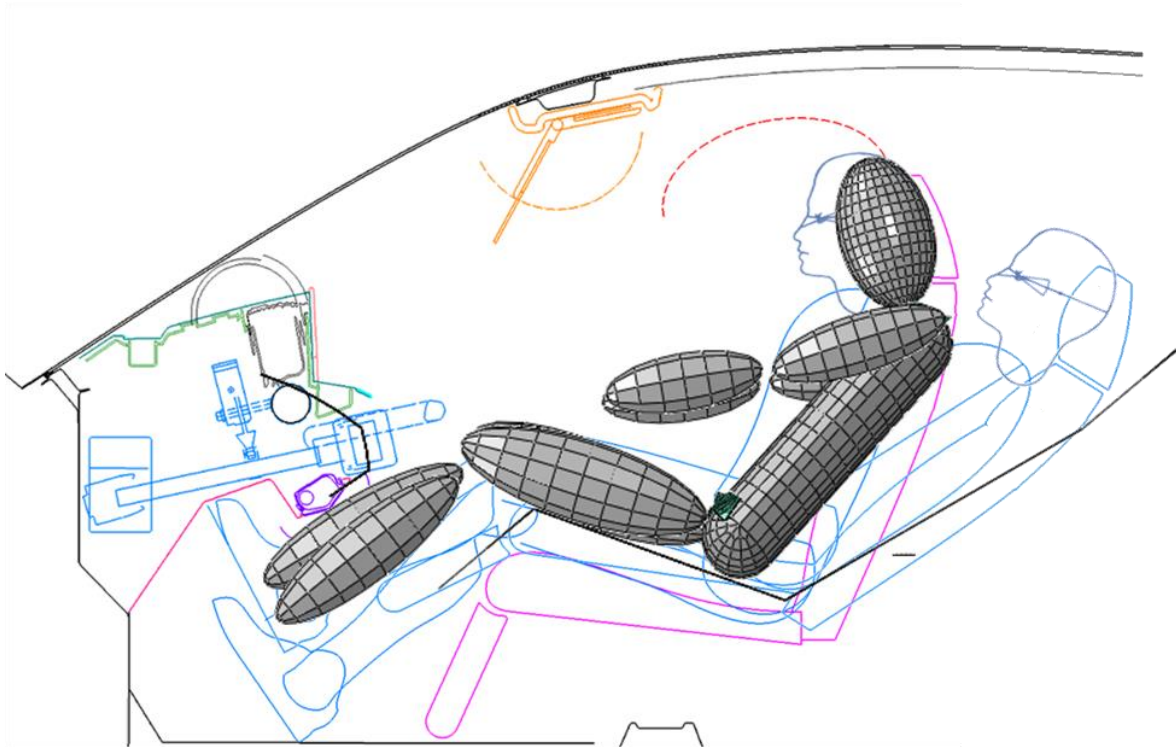


Abbildung 6-27: Maximale Insassenvorverlagerung des Insassen in der Simulation der Ausgangslage positioniert im -350-Y Schnitt des HCC21

Die Relativbewegung in der xz-Ebene des Oberkörpers zum Fahrzeug wird im Diagramm in der Abbildung 6-28 gezeigt. Anfänglich bewegt der Insasse sich nur in x-Richtung. Damit lässt sich erklären, dass sich der Insasse zu Beginn des Crashes nur translatorisch bewegt. Erst wenn die Rotation des Oberkörpers einsetzt, ist auch eine Bewegung in z-Richtung zu erkennen. Die maximale Vorverlagerung des Oberkörpers liegt bei 163 mm in x-Richtung und 145 mm in z-Richtung. Wird diese erreicht fällt der Körper durch die Schwerkraft und Elastizität zurück. Dies ist im Verlauf durch eine rückläufige Kurve zu erkennen.

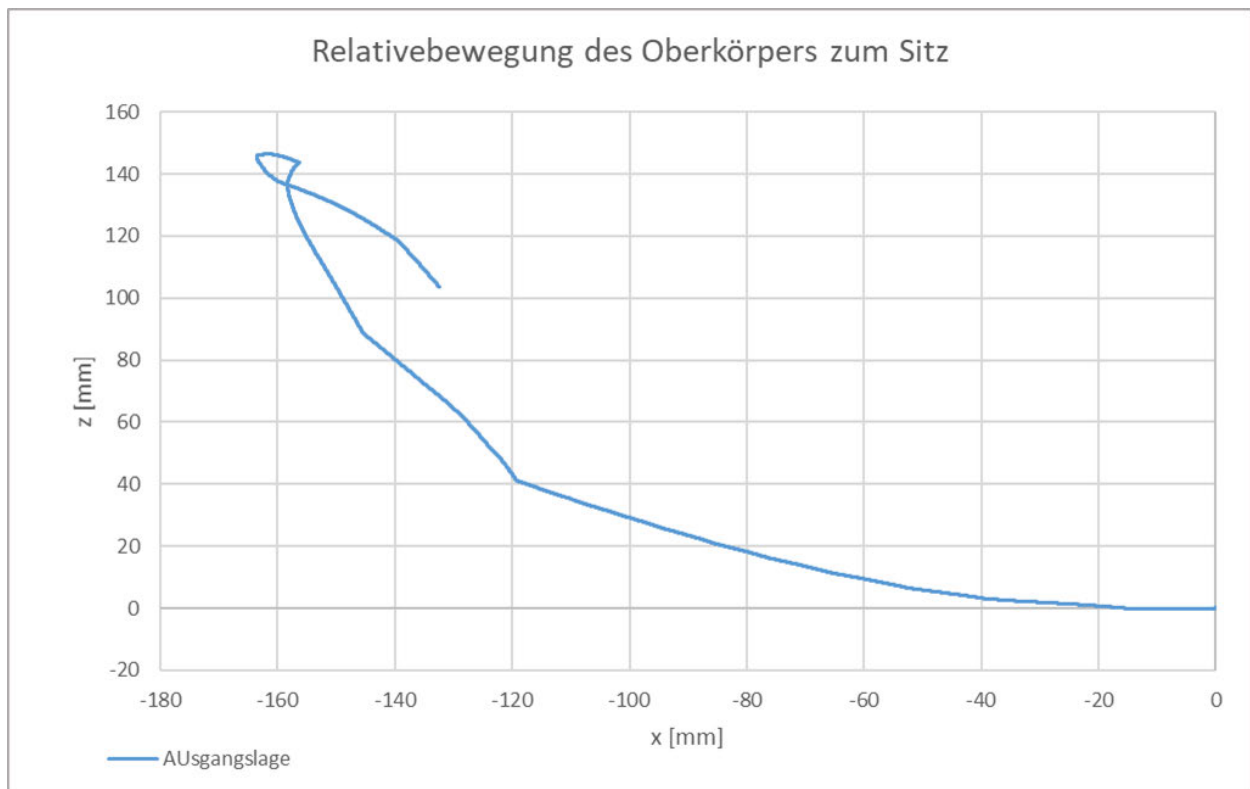


Abbildung 6-28: Räumliche Bewegung des Oberkörpers

6.4 Variantenaufbau

Zur Verbesserung wurde das Ausgangsmodell um verschiedene Maßnahmen ergänzt. In dieser Arbeit wurde die Maßnahme einer passiven Rückenlehne und aktiven Rückenlehne mit Precrash-Funktion untersucht. Für die Modellierung der Passiven Rückenlehne wurde die Rotation dieser im Abaqusmodell ermöglicht. Über die Konnektoreigenschaft wird die Bewegung ab einem bestimmten Winkel gesperrt. Bei der aktiven Rückenlehne wirkt eine anfängliche Winkelgeschwindigkeit auf die Rückenlehne für eine Zeit von 100 ms. In dieser Zeit wird das Fahrzeug nicht abgebremst und bewegt sich mit konstanten 50 km/h.

- Variante 1: Passive Rückenlehne mit Lock bei 10° Rückenlehnenwinkel
- Variante 2: Passive Rückenlehne mit Lock bei 20° Rückenlehnenwinkel
- Variante 3: Passive Rückenlehne mit Lock bei 30° Rückenlehnenwinkel
- Variante 4: Aktive Rückenlehne mit Precrash und konstante Winkelgeschwindigkeit von 10 km/h für 100 ms

- **Variante 5:** Aktive Rückenlehne mit Precrash und konstante Winkelgeschwindigkeit von 5 km/h ms für 100 ms
- **Variante 6:** Aktive Rückenlehne mit Precrash und abfallende Winkelgeschwindigkeit von 5 km/h ms für 100 ms

6.5 Ergebnisdarstellung der Varianten

Die ermittelten Ausgangswerte werden mit den Werten der Varianten verglichen, Ziel ist es, die Sicherheit in der Liegeposition zu verbessern. Zu erwähnen ist, dass die Verläufe der passiven Rückenlehne der Ausgangslage gleichen. Die Verläufe der aktiven Rückenlehne unterscheiden sich, insbesondere da die Maßnahmen vorm Crash wirken. Zum Verständnis werden die Diagramme der Variante 5 als Vergleichsverlauf für die aktive Rückenlehne im Anhang hinterlegt.

