



**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**
Hamburg University of Applied Sciences

Sicherheit im Rettungswagen

Eine Untersuchung der körperlichen Belastung
von Patienten im Rettungswagen während einer
Einsatzfahrt

Bachelorarbeit vorgelegt von
Fabian Sengl

BACHELORARBEIT

Sicherheit im Rettungswagen

Eine Untersuchung der körperlichen Belastung von Patienten im Rettungswagen während einer Einsatzfahrt

Vorgelegt am 31.07.2022 von
Fabian Sengl



1. Prüfer: Prof. Dr. Frank Hörmann
2. Prüfer: Dipl.-Phys. Martin Windisch M.Eng.

In Zusammenarbeit mit der
IFU-Hamburg Institut für Unfallanalysen
Dipl. Phys. Ing. Weber PartG

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**
Fachbereich Rettungsingenieurwesen
Ulmenliet 20
21031 Hamburg

Danksagung

Die Erstellung und Bearbeitung dieser vorliegenden Bachelorarbeit wäre mir ohne die tatkräftige Unterstützung der folgenden Personen nicht möglich gewesen. Hierfür will ich mich an dieser Stelle sehr herzlichst dafür bedanken!

Mein erster Dank gilt meinen beiden Betreuern. Herr Professor Frank Hörmann seitens der HAW Hamburg half mir bei allen aufkommenden Fragen rund um die schriftliche Ausarbeitung. Herr Dipl.-Phys. Martin Windisch M.Eng. vom IFU-Hamburg gab mir ebenfalls jederzeit Rat und Hilfestellung bei fachspezifischen Fragen. Vielen Dank dafür!

Des Weiteren möchte ich mich auch bei allen Gesellschaftern des IFU-Hamburgs bedanken. Jeder von Ihnen hatte bei meinen Fragen ein offenes Ohr. Ebenso bedanke ich mich beim IFU-Hamburg für die Nutzung der firmeneigenen Mess- und Analyse-Technik sowie für die Erlaubnis zur Verwendung von Fallbeispielen und den zugehörigen Fotos. Auch möchte ich einen besonderen Dank an alle Kollegen des IFU-Hamburgs aussprechen, die mich mit ihren Ratschlägen im Bereich der Biomechanik und der messtechnischen Auswertung unterstützten.

Zuletzt bedanke ich mich auch herzlichst bei meiner Familie und meiner Partnerin, die mir in dieser anspruchsvollen Zeit Mut und Durchhaltevermögen zusprachen und jederzeit zur Seite standen.

I. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden insgesamt 17 Versuchsfahrten mit einem Rettungswagen auf verschiedenen Fahrstrecken mit jeweils drei Probanden durchgeführt.

Die Aussagen der Probanden wurden mit den gemessenen Versuchsdaten korreliert und ausgewertet.

Ziel dieser Arbeit ist es, auf der Basis der aufgenommenen Daten und Probandenaussagen allgemein gültige Kriterien zu erarbeiten, die in die zukünftige Entwicklung und Planung von Rettungswagen als auch in die Ausbildung von Notfall- und Rettungssanitäter eingreifen. Ferner werden die erhobenen Daten in der Analyse auch auf das Rettungsdienstpersonal übertragen, um deren körperliche Belastung einschätzen zu können.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden Vorschläge zum Transport eines Patienten im Rettungswagen bei Einsatzfahrten sowie Verbesserungen des Transportsystems angebracht.

Inhalt

I.	Zusammenfassung.....	5
II.	Abkürzungsverzeichnis	9
III.	Abbildungsverzeichnis	10
IV.	Tabellenverzeichnis	13
V.	Diagrammverzeichnis.....	14
1.	Einleitung	18
2.	Ziel dieser Arbeit.....	22
3.	Material und Methode	24
3.1.	Probanden	26
3.2.	Fahrzeug.....	27
3.3.	Messtechnik.....	30
3.4.	Durchführung.....	43
3.5.	Datenspeicher und Auswertung.....	49
3.6.	Videoanalyse	52
4.	Ergebnisse.....	55
4.1.	Ergebnis Versuchsreihe Beschleunigung.....	56
4.1.1.	Versuch A01.1 – 15 km/h	60
4.1.2.	Versuch A01.2 – 30 km/h	65
4.1.3.	Versuch A01.3 – 45 km/h	70
4.2.	Ergebnis Versuchsreihe Gefahrenbremsung.....	75
4.2.1.	Versuch A02.1 – 15 km/h	79
4.2.2.	Versuch A02.2 – 30 km/h	85
4.2.3.	Versuch A02.3 – 45 km/h	90
4.2.4.	Versuch A02.4 – 60 km/h	95

4.3.	Ergebnis Versuchsreihe Lastwechsel.....	100
4.3.1.	Versuch A03.1 – 15 km/h	104
4.3.2.	Versuch A03.2 – 30 km/h	109
4.3.3.	Versuch A03.3 – 45 km/h	114
4.4.	Ergebnis Versuchsreihe Kurvenfahrt mit Gefahrenbremsung	119
4.4.1.	Versuch A04.1 – 15 km/h	123
4.4.2.	Versuch A04.2 – 30 km/h	128
4.4.3.	Versuch A04.3 – 45 km/h	133
4.4.4.	Versuch A04.4 – 60 km/h	138
4.5.	Ergebnis Versuchsreihe Bremsschwelle	143
4.5.1.	Versuch A05.1 – 5 km/h	147
4.5.2.	Versuch A05.2 – 8 km/h	152
4.5.3.	Versuch A05.3 – 12 km/h	157
5.	Diskussion.....	163
6.	Zusammenfassung und Ausblick.....	179
VI.	Literaturverzeichnis	181
VII.	Eidesstattliche Erklärung	182
VIII.	Anhang.....	183
a.	Fahrzeugschein des zur Verfügung gestellten Rettungswagens.....	184
b.	Position der Kopfstütze - Geometriebewertung.....	185
c.	Grenzbelastungen des menschlichen Körpers	186

II. Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CSV	<i>engl.</i> Comma-separated-values (Dateiformat)
DAT	Platzhalter für unterschiedliche Dateitypen (Dateiformat)
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
Fhr.	Fahrer (Rettungswagen)
IFU-Hamburg	IFU-Hamburg Institut für Unfallanalysen Dipl. Phys. Ing. Weber PartG
IIWPG	<i>engl.</i> International Insurace Whiplash Prevention Working Group
Km/h	Kilometer pro Stunde (Einheit für Geschwindigkeit)
KTW	Krankentransportwagen
m/s ²	Meter pro Sekunde im Quadrat (Einheit für Beschleunigung)
PNG	<i>engl.</i> Portable Network Graphics (Dateiformat)
RTW	Rettungswagen
SAE	<i>engl.</i> Society of Automotive Engineers
StVO	Straßenverkehrsordnung
WSTC	<i>engl.</i> Wayne State Tolerance Curve