Vergleich der Kopfgeschwindigkeit

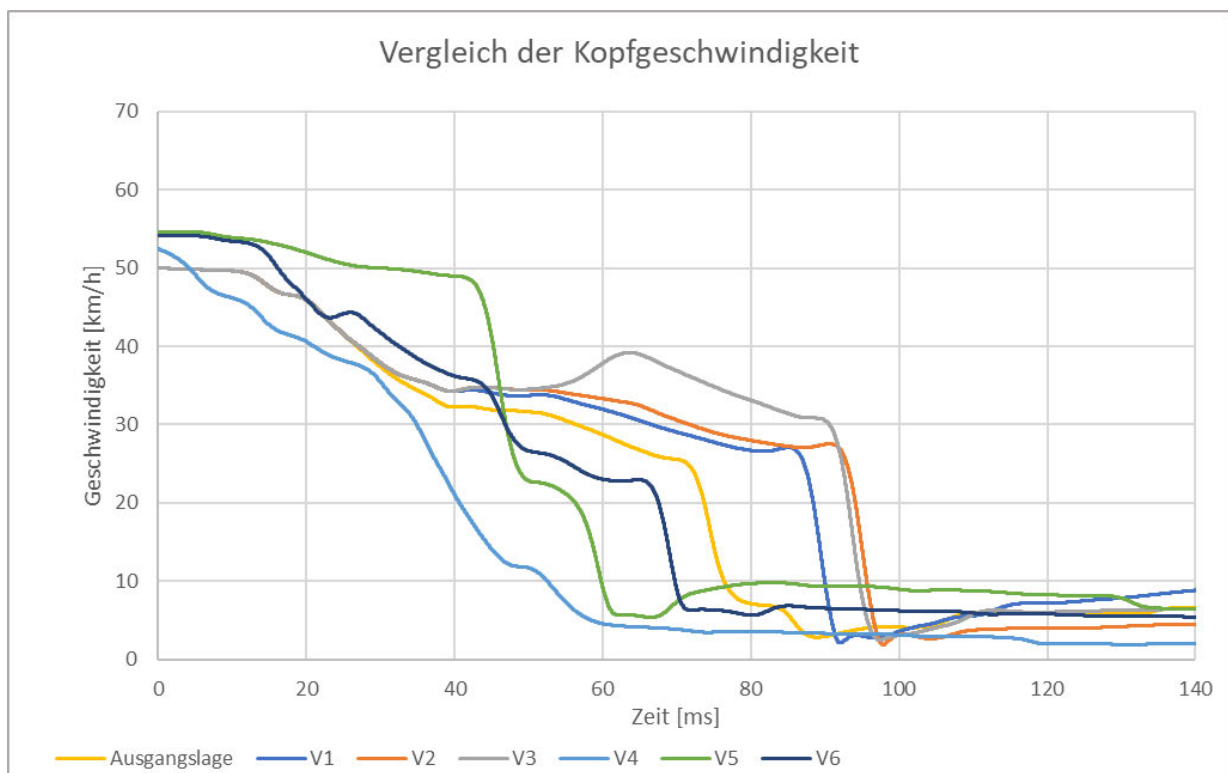


Abbildung 6-29: Vergleich der Kopfgeschwindigkeit

Der Vergleich der Kopfgeschwindigkeiten mit den Varianten zeigt verschiedene Tendenzen. Die Varianten 1-3, die die passive Rückenlehne simulieren, zeigt, dass der Zeitpunkt, ab dem der Kopf stark abgebremst wird, ein zeitliches Delta zur Ausgangslage zwischen

20-25 ms hat. Die Restgeschwindigkeit zu dem Zeitpunkt ist dabei ähnlich der Ausgangslage. Zusätzlich zeigt die Variante 3 bei 60 ms einen Anstieg der Geschwindigkeit von 35 km/h auf 40 km/h. Die Varianten 4-6 mit aktiver Rückenlehne und Precrash zeigen sich beim Insassen eine höhere Kopfgeschwindigkeit zu Beginn des Crashes. Diese liegt dabei bei ca. 54 km/h. Alle aktiven Rückenlehnen Varianten erreichen den Stillstand vor der Ausgangslage. Dabei verlaufen die Kurven unterschiedlich. Der Verlauf der Variante 4 sinkt dabei kontinuierlich ab. Dahingegen die Variante 5 zwei Stufen in der Kurve zeigt (vgl. Abbildung 6-29).

Vergleich der Brustgeschwindigkeit

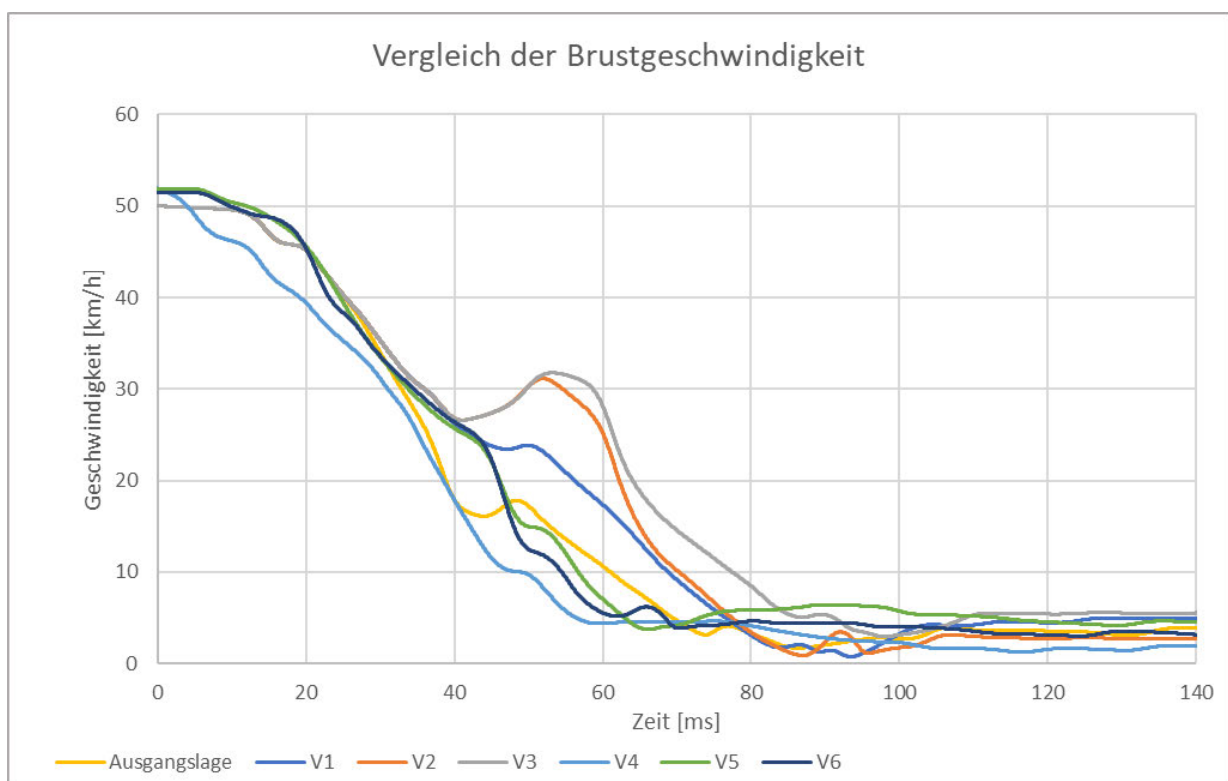


Abbildung 6-30: Vergleich der Brustgeschwindigkeit

Die Brustgeschwindigkeit der Variante 1 sinkt im Vergleich zur Ausgangslage langsamer. Zusätzlich fällt der Geschwindigkeitsanstieg durch die Arme mit ca. 2 km/h niedriger aus. Auch die Varianten 2 und 3 kommen erst zu einem späteren Zeitpunkt des Crashes zu Geschwindigkeiten von 5 km/h. Jedoch ist der Anstieg um die 40 ms mit 6 km/h höher. Die Varianten mit der aktiven Rückenlehne beginnen den Crash mit einer Brustgeschwindigkeit von 52 km/h. Bei der Variante 4 sinkt die Brustgeschwindigkeit gleichzeitig mit dem Crashbeginn. Über den zeitlichen Verlauf fallen keine Sprünge mit einem Geschwindigkeitsanstieg auf. Die Varianten 5 und 6 zeigen zum Zeitpunkt 45 ms einen Abfall der

Geschwindigkeit von über 12 km/h in 5 ms. Die Varianten folgen bis 30 ms dem Verlauf der Ausgangslage (vgl. Abbildung 6-30).

Vergleich der Kopfbeschleunigung

Tabelle 6-5: Vergleich der Kopfbeschleunigung

Vergleich der Kopfbeschleunigung		
Variante	Beschleunigung [g]	Zeitpunkt [ms]
Ausgangslage	132,52	74,5
V1	183,17	89,4
V2	186,64	95,0
V3	202,87	93,7
V4	76,17	35,4
V5	176,97	46,0
V6	162,21	69,3

Die Maximalwerte der Kopfbeschleunigung liegen bei allen Varianten, bis auf Variante 4, höher, als bei der Ausgangslage mit 132 g und liegen bei den Varianten zwischen 162 und 202 g. Der Zeitpunkt des Maximalwertes verschiebt sich dabei bei den Varianten mit der passiven Rückenlehne um 15-21 ms nach hinten. Die Varianten 4-6 erreichen das Maximum dahingegen früher, wobei bei der Variante 4 der früheste Zeitpunkt, mit 35 ms, ist (vgl. Tabelle 6-5).

Vergleich der HIC-Werte

Tabelle 6-6: Vergleich des HIC₁₅-Wertes

HIC15 Vergleich			
Varianten	Wert [-]	t1 [s]	t2 [s]
Ausgangslage	372	0,0626	0,0776
V1	661	0,078	0,093
V2	695	0,084	0,099
V3	932	0,083	0,098
V4	240	0,032	0,047
V5	536	0,043	0,058
V6	482	0,058	0,073

Tabelle 6-7: Vergleich des HIC₃₆-Wertes

HIC36 Vergleich			
Varianten	Wert [-]	t1 [s]	t2 [s]
Ausgangslage	316	0,053	0,089
V1	518	0,058	0,094
V2	676	0,065	0,101
V3	847	0,065	0,101
V4	255	0,025	0,061
V5	766	0,038	0,074
V6	450	0,04	0,076

Die untersuchten Maßnahmen zeigen im Vergleich des HIC-Wertes eine Verschlechterung. Einzig die Variante 4 führt zu einer Verbesserung in der Liegeposition. Bei den Varianten der passiven Rückenlehne erhöht sich der Wert um über 75% beim HIC₁₅ und 60% beim HIC₃₆. Bei den Varianten der aktiven Rückenlehne liegt die Erhöhung des Wertes bei mindestens 30% beim HIC₁₅ und 42% beim HIC₃₆. Zusätzlich ist festzustellen, dass im zeitlichen Bereichsintervall der maximal Wert der Kopfbeschleunigung liegt (vgl. Tabelle 6-7 und Tabelle 6-8).