III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht eines Krankenkraftwagens des Typs C. (Quelle: Kohlhammer)	20
Abbildung 2: Innenansicht und prinzipieller Aufbau des Patientenraumes eines Rettungswagens. (Quelle: Kohlhammer)	21
Abbildung 3: Schräge Frontalansicht von links des in den Versuchen verwendeten Rettungswagens.	27
Abbildung 4: Heckansicht des Rettungswagens der Firma Fahrtec.	28
Abbildung 5: Innenansicht des Versuchs-RTW – Der gelbe Pfeil markiert den montierten Maßstab.	29
Abbildung 6: In den Versuchen verwendete Messbox des IFU Hamburg.	32
Abbildung 7: Frontpanel der Messbox – die IFU-Messbox beinhaltet vier Beschleunigungssensoren, um einen großen Messbereich festzuhalten. (Quelle: IFU-Hamburg)	32
Abbildung 8: Exemplarische Darstellung der Verwendung von Kopf- und Brustsensoren. (Quelle: IFU-Hamburg)	35
Abbildung 9: Zeichnerische Darstellung des Rettungswagens in der Draufsicht mit eingezeichneten Positionen der Messtechnik und der Probanden A, B und C.	36
Abbildung 10: Messboxen im Patientenraum des Rettungswagens.	39
Abbildung 11: Anordnung der Probanden im Kofferaufbau des RTW in der Seitenansicht.	39
Abbildung 12: Darstellung des rechthändischen Koordinatensystems. (Quelle: www.wiwiweb.de [aufgerufen am 25.07.2022 um 22:55 Uhr]).	40
Abbildung 13: Probanden mit installierter Messtechnik und Augenbinden.	40
Abbildung 14: Kopfsensor der Probanden A mit dargestellten Aufnahme-Richtungen der Beschleunigung.	41
Abbildung 15: Durch das Liegen des Probanden A ändern sich die Aufnahme-Richtungen des Brustsensors.	41
Abbildung 16: Die Aufnahme-Richtungen des Probanden B bleiben sowohl am Kopf als auch an der Brust gleich.	42

Abbildung 17: Der dritte Proband sitzt auf dem Beifahrersitz in der Fahrerkabine.	42
Abbildung 18: Fragebogen der Probanden zur Dokumentation der gespürten und wahrgenommenen Belastung in den Versuchsreihen A01 bis A03.....	47
Abbildung 19: Fragebogen der Probanden zur Dokumentation der gespürten und wahrgenommenen Belastung in den Versuchsreihen A04 und A05.....	48
Abbildung 20: Interface der Software zur Auswertung der erhobenen Messdaten.	49
Abbildung 21: Überblick des Vorgangs der Datenauswertung.	51
Abbildung 22: Videoanalyse mittels der Software <i>Shotcut</i>	53
Abbildung 23: Resultat der Videoanalyse und des Zusammenschnitts.....	53
Abbildung 24: Der Nullpunkt im Ruhezustand der Trage wird auf rund 6 cm über der Markierung 24 gesetzt.	54
Abbildung 25: Bildersequenz der durchgeführten Versuchsreihe A01.	58
Abbildung 26: Exemplarische Videosynchronisation der Versuchsreihe A01.	59
Abbildung 27: Bildersequenz der durchgeführten Versuchsreihe A02.	77
Abbildung 28: Exemplarische Videosynchronisation der Versuchsreihe A02.	78
Abbildung 29: Bildersequenz der durchgeführten Versuchsreihe A03.	102
Abbildung 30: Exemplarische Videosynchronisation der Versuchsreihe A03.	103
Abbildung 31: Bildersequenz der durchgeführten Versuchsreihe A04.	121
Abbildung 32: Exemplarische Videosynchronisation der Versuchsreihe A04.	122
Abbildung 33: Bildersequenz der durchgeführten Versuchsreihe A05.	145
Abbildung 34: Exemplarische Videosynchronisation der Versuchsreihe A05.	146
Abbildung 35: Kopfbewegung des Probanden B während des Bremsvorgangs.	166
Abbildung 36: Kopfbewegung des Probanden B nach dem Bremsvorgang.....	166
Abbildung 37: Bewegung eines sitzenden Insassens bei einer Geschwindigkeitsänderung.	167
Abbildung 38: Geometriebewertung der Position einer Kopfstütze (Quelle IIWPG)...	167
Abbildung 39: Einzelbild der Videoanalyse – ein Nicken des Kopfes wird durch die Bremsung hervorgerufen.....	171
Abbildung 40: Einzelbild der Videoanalyse – Nach der Bremsung wird der Kopf des sitzenden Probanden überstreckt.....	171
Abbildung 41: Kopfbewegung des Probanden B während des Bremsvorgangs.	172

Abbildung 42: Einzelbild der Videoanalyse der Versuchsreihe A04 – der Streckungspunkt des Tragetisches liegt rund 9 cm über dem Nullpunkt (vgl. roter Pfeil). 172

Abbildung 43: Einzelbild der Videoanalyse der Versuchsreihe A05 – in der Seitenansicht zeigt sich das Lösen des Probanden A von der Trage im maximalen Streckungspunkt der Trage..... 177

Abbildung 44: Einzelbild der Videoanalyse der Versuchsreihe A05 – in der Seitenansicht ist die maximale Kopfwegung des Probanden A ersichtlich..... 177

Abbildung 45: Einzelbild der Videoanalyse der Versuchsreihe A05 – der maximale Streckungspunkt des Tragetisches liegt rund 24 cm über dem Nullpunkt (vgl. roter Pfeil). 178

Abbildung 46: Einzelbild der Videoanalyse der Versuchsreihe A05 – der maximale Eintauchpunkt des Tragetisches liegt rund 9 cm unter dem Nullpunkt (vgl. roter Pfeil). 178

Abbildung 47: Fahrzeugschein des Versuchs-RTW – die zulässige Gesamtmasse des Fahrzeugs beträgt rund 4 350 kg (vgl. gelbe Markierung). 184