Vergleich der Brustbeschleunigung

Tabelle 6-8: Vergleich der Brustbeschleunigung

Vergleich der Brustbeschleunigung		
Variante	Beschleunigung [g]	Zeitpunkt [ms]
Ausgangslage	113,87	39,3
V1	94,92	39,3
V2	93,69	39,3
V3	93,69	39,3
V4	74,75	35,1
V5	73,89	46,7
V6	78,01	46,8

Die Brustgeschwindigkeit der Ausgangslage liegt bei einem maximalen Wert von 113 g zum Zeitpunkt 39 ms. Alle untersuchten Maßnahmen verringern den Maximalwert der Brustgeschwindigkeit. Die Werte bei der passiven Rückenlehne liegen in einem Bereich um 93-94 g und bei aktiver Rückenlehne um 73-78 g. Der Zeitpunkt der passiven Rückenlehne ändert sich dabei zur Ausgangslage nicht. Bei der aktiven Rückenlehne wird

das Maximum bei der Variante 4 zum Zeitpunkt 35 ms gemessen und bei Variante 5 und 6 zum Zeitpunkt 46 ms (vgl. Tabelle 6-8).

Vergleich der TIC-Werte

Tabelle 6-9: Vergleich des TIC₁₅-Wertes

TIC15 Vergleich			
Varianten	Wert [-]	t1 [s]	t2 [s]
Ausgangslage	373	0,026	0,041
V1	289	0,027	0,042
V2	283	0,027	0,042
V3	283	0,027	0,042
V4	218	0,031	0,046
V5	146	0,019	0,034
V6	149	0,018	0,033

Tabelle 6-10: Vergleich des TIC₃₆-Wertes

TIC36 Vergleich			
Varianten	Wert [-]	t1 [s]	t2 [s]
Ausgangslage	339	0,019	0,055
V1	275	0,02	0,056
V2	323	0,03	0,066
V3	307	0,029	0,065
V4	253	0,013	0,049
V5	249	0,016	0,052
V6	276	0,017	0,053

Die untersuchten Maßnahmen zeigen im Vergleich des TIC-Wertes eine Verbesserung. Die besten Ergebnisse zeigt die Variante 1 mit ca. 20% und Variante 5 mit mindestens 27%. Besonders Auffällig ist dabei die Verbesserung der Variante 5 und 6 beim TIC₁₅ von bis zu 60%. Damit wird die Kraft auf den Oberkörper besser über die Crashdauer verteilt (vgl. Tabelle 6-9 und Tabelle 6-10).

Vergleich der Genickkraft

Tabelle 6-11: Vergleich der Genickkraft

Vergleich der Genickkraft				
Variante	Kraft max [kN]	Zeitpunkt [ms]	Kraft min [kN]	Zeitpunkt [ms]
Ausgangslage	186104,56	23,86	-110658,82	18,34
V1	94034,96	29,11	-106693,86	18,39
V2	94038,87	29,11	-106693,86	18,39
V3	94038,87	29,11	-106693,86	18,39
V4	480910,30	-55,43	-77111,66	-79,42
V5	207025,73	-16,81	-135901,34	-75,36
V6	158909,18	-22,25	-140078,54	-43,79

Bei den Varianten mit Passiver Rückenlehne ist bei der Betrachtung der maximalen Druckkräfte keine Änderung der Werte sowie der Zeitpunkte zu erkennen. Dahingegen verringert sich die Zugkräfte um ca. 48%. Bei den Varianten mit aktiver Rückenlehne treten die größten Kräfte vorm Crash auf. Außerdem sind die Werte im Vergleich zur Ausgangslage teilweise höher (vgl. Tabelle 6-11). Bei der Maßnahme unterscheidet sich der Verlauf der Genick Kraft durch die Anstellung der Lehne und den zusätzlichen Impuls durch die Anstellung. Aus dem Diagramm ist zu erkennen das die Druckkraft nach dem Crash um 50% niedriger ist (vgl. Abbildung 6-31).

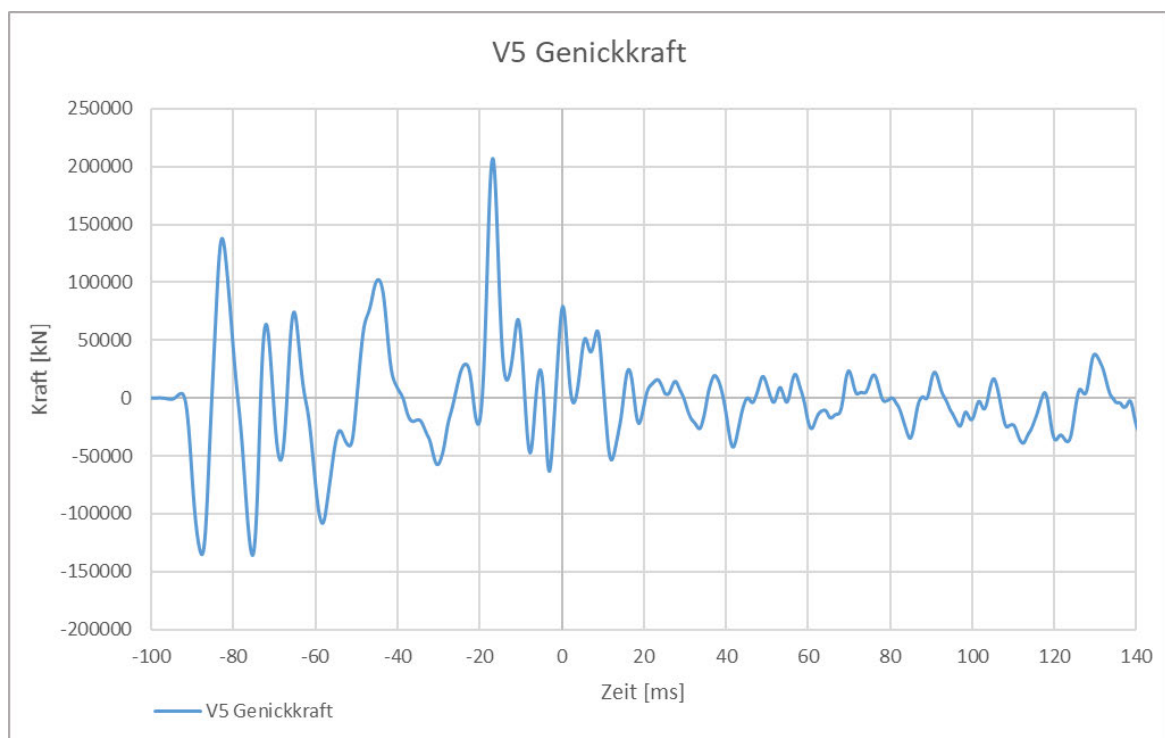


Abbildung 6-31: Variante 5 Genick Kraft

Vergleich des Genickmomentes

Tabelle 6-12: Vergleich des Genickmomentes

Vergleich des Genickmomentes		
Variante	Moment [kNm]	Zeitpunkt [s]
Ausgangslage	-15,85	91,6
V1	-4,89	90,6
V2	-22,98	97,1
V3	-42,81	93,7
V4	0	0
V5	-21,79	59,6
V6	-17,95	69,2

In der Ausgangslage wird ein Genickmoment von 15,8 kNm erreicht, bei den Maßnahmen liegt das Moment bei Variante 1 bei 4,8 kNm und bei Variante 4 bei 0 kNm und damit niedriger. Bei den anderen Varianten wird das Genickmoment erhöht. Das Maximum wird dabei bei der Variante 3 mit 42,8 kNm erreicht. Durch die Insassenkinematik wird die Restenergie des Kopfes besser absorbiert. Bis auf die Ausgangslage ist auch ein Wertezusammenhang des Momentes mit der maximalen Beschleunigung festzustellen (vgl. Tabelle 6-12).

Vergleich der Gurtausrollung

Tabelle 6-13: Vergleich der Gurtausrollung

Vergleich der Gurtausrollung		
Variante	Weg [mm]	Zeitpunkt [ms]
Ausgangslage	172,31	77,2
V1	187,83	85,8
V2	150,52	82,8
V3	96,37	97,1
V4	201,52	59,3
V5	234,14	67,5
V6	235,4	61,8

Der Gurt rollt in der Ausgangslage um 172 mm maximal aus. Die Variante 1 rollt um 187 mm aus. Die beiden anderen Varianten mit passiver Rückenlehne liegen unter der Ausgangslage bei 150 mm und 96 mm. Bei der aktiven Rückenlehne rollt der Gurt bei jeder Variante mehr aus und liegt bei Variante 4 bei 201 mm und bei Variante 5 und 6 bei ca. 235 mm. Bei zu hohen Rotationsfreiheiten der Rückenlehne kann Torso seitlich aus dem

Gurtsystem rutschen. Insbesondere bei der Variante 3 ist dieser Effekt entstanden, womit die geringe Gurtausrollung erklärt werden kann (vgl. Tabelle 6-13).

Vergleich der Insassenbewegung in XZ-Ebene

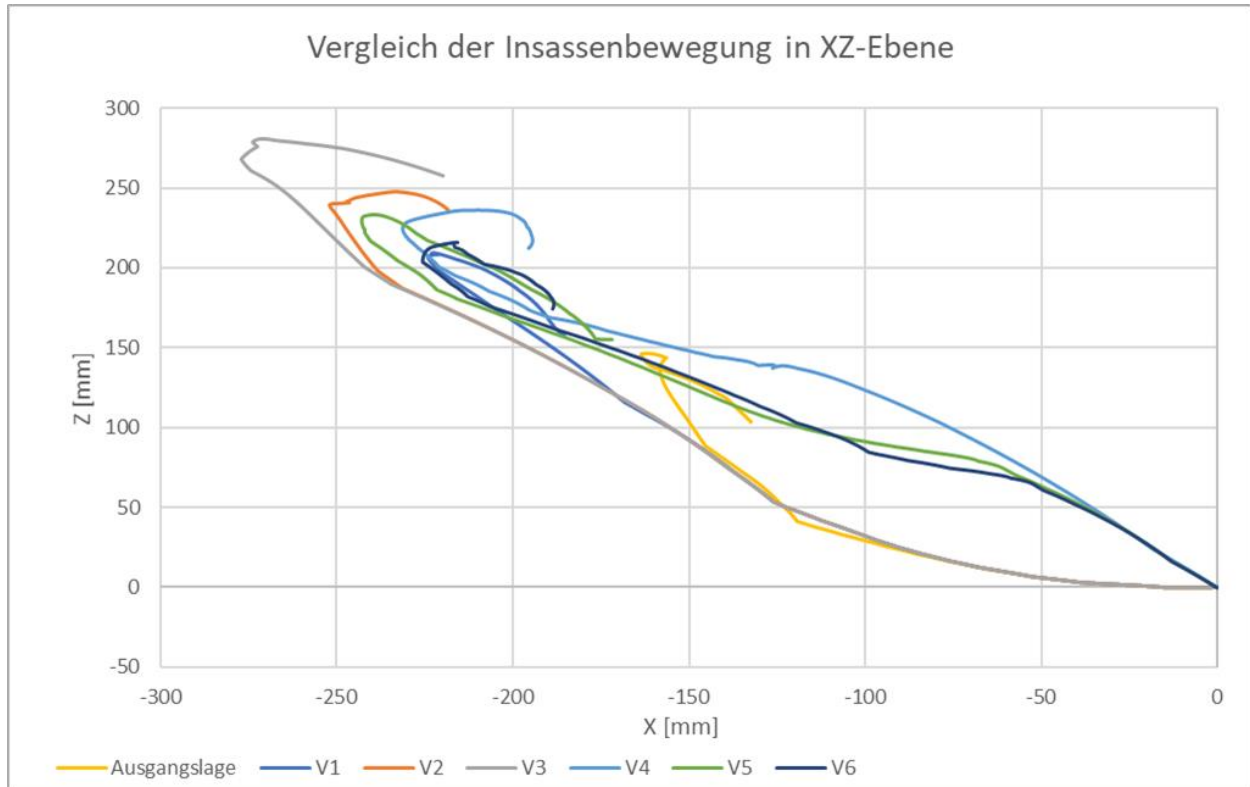


Abbildung 6-32: Insassenbewegung in XZ-Ebene

Der Vergleich der Insassenbewegung in XZ-Ebene zeigt deutlich, dass die untersuchten Maßnahmen dazu führen, dass die Bewegung des Insassen über einen längeren Weg ermöglicht wird. Dabei wird der Insasse mit den Maßnahmen um 70 bis 110 mm in X-Richtung und 60 bis 120 mm in Z-Richtung mehr bewegt. Zusätzlich unterscheidet sich die aktive Rückenlehne in der Kinematik des Oberkörpers zur Ausgangslage. Durch die Anstellung der Sitzlehne wird der Oberkörper früher zur Rotation gebracht, was dadurch erkennbar wird, dass der Verlauf von der Nulllage linear ansteigt. Bei der Ausgangslage und der Variante mit passiver Rückenlehne hingegen, bewegt sich der Körper anfänglich nur in X-Richtung, bevor nach 50 mm der Oberkörper auch eine Bewegung in Z-Richtung durchführt (vgl. Abbildung 6-32: Insassenbewegung in XZ-Ebene).

6.6 Fehlerquellen und Ungenauigkeiten der gemessenen Daten

Die wohl einflussreichste Fehlerquelle in dieser Simulation drückt sich durch die Modellierung des Dummymodells aus. Wie bereits in der Modellierung aufgezeigt wurde der Dummy durch starr Körper modelliert, wie auch das restliche Simulationsmodell. Einzig das Gurtsystem wurde für die Berechnung als Schalenelement neu modelliert. Für die Auswertung der Simulation führt das dazu, dass ein starrer Aufprall abgebildet wird. Was bedeutet, dass die Aufprallenergie gleich der Abprallenergie ist. Insbesondere die Beine prallen immer wieder zwischen der I-Tafel und der Beinlehne ab, ohne Energie abzubauen. In Realität würde der Sitz insbesondere die Sitzfläche einen Teil der Energie aufnehmen. Die großen Impulse durch die aktiven Rückenlehnen würden in den Kopfbeschleunigungen geringer ausfallen. Weitere Probleme durch die starre Modellierung entstehen bei der Auswertungsmöglichkeit der Körperregionen. Es lassen sich keine Aussagen über regionale Eindrückungen und lokalen Kräfte, wie in der Brust, treffen.

In den Beschleunigungsverläufen beim Oberkörper und Kopf entstehen übermäßige Peaks. Der Peak, der Ausgangslage bei 40 ms, kann auf die Modellierung des Beckengurtes zurückgeführt werden. Die Kraft-Weg Eigenschaft des Translators springt von einer moderaten Größe auf eine nahezu steife Eigenschaft. Dadurch wird der Körper beim Erreichen der Grenze übermäßig stark abgebremst. Durch eine angepasste Modellierung könnte dieser Effekt beseitigt werden. Der Peak bei 75 ms am Kopf entsteht insbesondere dadurch, dass bei der Simulation keine Rückhaltesysteme aktive am Kopf wirken. In Realität würde der Kopf durch die Airbags abgebremst. Wichtig ist jedoch zu erwähnen, dass simulativ viele Probleme beseitigt werden können. Daher sollte auch eine Plausibilisierung mit der Realität durchgeführt werden. Se

Abschließend ist noch zu erwähnen, dass es bei der Variante 4 zu einem Fehler der Kopf Bewegung gekommen ist. Bei der Rotation des Kopfes verhakt sich ein Knotenpunkt des Kopfes mit einem des Oberkörpers. Dadurch wird die Position des Kopfes an den Oberkörper gekoppelt und kann nicht mehr weiter rotieren. Damit lassen sich insbesondere die Unterschiede der Kopfwerte aus dem Vergleich erklären. Durch dieses Fehlverhalten entfällt bei der abschließenden Diskussion die Betrachtung dieser Variante.

7. Ergebnisdiskussion

Um nun den Kreis zu schließen und an die Aufgabenstellung anzuknüpfen geht es in diesem Abschnitt darum, die aus den räumlichen und simulativen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse zu betrachten und ihre Bedeutung zu ermitteln. Letztlich wurde mittels dieser Arbeit das Sicherheitssystem auf Teilbereiche aufgebrochen, um mögliche Einflüsse der Einzelmaßnahmen zu verstehen und somit wesentliche Aussagen über das Sicherheitskonzept für den Frontalaufprall des HCC21 treffen zu können. Dabei ist zu beachten, dass die Rückhaltesysteme aufeinander abgestimmt werden und in der Realität die Sicherheit des Insassen nur bei Verwendung aller Systeme bestmöglich gesichert ist.

Entsprechend der räumlichen Untersuchung sind die Herausforderungen der Airbagsysteme zu erkennen. Festzuhalten ist, dass mit einem einzigen Airbag nicht alle räumlichen Änderungen der Sitzpositionen abgedeckt werden können. Für ein stimmiges Gesamtkonzept ist vielmehr eine Kombination und Abstimmung der einzelnen Systeme notwendig. Aus der Untersuchung ist eindeutig dazu zu raten, den Airbag in der Fahrposition im Lenkrad beim HCC21 zu verbauen. Dieser zeigt in dem räumlichen Vergleich die besten Ergebnisse. Zusätzlich steckt ein großes Know-how, durch den Einsatz in konventionellen Fahrzeugen, in dem Lenkradsystem. Durch die Verdeckung des Lenkkranzes im eingefahrenen Zustand des Lenkrades müssen die anderen Fahrmodis mit einem zusätzlichen Airbag abgesichert werden. Der Airbag aus der I-Tafel oder dem Dach haben dabei verschiedene Herausforderungen, die den Einsatz dieser im HCC21 erschweren. Hieraus resultiert, dass einige Funktionen eingeschränkt oder wegfallen müssen, die ein mögliches Risiko für den Insassen sein können. Beim I-Tafel-Airbag wäre dies die Funktion des Tisches auf der Fahrerseite und die Sonnenblende mit dem verbauten Bildschirm. Im Falle des Dachairbags hingegen müsste die Bewegungsfreiheit der Insassen im Arbeitsmodus eingeschränkt werden. Hier stellt sich die Frage der Notwendigkeit der Sitzverstellung im H-Feld für die Beifahrerseite und den Arbeitsmodus auf der Fahrerseite. Im Vergleich zu den zwei Airbagpositionen bietet der Dachairbag, durch die Möglichkeit der Kraftabstützung am Dachhimmel eine bessere Absicherung der Liegeposition. Zusätzlich zeigt die reine Betrachtung des aufzufüllenden Volumens zwischen den Modis ein Problem da. Lösungen dafür bieten einerseits volumenadaptive Airbags, aber auch eine Kombination mit einem Airbagsystem aus dem Sitz. Dabei wäre die im Zuge dieser Arbeit entstandene Idee eines L-Airbags denkbar. Dieser ist als eine Ergänzung der seitlichen

Sitzairbags zu sehen. Der Airbag umhüllt den Körper im Falle eines Frontalaufpralls, während sich der Insasse im Relaxmodus befindet und stützt sich an den vorhandenen Airbags für den Arbeitsmodus ab.