IV. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausstattung und Verteilung der Messtechnik an die Probanden.....	35
Tabelle 2: Durchgeführte Versuchsreihen mit deren Unterversuchen und Geschwindigkeiten.....	46
Tabelle 3: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A01.1.	60
Tabelle 4: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A01.2.	65
Tabelle 5: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A01.3.	70
Tabelle 6: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A02.1.	79
Tabelle 7: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A02.2.	85
Tabelle 8: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A02.3.	90
Tabelle 9: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A02.4.	95
Tabelle 10: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A03.1.	104
Tabelle 11: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A03.2.	109
Tabelle 12: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A03.3.	114
Tabelle 13: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A04.1.	123
Tabelle 14: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A04.2.	128
Tabelle 15: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A04.3.	133
Tabelle 16: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A04.4.	138
Tabelle 17: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A05.1.	147
Tabelle 18: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A05.2.	152
Tabelle 19: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A05.3.	157
Tabelle 20: Dokumentierte Belastungen des IFU-Hamburg aus Versuchen in der Vergangenheit (Quelle: IFU-Datenbank).	168
Tabelle 21: Übersicht der Grenzbelastungen des menschlichen Körpers (Quelle: Burg & Moser 2017: 561).....	176

V. Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Eventmarker in Aufzeichnung der Daten. Der Nullpunkt des Zeitstrahls wurde in der Auswertung an den Marker angepasst.	33
Diagramm 2: Ergebnis des Fragebogens der Bemerkbarkeit zum Versuch A01.	59
Diagramm 3: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A01.1.	62
Diagramm 4: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A01.1.	62
Diagramm 5: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A01.1.	63
Diagramm 6: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A01.1.	63
Diagramm 7: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A01.1.	64
Diagramm 8: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A01.1.	64
Diagramm 9: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A01.2.	67
Diagramm 10: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A01.2. ...	67
Diagramm 11: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A01.2.	68
Diagramm 12: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A01.2.	68
Diagramm 13: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A01.2. ...	69
Diagramm 14: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A01.2. ...	69
Diagramm 15: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A01.3.	72
Diagramm 16: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A01.3. ...	72
Diagramm 17: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A01.3.	73
Diagramm 18: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A01.3.	73
Diagramm 19: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A01.3. ...	74
Diagramm 20: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A01.3. ...	74
Diagramm 21: Ergebnis des Fragebogens der Bemerkbarkeit zum Versuch A02.	78
Diagramm 22: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A02.1.	82
Diagramm 23: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A02.1. ...	82
Diagramm 24: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A02.1.	83
Diagramm 25: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A02.1.	83
Diagramm 26: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A02.1. ...	84
Diagramm 27: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A02.1. ...	84
Diagramm 28: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A02.2.	87
Diagramm 29: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A02.2. ...	87

Diagramm 30: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A02.2..... 88

Diagramm 31: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A02.2..... 88

Diagramm 32: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A02.2. .. 89

Diagramm 33: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A02.2. .. 89

Diagramm 34: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A02.3..... 92

Diagramm 35: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A02.3. ... 92

Diagramm 36: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A02.3..... 93

Diagramm 37: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A02.3..... 93

Diagramm 38: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A02.3. .. 94

Diagramm 39: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A02.3..... 94

Diagramm 40: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A02.4..... 97

Diagramm 41: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A02.4. ... 97

Diagramm 42: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A02.4..... 98

Diagramm 43: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A02.4..... 98

Diagramm 44: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A02.4. .. 99

Diagramm 45: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A02.4. .. 99

Diagramm 46: Ergebnis des Fragebogens der Bemerkbarkeit zum Versuch A03..... 103

Diagramm 47: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A03.1... 106

Diagramm 48: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A03.1. . 106

Diagramm 49: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A03.1... 107

Diagramm 50: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A03.1... 107

Diagramm 51: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A03.1. 108

Diagramm 52: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A03.1. 108

Diagramm 53: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A03.2... 111

Diagramm 54: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A03.2. . 111

Diagramm 55: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A03.2... 112

Diagramm 56: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A03.2... 112

Diagramm 57: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A03.2. 113

Diagramm 58: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A03.2. 113

Diagramm 59: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden 1 im Versuch A03.3... 116

Diagramm 60: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A03.3. . 116

Diagramm 61: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A03.3...	117
Diagramm 62: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A03.3...	117
Diagramm 63: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A03.3.	118
Diagramm 64: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A03.3.	118
Diagramm 65: Ergebnis des Fragebogens der Bemerkbarkeit zum Versuch A04.....	122
Diagramm 66: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A04.1...	125
Diagramm 67: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A04.1. .	125
Diagramm 68: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A04.1...	126
Diagramm 69: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A04.1...	126
Diagramm 70: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A04.1.	127
Diagramm 71: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A04.1.	127
Diagramm 72: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A04.2...	130
Diagramm 73: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A04.2. .	130
Diagramm 74: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A04.2...	131
Diagramm 75: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A04.2...	131
Diagramm 76: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A04.2.	132
Diagramm 77: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A04.2.	132
Diagramm 78: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A04.3...	135
Diagramm 79: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A04.3. .	135
Diagramm 80: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A04.3...	136
Diagramm 81: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A04.3...	136
Diagramm 82: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A04.3.	137
Diagramm 83: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A04.3.	137
Diagramm 84: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A04.4...	140
Diagramm 85: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A04.4. .	140
Diagramm 86: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A04.4...	141
Diagramm 87: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A04.4...	141
Diagramm 88: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A04.4.	142
Diagramm 89: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A04.4.	142
Diagramm 90: Ergebnis des Fragebogens der Bemerkbarkeit zum Versuch A05.....	146
Diagramm 91: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A05.1...	149

Diagramm 92: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A05.1. .	149
Diagramm 93: Messdaten der Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A05.1. .	150
Diagramm 94: Messdaten der Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A05.1. .	150
Diagramm 95: Messdaten der Brustsensors B des Probanden A im Versuch A05.1. .	151
Diagramm 96: Messdaten der Brustsensors A des Probanden B im Versuch A05.1. .	151
Diagramm 97: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A05.2. .	154
Diagramm 98: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A05.2. .	154
Diagramm 99: Messdaten der Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A05.2. .	155
Diagramm 100: Messdaten der Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A05.2. .	155
Diagramm 101: Messdaten der Brustsensors B des Probanden A im Versuch A05.2. .	156
Diagramm 102: Messdaten der Brustsensors A des Probanden B im Versuch A05.2. .	156
Diagramm 103: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A05.3. .	160
Diagramm 104: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A05.3. .	160
Diagramm 105: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A05.3. .	161
Diagramm 106: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A05.3. .	161
Diagramm 107: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A05.3. .	162
Diagramm 108: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A05.3. .	162
Diagramm 109: Darstellung der WSTC (Quelle: Schmitt et al 2014: 70).....	175

1. Einleitung

In Hamburg wird der Rettungsdienst rund alle 2,3 Minuten zu einem Notfall gerufen (vgl. Feuerwehr Hamburg 2021: 2). Deutschlandweit betrachtet wird der Notruf für eine medizinische Hilfe, gemessen an Notarzt- und Notfalleinsätzen im Jahr 2017, sogar rund alle drei Sekunden getätigt (vgl. Gesundheitsberichterstattung des Bundes 2022). Inbegriffen sind ebenfalls dringliche und disponible Krankentransporte sowie Beförderungen von privaten Krankentransportdiensten.

Um den Transport eines erkrankten oder verletzten Menschen zu ermöglichen, sind alle gängigen Rettungs- und Krankentransportwagen mit Tragesystemen als auch Sitzmöglichkeiten ausgestattet (vgl. Roth 2018: 141). Grundsätzlich erfolgt eine Unterteilung der Beladung und Ausstattung der Fahrzeuge in zwei Bereiche: Qualifizierter Krankentransport und Notfallrettung (vgl. Roth 2018: 141). Beide Bereiche unterliegen dem Rettungsdienstgesetz der Bundesländer und sind nach DIN EN 1789 *Rettungsdienstfahrzeuge und deren Ausrüstung* zu beschaffen und auszustatten (vgl. Roth 2018: 141). Geringfügige Abweichungen zwischen den Beladungen der einzelnen Bundesländer können allerdings vorkommen, um spezielle Einzelaufgaben ebenfalls abzudecken. Grundsätzlich unterscheidet die Norm dabei folgende Rettungsdienstfahrzeuge:

- Krankenkraftwagen Typ A1
- Krankenkraftwagen Typ A2
- Krankenkraftwagen Typ B (Notfall-KTW)
- Krankenkraftwagen Typ C (Rettungswagen)

Die beiden ersten Typen, A1 und A2, unterscheiden sich grundlegend in der Anzahl der Beförderung von Notfall- und Nicht-Notfallpatienten. Der Kranken-

kraftwagen Typ A1 kann durch seine Beladung und Ausstattung nur einen Nicht-Notfallpatienten befördern. Hingegen der Typ A2 einen Notfall- oder zwei Nicht-Notfallpatienten im Patientenraum gleichzeitig befördern kann. Eine bessere medizinische Ausstattung besitzt der Krankenkraftwagen Typ B. Dieser ist sowohl für die Erstversorgung als auch für den Transport und eine gleichzeitige Überwachung von Notfallpatienten gerüstet. Durch diese Möglichkeiten unterscheidet sich dieser Typ nur noch geringfügig zum Krankenkraftwagen des Typs C.

Das Deutsche Institut für Normung beschreibt und definiert in der EN 1789 ebenfalls die Ausführung und Anzahl der medizinischen Geräte, welche den jeweiligen Fahrzeugen zugehörig sind. Des Weiteren werden solche Fahrzeuge auch Sonderfahrzeuge genannt.

Die zu Verfügung stehenden medizinischen Geräte werden ebenfalls von speziell ausgebildetem medizinischem Personal genutzt, um Patienten vital zu überwachen. Somit ist der Krankenkraftwagen des Typs C mit mehr medizinischen Geräten ausgestattet als die anderen Fahrzeugtypen, um eine qualifizierte Überwachung des Zustands des Patienten zu gewährleisten.

Abbildung 1 zeigt ein Sonderfahrzeug des Typ C in der Übersicht mit geöffneter Seitentür zum Patientenraum. Unterschiedliche Formen und Aufbauten variieren ebenfalls durch verschiedene Fahrzeugmarken. Es ist ersichtlich, dass ein Rettungswagen grundsätzlich aus zwei Komponenten besteht: dem Fahrgestell und Fahrerkabine und einem Kofferaufbau zur Patientenversorgung.

Solche Sonderfahrzeuge werden von speziellen Herstellern angeboten und vertrieben. Durchaus ist auch ein Vertrieb seitens bekannter Fahrzeugmarken möglich, jedoch erfolgt dies meist nur für Sonderfahrzeuge auf PKW-Basis.



Abbildung 1: Übersicht eines Krankenkraftwagens des Typs C. (Quelle: Kohlhammer)

Betrachtet man nun den Innenraum des Rettungswagens, so fällt auf, dass in der Regel ein bis zwei Sitze und ein Tragesystem samt gefederten Gestell vorhanden sind. Abbildung 2 zeigt einen prinzipiellen Aufbau eines solchen Sonderfahrzeugs des Typs C. Die Trage ist an einer hydraulisch gefederten Vorrichtung fixiert und bei Bedarf entnehmbar. Diese gefederte Vorrichtung soll Fahrbewegungen des Rettungswagens ausgleichen, um den liegenden Patienten zu schützen. Fährt der Rettungswagen beispielsweise über eine Bremschwelle, so federt die Vorrichtung diese vertikale Bewegung des Fahrzeugs bis zu einem gewissen Rahmen ab.

Im Gegensatz zur Trage sind die beiden Stühle im Innenraum des Kofferaufbaus nicht gefedert. Diese Sitze dienen meist der Beförderung des rettungsdienstlichen Personals oder vereinzelt auch von Patienten. Eine Abwägung der Beförderungsart ist abhängig vom Verletzungsgrad und -art des Patienten. In dieser Arbeit soll nun untersucht werden, welche Insassenbelastungen bei Fahrten in einem Rettungswagen auftreten und inwieweit sich die körperliche Belastung eines sitzenden und liegenden Patienten unterscheiden.

Kapitel 1. Einleitung

Themenschwerpunkt ist dabei die Berachtung der erhobenen Messwerte und Bewegungsabläufe der Probanden während einzelner Versuche.



Abbildung 2: Innenansicht und prinzipieller Aufbau des Patientenraumes eines Rettungswagens.
(Quelle: Kohlhammer)

2. Ziel dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, auf der Basis der aufgenommenen Daten und Probandenaussagen allgemein gültige Kriterien zu erarbeiten, die in die zukünftige Entwicklung und Planung von Sonderfahrzeugen als auch in die Ausbildung von Notfall- und Rettungssanitäter eingreifen. Ferner sollen auch die erhobenen Daten auf das Rettungsdienstpersonal übertragen werden, um dessen körperliche Belastung einschätzen zu können.