Die bisherige Position des Knieairbags kann beim aktuellen Stand nur während des Fahrer- oder Arbeitsmodus verwendet werden. Durch die stark abweichende Position der Beine zwischen den Modis, als auch durch die Positionierung der 5% Frau in der LG-Position, wird der Einsatz der Knieairbags erschwert.

Erkenntnisse der Simulation zeigen unter anderem, dass Verhalten der Insassenkinematik in der Liegeposition. Deutlich wird dabei, dass der Insasse im Crashfall anfänglich dazu neigt, unter dem Gurt zu rutschen. Durch die Anstellung der Sitzfläche wurde dem Submarining bereits in der Liegeposition entgegengewirkt. Während des Crashes wird der Torso durch den Beckengurt im unteren Bereich aufgefangen, wodurch der Oberkörper beginnt zu rotieren. Ein Rückhaltesystem, bestehend aus einem Gurtsystem, verringert die Bewegung des Kopfes nur indirekt. Daher rotiert der Kopf in den Simulationen bis in den Anschlag des Genicks und wird innerhalb von kürzester Zeit abgebremst.

Für eine bessere Bewertungsmöglichkeit werden die prozentualen Werte der einzelnen Parameter zusammengestellt und über eine gewählte Gewichtung bewertet. Wobei die Gewichtung der Oberkörper Parameter doppelt so hoch angesetzt wurde, wie die des Kopfes. Grund hierfür ist der indirekte Einfluss des untersuchten Systems auf den Kopf. Der Vergleich der Maßnahmen zeigt die besten Verbesserungen durch die passive Rückenlehne, mit einer 10° verstellbaren Lehne. Weitere Rotationsfreiheit der Rückenlehne führt insbesondere beim Kopf zu verschlechterten Ergebnissen. Die aktive Rückenlehne führt bei der durchgeführten Bewertung zu einer leichten Verbesserung von 2% (vgl. Abbildung 7-1).

Gewichtung	Parameter	Ausgangslage	V1	V2	V3	V5	V6
0,041	Kopf v	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	2,00
0,041	Oberkörper v	1,00	0,00	2,00	2,00	1,00	1,00
0,103	Kopf a	1,00	1,39	1,41	1,53	1,33	1,23
0,206	Oberkörper a	1,00	0,83	0,82	0,82	0,65	0,69
0,052	HIC15	1,00	1,78	1,87	2,51	1,44	1,30
0,052	HIC36	1,00	1,64	2,14	2,68	2,42	1,42
0,103	TIC15	1,00	0,77	0,76	0,76	0,39	0,40
0,103	TIC36	1,00	0,81	0,95	0,91	0,73	0,81
0,052	Genickkraft Druck	1,00	0,51	0,51	0,51	1,11	0,85
0,103	Genickkraft Zug	1,00	0,96	0,96	0,96	1,23	1,27
0,103	Genickmoment	1,00	0,31	1,45	2,70	1,37	1,13
0,041	Gurtausrollung	1,00	0,92	1,15	1,79	0,74	0,73
	Gesamtbewertung	1,00	0,89	1,14	1,33	0,98	0,98

Abbildung 7-1: Bewertungsmatrix der untersuchten Varianten

Insgesamt zeigt der Vergleich der Szenarien eine Verbesserung der Brustkinematik. Interessant ist das Maximalwerte der Brustbeschleunigung, trotz des kinematischen Impulses durch die aktive Aufrichtung der Rückenlehne, gering ausfallen. Erklären lässt sich die Verbesserung durch die Rotationsfreiheit der Rückenlehne und die damit geänderte Insassenkinematik. Der Insasse zieht während des Crashes mehr am oberen Gurt, wodurch mehr Energie über den Gurtkraftbegrenzer absorbiert werden kann. Damit fällt der maximale Peak der Brustbeschleunigung ab, der durch das Auffangen des Beckengurtes entsteht. Ein weiterer Punkt könnte, bei der aktiven Variante, die Beseitigung des Spiels zwischen Gurt und Insasse sein. Zum Crashzeitpunkt wirkt das Gurtsystem bereits und bremst den Oberkörper ab. Damit wird das Abbremsverhalten des Fahrzeuges direkter auf den Insassen übertragen.

Weiterhin fällt positiv auf, dass die Position der maximalen Vorverlagerung des Insassen, über die eingesetzten Maßnahmen, erhöht wird. Negativ ist jedoch, dass die Variante sich im Vergleich zur Ausgangslage in den Kopfwerten verschlechtern. Was jedoch über ein abgestimmtes Gesamtsicherheitskonzept verbessert werden könnte.

8. Fazit und Ausblick

Durch neue Sitzkonfigurationen und ein breiteres Angebot an Entertainmentmöglichkeiten im Fahrzeug entstehen neue Herausforderungen für die bisherigen Rückhaltesysteme. Das HCC21 bietet als Gesamtkonzept eine Vielzahl verschiedener Freiheiten im Innenraum, welche sicherheitstechnisch noch nicht abgesichert sind. In dieser Arbeit wurden daher die Konzepte für die Sicherheit, mit dem Fokus auf den Frontalaufprall, untersucht.

Auf Grundlage der Bewertungen einzelner Systeme aus dem Kapitel 4 und der Betrachtung der verschiedenen Konzeptideen in der Industrie, soll zunächst einmal festgehalten werden, welche Systeme im HCC21 zur Insassensicherheit für den Frontalaufprall verbaut werden sollen. Der Gurtstraffer und Gurtkraftbegrenzer werden bereits in konventionellen Fahrzeugen verbaut und führen auch bei jeder verfügbaren Position zu einer verbesserten Sicherheit. Durch die Verstellmöglichkeiten des Sitzes ist zusätzlich die Integration des Gurtes in den Sitz notwendig. Das Gurtsystem wird dabei als 3-Punkt Gurt verbaut, da eine notwendige Akzeptanz für Mehrpunktgurtsysteme beim Kunden nicht gegeben ist.

Die weiteren Untersuchungen der Airbags, wie auch Maßnahmen zeigen weiterhin die Notwendigkeit eines Lenkradairbags für den Fahrmodus. Beim weiteren Vergleich stellte sich der Dachairbag gegenüber dem I-Tafelairbag als bessere Lösung für den Arbeitsmodus dar, der in Kombination mit dem L-Airbag den Relaxmodus abdeckt oder durch eine volumenadaptive Lösung. Der Knieairbag sollte nur im Fahrmodus aktiviert werden. Deutlich wird aber das noch weitere Abstimmungsarbeiten im Bereich der möglichen Sitzpositionen, insbesondere im Bereich des Use-Case im Arbeitsmodus, notwendig ist. Möglicherweise lässt sich hier ein Kompromiss des Bedienkonzeptes mit den Sicherheitssystemen für das HCC21 finden, um somit wiederum die Notwendigkeit der Verstellung des Sitzes im Arbeitsmodus zu vermeiden.

Die Untersuchung zeigt deutlich, dass eine Adaptivität der Rückhaltesysteme notwendig ist.

Die durchgeführten Simulationen mit dem Dummymodell dienen neben dem Erkenntnisgewinn, über das Verhalten in der Liegeposition, auch der Überprüfung des Modells. Dazu ist zu erwähnen, dass das Modell die vereinfachte Kinematik des Insassen gut darstellen kann. Jedoch sind während der Arbeit einige Punkte aufgefallen, die am Modell

verbessert oder erweitert werden können bzw. müssen. Einige Erweiterungen wurden im Zuge der Masterarbeit bereits getätigt. Dazu gehört die Erweiterung des Gurtsystems, durch Ergänzung von deformierbaren Materialkarten für den Gurt, als auch der Gurtkraftbegrenzer und Änderungen der Anbindungen des Beckengurtes. Zu einmaligen Anpassungen gehört die neue Positionierung der Kniegelenke. Diese bewegen sich durch unterschiedliche Modellierung nicht mit den Körperteilen mit. Außerdem entstand in der Variante 4 ein Spezialfall. Dieser hat dazu geführt, dass sich Kopf und Oberkörper verhaken und die Rotation des Genicks für die weitere Simulationszeit sperrte. Eine Anpassung der Position des Kopfes zum Oberkörper sollte durchgeführt werden.

Außerdem wird angenommen, dass durch die Modellierungsweise des Torso, durch einen einzigen starren Körper, ein Teil der Bewegung des Oberkörpers nicht richtig abgebildet wird. Festzuhalten ist, dass die Simulationsergebnisse mit Vorsicht zu betrachten sind. Die Simulation zeigt einzig das Verhalten und mögliche Verbesserungen in Relation Werten aus dem Modell zu einander ab. Für belastbare Wertegrößen fehlt eine Plausibilisierungsmöglichkeit der Insassenkinematik mit realen Versuchen.

Die simulierten Maßnahmen zeigen dabei, dass die Variante 1 bei der Bewertung zur besten Verbesserung der Sicherheit führt. Bei der reinen Betrachtung der Brustbeschleunigung hingegen zeigen alle Maßnahmen eine Verbesserung zur Ausgangslage. Die Maßnahme der aktiven Rückenlehne zeigt dabei, eine ähnliche Bewertungspunktzahl zur Ausgangslage. Die untersuchten Maßnahmen sind dabei kritisch zu hinterfragen, insbesondere die Starre Modellierung der Rückenlehne sollte überdacht werden. In der Realität gibt die Rückenlehne, durch die Elastizitäten, während der Belastung nach. Andere Funktionen wie der Gurtstraffer sind zusätzlich nicht im System abgebildet.