Die Erhebung der Versuchsdaten der körperlichen Belastung von Patienten erfolgt während simulierter Einsatzfahrten mit Probanden. Die körperliche Belastung wird in Form einer einwirkenden Kraft bzw. Beschleunigung auf den menschlichen Körper gemessen. Die Einheit für die gemessene Beschleunigung auf den Körper der Probanden ist mit der Erdbeschleunigung g bzw. mit $\frac{m}{s^2}$ angegeben.¹

Die im Rahmen dieser Bachelorarbeit erhobenen Daten werden im Abschnitt 4. *Ergebnisse* analysiert und miteinander korreliert. Hierbei wird ein Vergleich zwischen der körperlichen Belastung von einem liegenden und sitzenden Patienten im Rettungswagen gezogen, um mögliche Sicherheitslücken bzw. Defizite der Lagerung von Patienten festzustellen. Zusätzlich wird die Bemerkbarkeit der körperlichen Belastung für Patienten analysiert. So erfolgt durch die Aufnahme von Probandenaussagen eine Einschätzung der Bemerkbarkeit der jeweils aufgetretenen Belastung. Die Aussagen der verschieden positionierten Probanden auf Vorder- und Hinterachse des Fahrzeugs werden mittels Fragebogen erfasst und analysiert.

¹ „g“ bezeichnet die Erdbeschleunigung, der wir ständig ausgesetzt sind. Sie beträgt $9,81 \frac{m}{s^2}$.

Kapitel 2. Ziel dieser Arbeit

Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden Vorschläge zum Transport eines Patienten im Rettungswagen während einer Einsatzfahrt sowie Verbesserungen des Transportsystems angebracht.

3. Material und Methode

In der vorliegenden Arbeit werden Versuchsdaten von körperlichen Belastungen und Probandenaussagen erhoben. Für diese Erhebung der Messdaten der körperlichen Belastung wurde eine qualitative Messung durchgeführt.

Für die Versuchsfahrten mit einem Rettungswagen, die im Rahmen der Bachelorarbeit durchgeführt wurden, stand das Gelände der Feuerwehrakademie der Feuerwehr Hamburg zur Verfügung.

Die Versuchsfahrten fanden also auf einer abgesperrten Strecke statt. Andere Fahrzeuge befanden sich während der Versuche nicht auf der Teststrecke, so dass es während der Versuchsfahrten nicht zu einer Kollision kommen konnte.

Die Kategorisierung und Durchführung der verschiedenen Versuche erfolgt an Beispielen von Fahrsicherheitstrainings nach den Richtlinien des DVR. Diese geben an, welche Inhalte ein Fahrsicherheitstraining haben sollte. So auch für ein Sicherheitstraining für Fahrten mit einem Einsatzfahrzeug (vgl. Deutscher Verkehrssicherheitsrat, 2020). Demnach werden Fahrübungen mit verschiedenen Brems- und Lenkmanövern durchgeführt (vgl. Deutscher Verkehrssicherheitsrat, 2020). Die Versuche wurden folgend in verschiedene Reihen untergliedert:

- Beschleunigung des Rettungswagens auf einer geraden Strecke
- Bremsung des RTW auf einer geraden Strecke
- Fahren eines Ausweichmanövers auf einer geraden Strecke
- Bremsung des Rettungswagens während einer Kurvenfahrt
- Überfahren einer Bremsschwelle.

Jede Versuchsreihe wurde mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gefahren, um eine Korrelation mit einer Geschwindigkeitsänderung zu erheben. Die Versuchsfahrten wurden grundsätzlich mit $15 \frac{km}{h}$, $30 \frac{km}{h}$, $45 \frac{km}{h}$ und $60 \frac{km}{h}$ durchgeführt. Letztere Geschwindigkeit ist für eine Fahrt mit Sonderrechten im Stadtgebiet denkbar, da nach § 35 StVO Abs. 5a: *„Fahrzeuge des Rettungsdienstes von den Vorschriften dieser Verordnung befreit sind, wenn höchste Eile geboten ist, um Menschenleben zu retten oder schwere gesundheitliche Schäden abzuwenden.“* (vgl. Bundesministerium für Justiz). Um eine Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer und der Einsatzkräfte auszuschließen, wird die Annahme getroffen, dass ein Rettungswagen im Stadtverkehr mit ca. $10 \frac{km}{h}$ schneller fährt. Teilweise ließ jedoch das Gelände der Feuerwehrrakademie eine solche Geschwindigkeit nicht zu, weshalb in zwei Versuchsreihen jeweils auf den letzten Unterversuch mit $60 \frac{km}{h}$ verzichtet wurde. Ein Umkippen des Rettungswagens wäre bei einer solchen Geschwindigkeit zudem wahrscheinlich gewesen.

Bei der letzten Versuchsreihe, dem Überfahren einer Bremsschwelle, wurden die Fahrgeschwindigkeiten des Rettungswagens angepasst, um das Verletzungsrisiko der Probanden zu minimieren. So wurde die bauliche Erhöhung mit Geschwindigkeiten von ca. 5, 8 und $12 \frac{km}{h}$ überfahren.

Im Nachfolgenden wird auf die Probanden, auf das Fahrzeug und auf die Messtechnik näher eingegangen.

3.1. Probanden

Die Einschlusskriterien für teilnehmende Probanden waren körperliche Fitness, sowie psychologische Gesundheit und Volljährigkeit. Zudem sollten die Probanden, wegen der Corona-Pandemie und des geringen Abstands im Rettungswagen, vollständig geimpft und/oder genesen sein.

Eine Aufklärung der Probanden erfolgte in mündlicher als auch schriftlicher Form. Hierzu wurde den Probanden ein Informationsbogen, eine Haftungsausschlusserklärung und eine Einverständniserklärung vorgelegt. Diese ausgehändigten Bögen wurden gemeinsam besprochen und aufkommende Fragen direkt geklärt. Jedem Probanden wurde nach der Vorlage des Informationsbogens und der Beantwortung aufkommender Fragen eine Zeit von rund einer Stunde zur Verfügung gestellt, um eine Entscheidung über die Teilnahme an den Versuchsreihen zu treffen. Diese Zeit wurde ebenfalls benötigt, um die einzelnen Versuche vorzubereiten. Jeder Proband erhielt dadurch zusätzlich einen Einblick in die Forschung. Ihm wird veranschaulicht, in welcher Umgebung die Forschung durchgeführt wurde und was den Teilnehmer erwartete. Außerdem konnten die Probanden durch dieses Vorgehen organisatorische und technische Fragen direkt stellen, falls diese aufkamen.

Die Probanden trugen bei jeder Versuchsfahrt eine Augenbinde, um das Sehvermögen einzuschränken und die Konzentration auf die taktile Wahrnehmbarkeit zu fokussieren. Es wurden dadurch mögliche Ablenkungen minimiert. Ein Täuschungsmanöver war nicht vorgesehen. Jeder Proband wurde auf einen neuen Versuch instruiert.

Im Anschluss an jede Versuchsfahrt wurden die Aussagen der Probanden auf einem Fragebogen mit jeweils zwei Fragen festgehalten.

3.2. Fahrzeug

Bei dem zur Verfügung stehenden Fahrzeug handelt es sich um einen Rettungswagen der Marke Mercedes-Benz. Dieser Sprinter des Typs 906 BA 50 ist der Kategorie Typ C der Sonderfahrzeuge zuzuordnen und verfügt über einen Fahrer- und Patientenraum. Auf das Fahrgestell der Firma Mercedes-Benz wurde ein Kofferaufbau für die medizinische Versorgung von Patienten nach DIN EN 1789 angebracht. Der Umbau erfolgte durch die Firma Fahrtec (vgl. Fahrzeugschein in Anhang VIII a).

Abbildung 3 zeigt das Fahrzeug in der schrägen Frontansicht von links.



Abbildung 3: Schräge Frontalansicht von links des in den Versuchen verwendeten Rettungswagens.

Das Fahrzeug besitzt ein Leergewicht von 4 350 kg und misst 6,57 m in der Länge und 2,22 m in der Breite. Der Fahrzeugschein ist im Anhang VIII a abgebildet. Die Breite bezieht sich auf die Breite der Karosserie ohne Spiegel und Anbauteile.

Auf Grund dessen, dass ein Rettungswagen mit seinem Leergewicht über 3,5 t liegt, fällt dieser somit in die Kategorie des Lastkraftwagens. Eine Erweiterung der Fahrerlaubnis für das Führen eines solchen Sonderfahrzeugs ist somit notwendig (vgl. Fahrzeugschein in Anhang VIII a).

Fahrer- und Beifahrersitz befinden sich rund einen Meter hinter der Vorderachse. Für eine analytische Korrelation der taktilen Bemerkbarkeit wurden ebenfalls die Aussagen der Probanden zwischen Vorder- und Hinterachse betrachtet. Die Abbildung 4 zeigt das Fahrzeug in der rückwärtigen Ansicht von schräg links. Auf der Hinterachse des Fahrzeugs befindet sich das hydraulisch gefederte Tragesystem und der Begleitsitz.



Abbildung 4: Heckansicht des Rettungswagens der Firma Fahrtec.

Ebenfalls ist die Anreihung des Begleitsitzes und der Trage in Abbildung 5 erkenntlich. Das Weiteren wurde zwischen Trage und Sitz ein senkrechter Maßstab am Boden des Patientenraumes befestigt. Der gelbe Pfeil in Abbildung 5 markiert den angebrachten Maßstab. Dieser Zollstock dient für eine spätere Höhenanalyse der Trage. Für die nachfolgende Videoanalyse wurden im Pati-

Innenraum des Rettungswagens zwei Kameras angebracht. Diese nahmen die Bewegungen der Probanden in der Seiten- und Frontalansicht auf.

Durch eine Einzelbildauswertung der Videoaufnahmen des Innenraums ist eine genaue Beurteilung der Höhendifferenz des Federwegs der Trage möglich. Die Höhe der Trage wird im Ruhezustand gemessen und durch das Ein- und Ausfedern des Tragesystems, bedingt durch die Fahrbewegungen, die Differenz ermittelt.



Abbildung 5: Innenansicht des Versuchs-RTW – Der gelbe Pfeil markiert den montierten Maßstab.

3.3. Messtechnik

Bei der gewählten Messtechnik handelt es sich um ein firmeninternes Messgerät des IFU-Hamburgs, was im Folgenden als IFU-Messbox bezeichnet werden soll.

Abbildung 6 präsentiert das verwendete Messgerät. Dieses Messgerät fügt verschiedene Sensoren sowie einen Datenlogger zu einer Einheit zusammen. Der inkludierte Datenlogger stammt von der Firma OMEGA und besitzt 16 Analogkanäle, 16 Digitalkanäle, sowie 4 Countereingänge und einer Lograte von rund 200.000 Hz. Weiter besitzt das Messgerät, welches im Folgenden IFU-Messbox genannt wird, vier interne Beschleunigungs- und Bewegungssensoren. Diese vier internen Sensoren bezeichnen sich als 1,7g-Sensor, 6g-Sensor, 50g-Sensor und Gyro-Sensor.

Der Gyro-Sensor ist ein Lage- bzw Beschleunigungssensor, welcher Drehbewegungen und oder Lageänderungen aufzeichnet. Bei den anderen drei Sensoren handelt es sich um Beschleunigungssensoren mit angegebenen Messbereichen einer Beschleunigungsmessung. Grundsätzlich erheben alle internen Sensoren Daten über ein Ereignis, welches beispielsweise das Überfahren einer Bodenwelle ist. In einer späteren Analyse wird jedoch ein einzelner Sensor auserwählt und ausgewertet. Bedingt durch den Fehler des Messsystems, auch Sensorrauschen genannt, fällt die Wahl des zu auswertenden Sensors auf das Ergebnis der Messung zurück. Werden große Beschleunigungswerte erwartet, so soll der 50g-Sensor auserwählt werden. Fallen Messdaten in einen kleineren Bereich aus, so genügt die Wahl des 6g- bzw. 1,7g-Sensors.

Im Zusammenhang mit der Auswahl des geeigneten Sensors steht ebenfalls die Fehlerangabe. Mit steigender Messkapazität nimmt der Fehler des Sensors ebenfalls stetig zu.

Die Fehler, die im Folgenden auch als Rauschen bezeichnet werden, lassich sich wie folgt angeben:

- 1,7g-Sensor: $0,3 \frac{m}{s^2}$
- 6g-Sensor: $0,336 \frac{m}{s^2}$
- 50g-Sensor: $2,3 \frac{m}{s^2}$
- Gyro-Sensor: $0,4 \frac{^\circ}{s}$

Somit beeinflusst auch die Angabe des Fehlers die Auswahl des Sensors. Für die durchgeführten Versuchsreihen dieser Arbeit wurde der 6g-Sensor verwendet.

In der Abbildung 7 ist das Frontpanel der IFU-Messbox dargestellt. Dieses besitzt auf der rechten Seite diverse Kontrollleuchten zur Überprüfung der Sensoren. Des Weiteren befinden auf der linken Hälfte drei Taster mit verschiedenen Funktionen. Über den ersten Taster wird das Messgerät ein- und ausgeschaltet. Der mittlere Taster startet und beendet eine Messung. Der Start einer Messung erfolgt vor Versuchsbeginn. Mit dem letzten Taster auf der rechten Hälfte des Frontpanels wird in der Aufzeichnung einer Messung ein sogegannter Eventmarker gesetzt (vgl. gelber Pfeil in Abbildung 7). Der Eventmarker signalisiert sowohl akustisch als auch visuell einen Zeitpunkt in der Aufzeichnung einer Messung. Visuell wird einerseits eine LED-Lampe zum Leuchten gebracht, damit auch in einer späteren Auswertung sowohl Video als auch der Datensatz synchronisiert werden kann. Weiter wird in der Datenaufzeichnung eine Markierung zur Synchronisation gesetzt.