Das bisherige Simulationsmodell schafft es trotz der Anpassungen noch nicht die Realität mit allen ihren Funktionen so abzubilden. Hier sollten weitere Funktionen im Gurtsystem abgebildet werden. Um die Aussagekraft der Werte zu steigern.

Neben einigen Herausforderungen, die durch die Liegeposition für die Rückhaltesysteme entstehen, ermöglicht die Position mehr Raum und Bewegung zur sanften Abbremsung des Insassen. Die Position der maximalen Vorverlagerung des Insassen wird in der Simulation, durch die untersuchten Maßnahmen, bereits erhöht. Was ein Zusammenspiel der Rückhaltesysteme verbessert wird. Zu viel Freiheit könnte jedoch auch dazu führen, dass der Insasse sich unkontrolliert im Wagen bewegt oder seitlich aus dem Gurtsystem rutscht, wie es bei der Variante 3 der Fall war.

Die Ausgangssimulation zeigt jedoch auch, dass ein Gurtkraftbegrenzer mit 3,5 kN Kraftbegrenzung die Insassenkinematik nach einer Rotation von ca. 35° blockiert. Der restliche Weg im Innenraum des Fahrzeuges wird dabei nicht zur Energieabsorption benutzt. Daher ist denkbar, dass mit einer verringerten Kraftbegrenzung, mehr geführte Rotation des Insassen ermöglicht wird. Wichtig ist darauf zu achten, dass wie bei den Airbags, die Abdeckung aller Fahrmodi durch die Kraftgrenze gesichert ist. Maßnahmen wäre der Einsatz eines adaptiven Gurtkraftbegrenzer, falls dieser technisch möglich ist und weitere Untersuchungen eine Verbesserung aufzeigen.

Festzuhalten ist, dass noch viele weitere Maßnahmen nach Erweiterung des Modells, untersucht werden können. Außerdem liefert die Arbeit keine Antwort auf die Frage wie sich das Zusammenspiel der Airbags mit dem Gurtsystem verhält. Das weitere Vorgehen wäre daher die beiden Rückhaltesysteme in der Simulation auf einander abzustimmen, um mögliche Effekte zu identifizieren, die in den untersuchten Einzelsystemen nicht aufgetreten sind.

Bei der Untersuchung ist allerdings auch aufgefallen, dass die Notwendigkeit besteht Maßnahmen für Rückhaltesysteme fahrzeugspezifisch zu betrachten und auf Randbedingungen im Innenraum anzupassen. Insbesondere die Vielzahl der verschiedenen Positionen kann dazu führen, dass Rückhaltesysteme nicht eingesetzt werden können. Auch die industriellen Konzepte haben bei der näheren Betrachtung noch keine Lösung für jedes Problem. Für das Gesamtkonzept des HCC21 sollte daher eine weitere Untersuchung der identifizierten Herausforderungen der Airbagsysteme in den einzelnen Fachbereichen stattfinden, um abschließend in einer Abstimmungsrunde über die beste Lösung für das Gesamtsicherheitskonzept zu entscheiden.

Literaturverzeichnis

- [ABA2014] Abaqus: *Abaqus 6.13 Documentation* [online]. Internet: <<http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/index.html>> [Zugriff: 14.01.2020 7:31 Uhr MESZ]
- [Ass2005] Association for the Advancement of Automotive Medicine, Des Plaine: *Association for the Advancement of Automotive Medicine: The Abbreviate Injury Scale-AIS 2005* (in Kraft getr. am 2005) (2005)
- [BMW2020] BMW Group: *Die BMW Group auf der Consumer Electronics Show (CES) 2020 in Las Vegas*. [online]. Internet: <<https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0304187DE/die-bmw-group-auf-der-consumer-electronics-show-ces-2020-in-las-vegas>> [Zugriff: 08.02.2020 20:43 Uhr MESZ]
- [CAR2020] carhs.training gmbh: *Safety companion 2020: Wissen für die Fahrzeugentwicklung von morgen*, carhs.training gmbh, Alzenau, (2020)
- [CHR2009] Christian Brinkmann: *Mercedes ESF 2009: Aufblasbare Metallstrukturen und bremsende Airbags* [online]. Internet: <<https://www.speed-heads.de/auto-news/mercedes-esf-2009-aufblasbare-metallstrukturen-und-bremsende-airbags-0004100.html>> [Zugriff: 14.01.2020 9:32 Uhr MESZ]
- [DAI2020] Daimler AG: *Fahrzeugsicherheit bei Daimler 2019 | Daimler* [online]. Internet: <<https://www.daimler.com/magazin/mobilitaet/sicherheit-auto-mercedes-esf.html>> [Zugriff: 08.02.2020 23:15 MESZ]
- [DEU2011] Deutscher Verkehrssicherheitsrat: *Der Sicherheitsgurt- Lebensretter Nr. 1*. Schriftreihe Verkehrssicherheit. 15, (2011)
- [ECE137] ECE-R 137, 2016-06-09: *Uniform provisions concerning the approval of passenger cars in the event of a frontal collision with focus on the restraint system*, (2016)
- [ECR2011] ECE-R 95, 2011-06-23: *Aurprallschutz Frontalaufprall, Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge hinsichtlich des Schutzes bei einem Frontalaufprall*, (2011)
- [EIB1959] Eiband, A. M.: *Human Tolerance to Rapidly Applied Accelerations: A Summary of the Literature: NASA Memorandum 5-19-59E*, Washington DC, (1959)
- [Fae1985] Faerber E., Kramer F.: *On the Application of the HIC as Head Protection Croteropn*, Göteborg, (1985)
- [FER2019] Ferrari Alan, Haldimann M.: *Mögliche Anforderungen an Rückhaltesysteme der Zukunft in automatisiert fahrenden Fahrzeugen*, DTC AG, Vaufelin, (2019)
- [Go12017] Golowko, Kai u. a.: *Neue Möglichkeiten der Innenraumgestaltung*. In: AT-Zextra 22 (2017) S3, S. 42 -45

- [Go22017] Golowko, Kai u. a.: *Automatisiertes Fahren Einflüsse auf die Rückhaltesysteme*. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 119 (2017) 7-8, S. 26-33
- [HCC2021] Adamski Dirk; Friedhoff Jan: *Hamburg Concept Car 2021 (HCC21)*, Hamburg, HAW Hamburg, Dept, Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau offenes Lernprojekt, (2020)
- [HOC2015] HOCHWALD, ANNE: *Auswirkungen von g-kraften auf den menschlichen organismus*: GRIN Publishing, (2015)
- [Kra2013] Kramer, Florian: *Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen: Biomechanik - Simulation - Sicherheit im Entwicklungsprozess*. ATZ/MTZ-Fachbuch. 4., erw. und korrigierte Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, (2013)
- [Laa2019] Laakmann, Frank u. a.: *Neue Innenraumkonzepte für den Insassenschutz in hochautomatisierten Fahrzeugen*. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 121 (2019) H. 4, S. 54 -59
- [MPA2012] mbpassionblog: *Die neue S-Klasse: Der Airbag für den Gurt im W222 - Mercedes-Benz Passion Blog / Mercedes Benz, smart, Maybach, AMG* [online]. Internet: <<https://blog.mercedes-benz-passion.com/2012/11/die-neue-s-klasse-der-airbag-fur-den-gurt-im-w222/>> [Zugriff: 09.01.2020 13:08 Uhr MESZ]
- [NAS1980] NASA: *Evaluation of Neutral Body Posture on Shuttle Mission STS_57*, (1980)
- [NAS2020] NASA: *NASA Standards Govern Comfortable Car Seats* [online]. Internet: <https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2013/t_4.html> [Zugriff: 08.02.2020 8:50 Uhr MESZ]
- [Nca2020] Euro Ncap: *Die offizielle Webseite von The European New Car Assessment Programme | Euro NCAP: Euro Ncap* [online]. Internet: <<https://www.euroncap.com/de>> [Zugriff: 08.02.2020 16:15 Uhr MESZ]
- [New1980] Newman, James A.: *Head Injury Criteria in Automotive Crash Testing*, SAE International, (1980)
- [SCH1996] Schlott, Stefan: *Airbag: Die zündende Idee beim Insassenschutz*. Die Bibliothek der Technik 121, Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie, (1996)
- [SCH2015] Schwolow Simon: *Erstellung eines Prinzipmodells eines Dummy mit der Finite Elemente Methode*, Hamburg, HAW Hamburg, Dept, Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau Schwerpunktsentwurf, (2015)
- [Seat2020] Seat: *Technik Lexikon - Anti-Submarining-Sitz | SEAT* [online]. Internet: <<https://www.seat.de/service-zubehoer/technik-lexikon/a/anti-submarining-sitz.html>> [Zugriff: 08.02.2020 12:50 Uhr MESZ]
- [Wik2020] Wikipedia: *Sicherheitsgurt* [online]. Internet: <<https://de.wikipedia.org/wiki/Sicherheitsgurt>> [Zugriff: 02.01.2020 15:20 Uhr MESZ]