Abbildung 6: In den Versuchen verwendete Messbox des IFU Hamburg. (Quelle: IFU-Hamburg)



Abbildung 7: Frontpanel der Messbox – die IFU-Messbox beinhaltet vier Beschleunigungssensoren, um einen großen Messbereich festzuhalten. (Quelle: IFU-Hamburg)

Diagramm 1 zeigt einen gesetzten Eventmarker in einer Aufzeichnung der Daten. Der Nullpunkt des Zeitstrahls wurde in jeder Versuchsreihe auf den Beginn des Markers gesetzt (vgl. gelber Pfeil in Diagramm 1).

Nach Auswertung der Videoaufnahmen ist dadurch eine genaue Bestimmung des Ereignisses sowie eine rechnergestützte Synchronisation möglich. Ein mögliches Anfahren des Rettungswagens, welches nicht in den eigentlichen Versuch inkludiert ist, jedoch trotzdem durch die IFU-Messbox aufgezeichnet wurde, kann somit ausgrenzt werden.

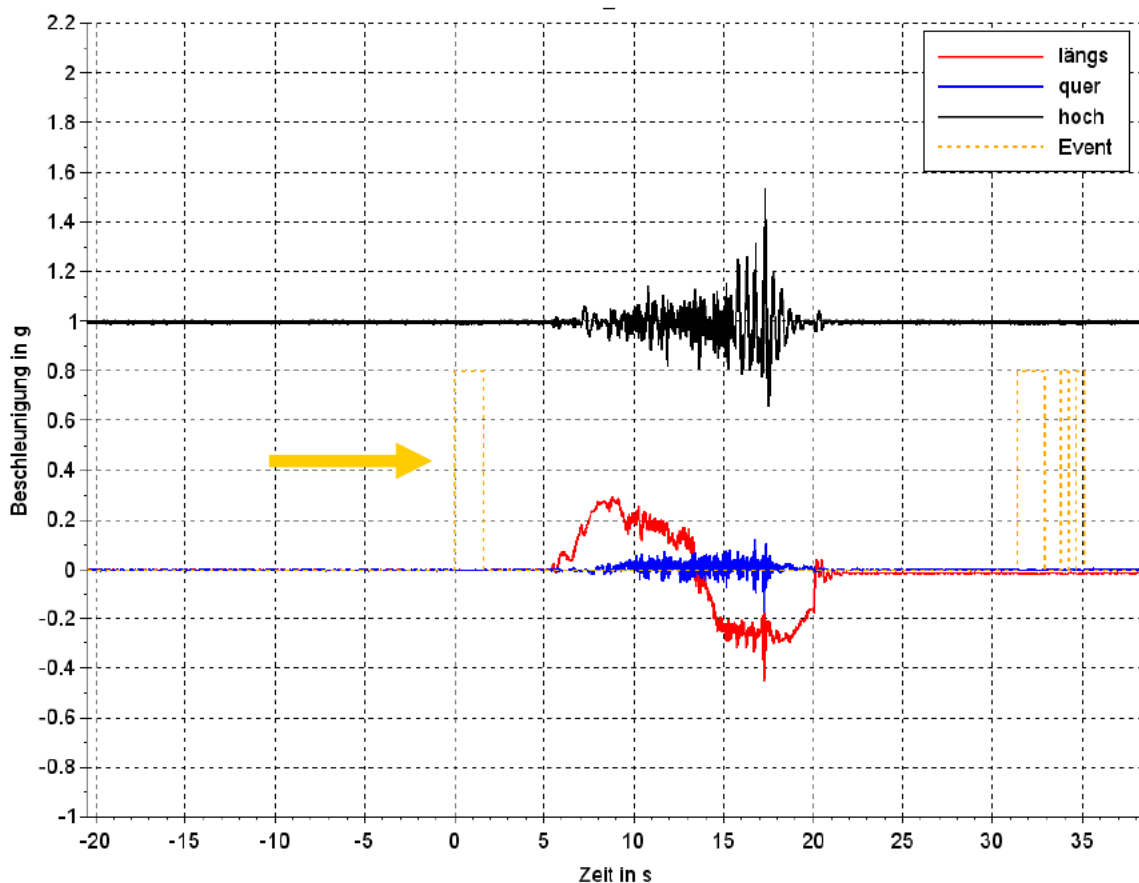


Diagramm 1: Eventmarker in Aufzeichnung der Daten. Der Nullpunkt des Zeitstrahls wurde in der Auswertung an den Marker angepasst.

Den Einfluss der Erdbeschleunigung, welcher allgegenwärtig auf einen Körper einwirkt, ist ebenfalls im Diagramm 1 ersichtlich. So pendelt der Wert der Hochbeschleunigung um den Wert 1 g. Längs- und Querschleunigung pendeln in diesem Beispiel um den Nullpunkt der Beschleunigungsskala.

Bei den durchgeführten Versuchsreihen wurden die Beschleunigung in $\frac{m}{s^2}$ angegeben. In der Biomechanik wird die Beschleunigung eines Körpers üblicherweise in g gemessen². Eine spätere Umrechnung des gemessenen Beschleunigungswertes ist dadurch möglich. Näheres wird im Abschnitt 4 *Ergebnisse* erläutert.

Die Probanden wurden zusätzlich mit jeweils zwei externen Sensoren ausgestattet, um die körperliche Belastung der jeweils korrespondierenden Lage zu analysieren. Diese externen Sensoren sind ebenfalls Beschleunigungssensoren des IFU-Hamburgs.

Die Messtechnik umfasst keine klinischen Sensoren. Klinische oder medizinische Sensoren werden als solche bezeichnet, wenn diese dem Patienten oder Probanden implantiert werden. In diesen Versuchsreihen werden externe Sensoren verwendet, die dem Probanden aufgelegt werden. Die separate Erhebung der Daten hat den Vorteil, dass Messdaten des Kopfes und der Brust getrennt voneinander betrachtet werden können. Durch die Trägheit des Körpers, wird der Kopf bei einem Fahrmanöver zunächst beschleunigt, bevor der übrige Körperbereich folgt. Der Proband trägt hierzu jeweils einen dieser Sensoren am Kopf und Oberkörper.

Abbildung 8 zeigt eine exemplarische Verwendung zweier solcher externen Sensoren. Hierbei wurde ein Sensor mit einem Mundstück am Kopf und ein weiterer Sensor auf der Brust des Probanden fixiert.