Anhang

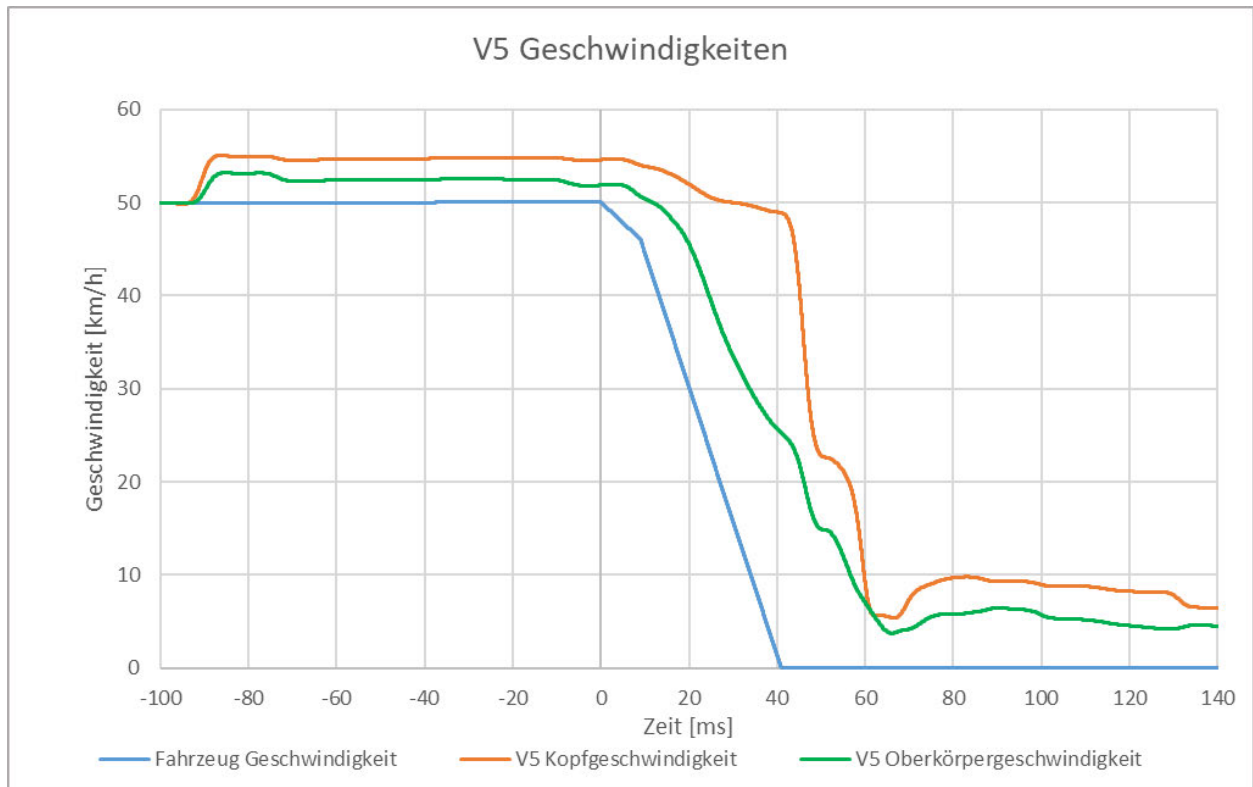


Abbildung 0-1: V5 Geschwindigkeiten

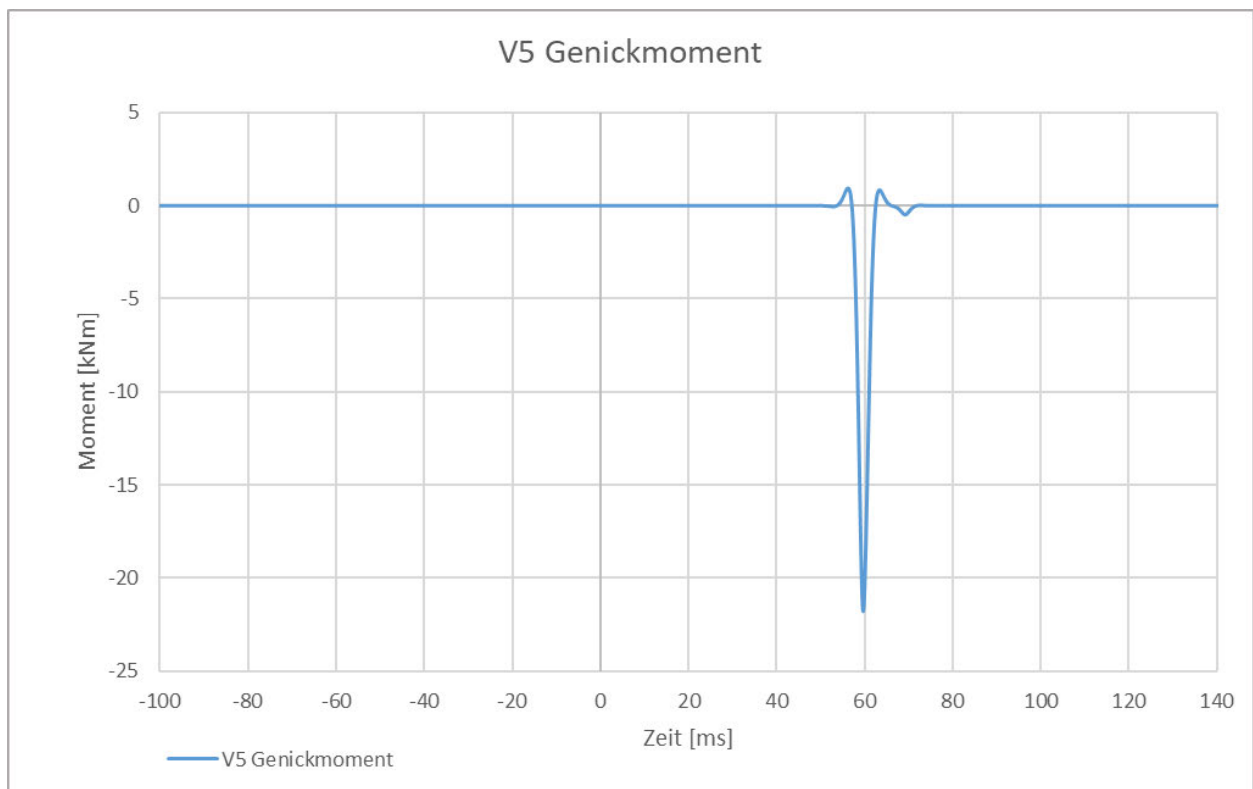


Abbildung 0-2: V5 Genickmoment

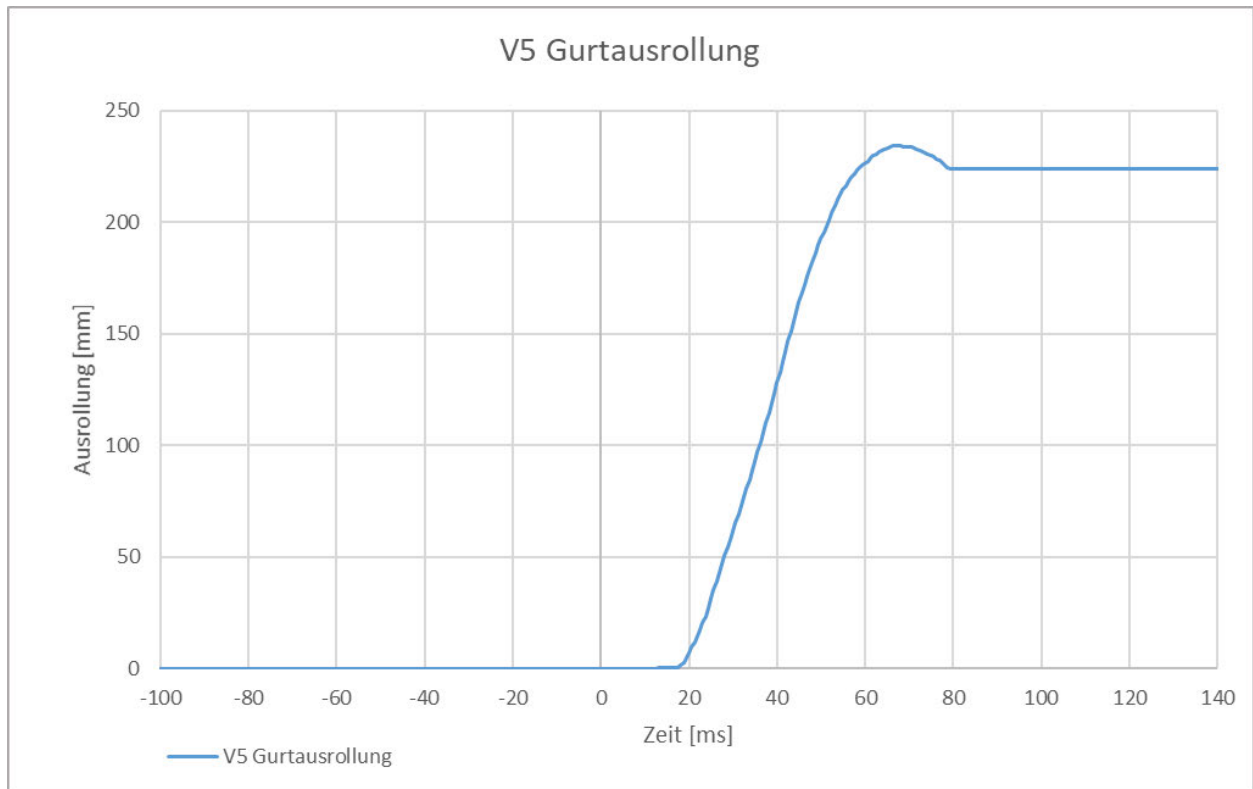


Abbildung 0-3: V5 Gurtausrollung

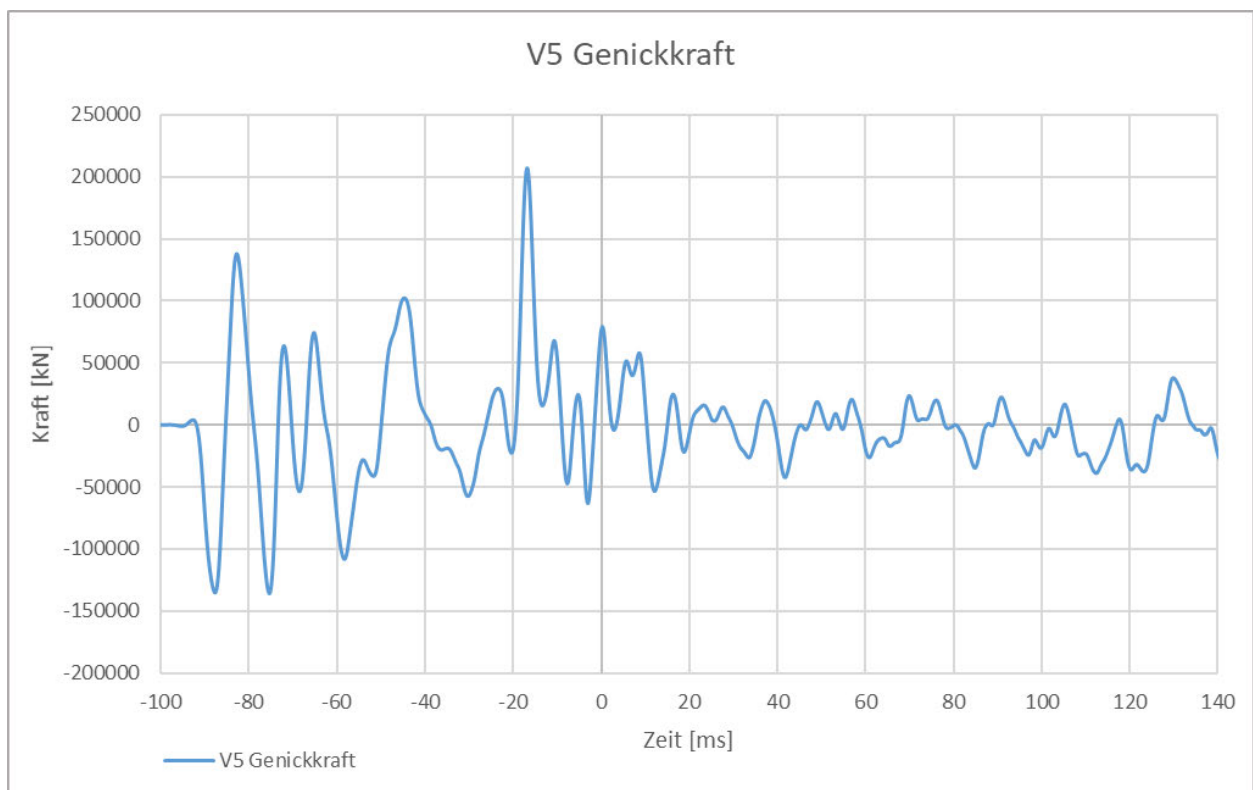


Abbildung 0-4: V5 Genickkraft

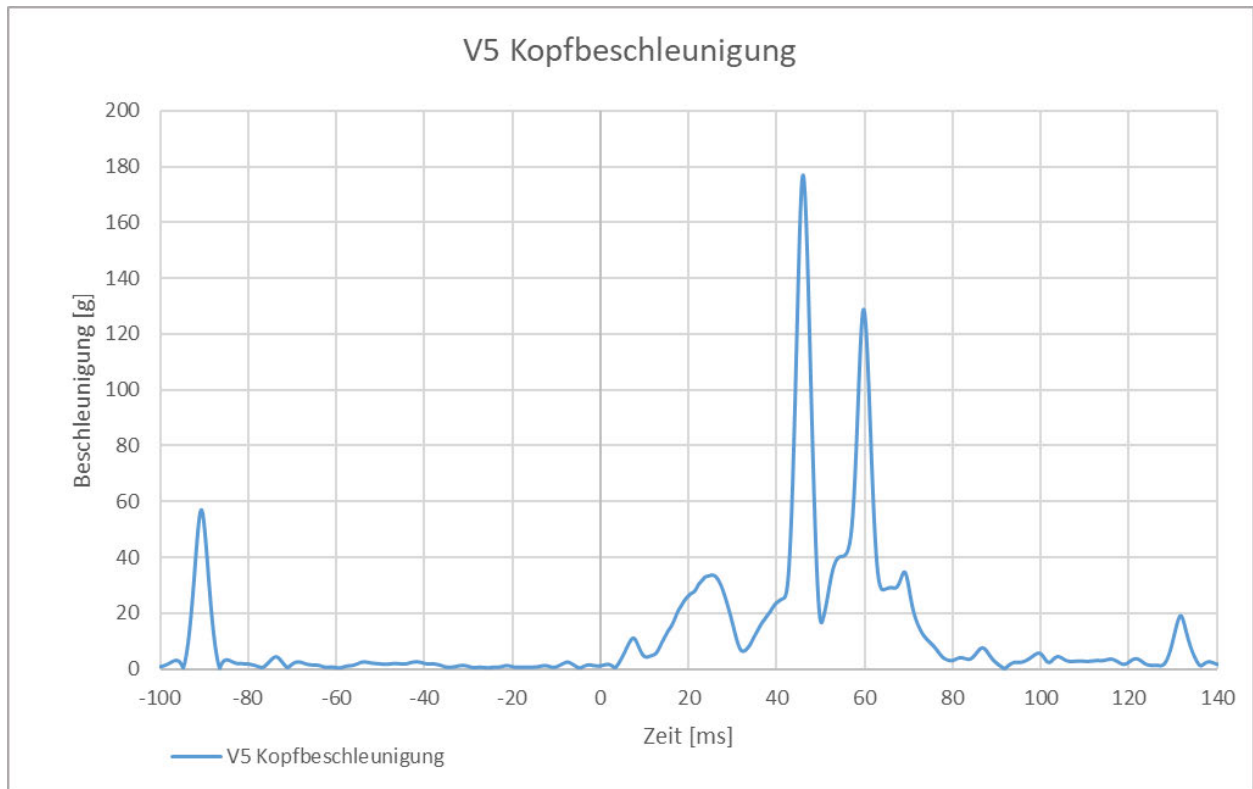


Abbildung 0-5: V5 Kopfbeschleunigung

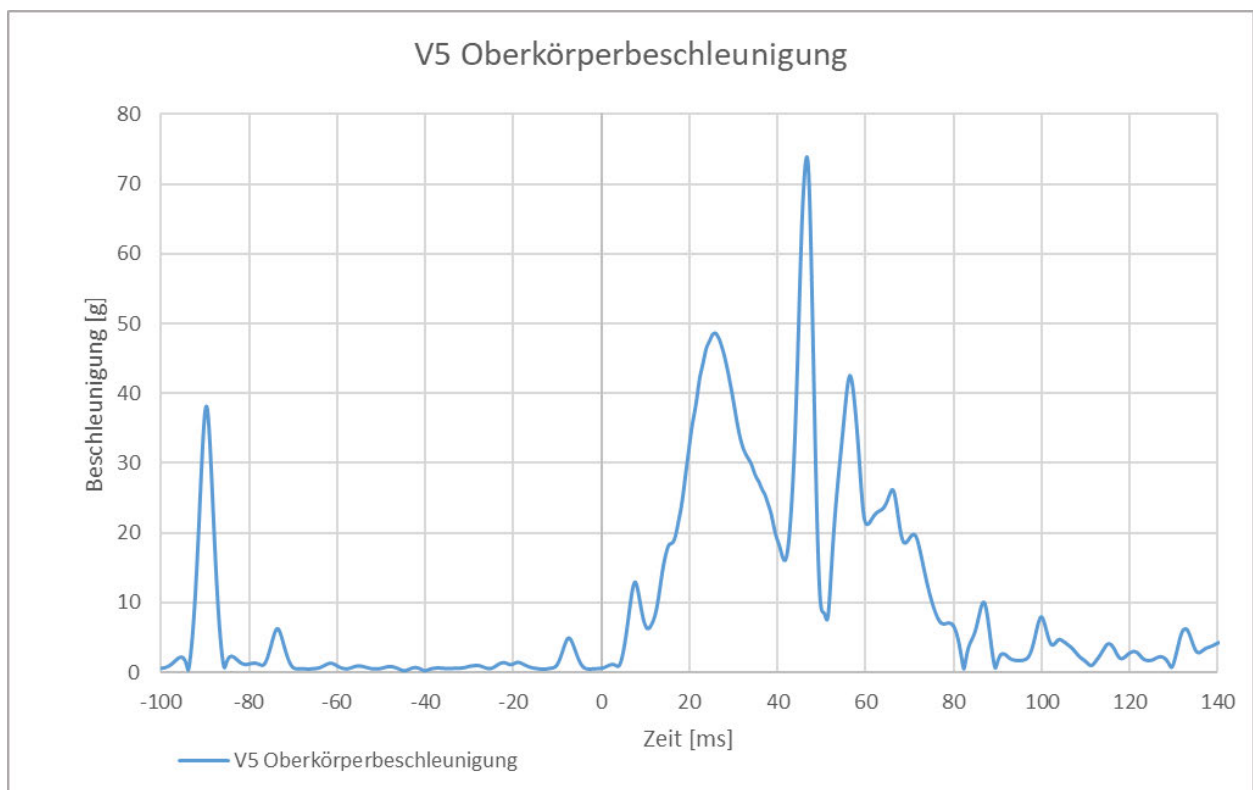


Abbildung 0-6: V5 Oberkörperbeschleunigung



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Bieniek

Vorname: Matthias

dass ich die vorliegende Masterarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Funktionale Bewertung unterschiedlicher Konzepte der Insassensicherheit für das Konzeptfahrzeug HCC21 der HAW Hamburg unter Berücksichtigung verschiedener Fahrmodi und einhergehender unterschiedlicher Sitzpositionen

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

14.02.2020

Datum


Unterschrift im Original