² $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$



Abbildung 8: Exemplarische Darstellung der Verwendung von Kopf- und Brustsensoren.
(Quelle: IFU-Hamburg)

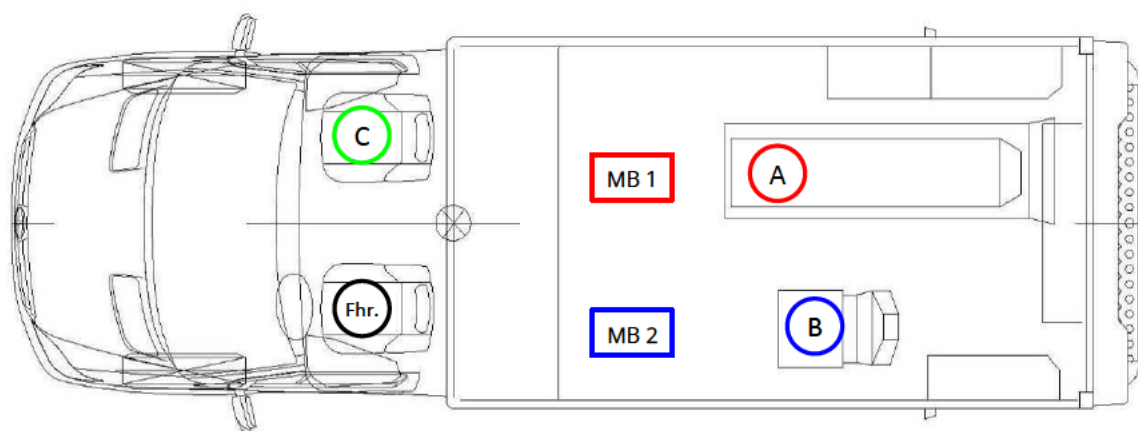
In den Versuchreihen wurden nur die Probanden A und B mit einer solchen Messtechnik ausgestattet. Der Proband C erhielt keine messtechnischen Gerätschaften. Tabelle 1 stellt die Ausstattung und Verteilung der Messtechnik dar.

Tabelle 1: Ausstattung und Verteilung der Messtechnik an die Probanden.

Proband A	Proband B	Proband C
Messbox 1 (MB 1)	Messbox 2 (MB 2)	Keine Messtechnik
Kopfsensor B	Kopfsensor A	
Brustsensor B	Brustsensor A	

Die IFU-Messbox 1 wird vor den Proband A fixiert. Proband A erhält zudem in den durchgeführten Versuchen die Kopf- und Brustsensoren B.

Vor dem Probanden B wurde die IFU-Messbox 2 installiert. Auch dieser erhält Kopf- und Brustsensoren mit der Benennung A. Abbildung 9 zeigt eine zeichnerische Darstellung des Rettungswagens in der Draufsicht. Es sind dort die Positionen der Probanden in Form von farblichen Kreisen und der Messtechnik in Form von Rechtecken eingezeichnet.



MERCEDES Sprinter 906 Rettungswagen

Abbildung 9: Zeichnerische Darstellung des Rettungswagens in der Draufsicht mit eingezeichneten Positionen der Messtechnik und der Probanden A, B und C.

Die IFU-Messboxen wurden, wie in der Abbildung 10 dargestellt, am Boden des Patientenraumes befestigt. Anschließend wurden beide Messboxen kalibriert und in der Ebene ausgerichtet. Eine angebrachte Wasserwaage mit Dosenlibelle an der Bodenplatte der IFU-Messbox war hierbei behilflich.

Im Innenraum des Patientenraumes wurden sowohl eine Kamera in der Seiten- als auch in der Frontalansicht angebracht. Abbildung 11 zeigt die Positionierung der Probanden vor jedem Versuch in der Seitenansicht. Zusätzlich dokumentiert eine weitere Kamera in der Frontalansicht den Versuchsablauf.

Für eine Aussage zur taktilen Wahrnehmbarkeit und zur Minimierung der visuellen Ablenkung trugen die Probanden Augenbinden. Der sitzende Proband

B trug den Kopfsensor in Form eines modifizierten Mundstücks. Der Brustsensor war mittels eines Tragesystems an seinen Oberkörper fixiert.

Abbildung 13 zeigt in der Frontansicht den Versuchsaufbau und die Verkabelung der Probanden. Bei beiden Probanden wurde jeweils der Brustsensor mit den Tragegurten befestigt.

Der Brustsensor wird üblicherweise in aufrechter Position getragen. Somit liegt die Besonderheit in der Ausrichtung des Brustsensors des liegenden Probanden. Durch die Darstellung des rechtshändischen Koordinatensystems in Abbildung 12 wird die übliche Ausrichtung des Brustsensors ersichtlich. Der Daumen visualisiert die Längsrichtung des Sensors. Die Querrichtung wird durch den Zeigefinger und die Hochrichtung durch den Daumen dargestellt. Die Rotationsrichtungen mit den Großbuchstaben *A*, *B* und *C* des Koordinatensystems werden als resultierende der üblichen Koordinatenrichtungen *x*, *y* und *z* dargestellt und können in diesem Beispiel vernachlässigt werden.

Abbildung 13 zeigt in der Frontansicht den Versuchsaufbau und die Verkabelung der Probanden. Bei beiden Probanden wurde jeweils der Brustsensor mit den Tragegurten befestigt.

Durch die liegende Position des Probanden A wurden die Richtungen geändert. Der Kopfsensor, welcher mittels Stirnbandes fixiert wurde, behält dabei seine ursprünglichen Aufnahmerichtungen bei. Die Nahaufnahme in Abbildung 14 zeigt den befestigten Kopfsensor am Probanden A. Die aufzuzeichnenden Beschleunigungsrichtungen wurden mit farblichen Pfeilen markiert. In Abbildung 15 sind am liegenden Probanden die geänderten Ausrichtungen des Körpersensors ersichtlich. Wie beschrieben, weichen sie von denen der Kopfsensoren ab. Die geänderten Richtungen durch die liegende wurden für eine visuelle Darstellung der aufzuzeichnenden Beschleunigungsrichtungen

farblich markiert. Abbildung 16 veranschaulicht die Ausrichtung der Kopf- und Brustsensoren des Probanden B.

Der Proband C trägt durch seine Position in der Fahrerkabine bei der Analyse der taktilen Wahrnehmbarkeit bei. Durch den Sitz nahe der Vorderachse kann es hierbei zu einer unterschiedlichen Wahrnehmung eines Ereignisses kommen. Um visuelle Ablenkungen zu minimieren, erhielt der dritte Proband auch eine Augenbinde und vermerkte seine Aussagen nach jedem Versuch ebenfalls auf einem Fragebogen.

Abbildung 17 zeigt Proband C auf dem Beifahrersitz des Rettungswagens sitzend.

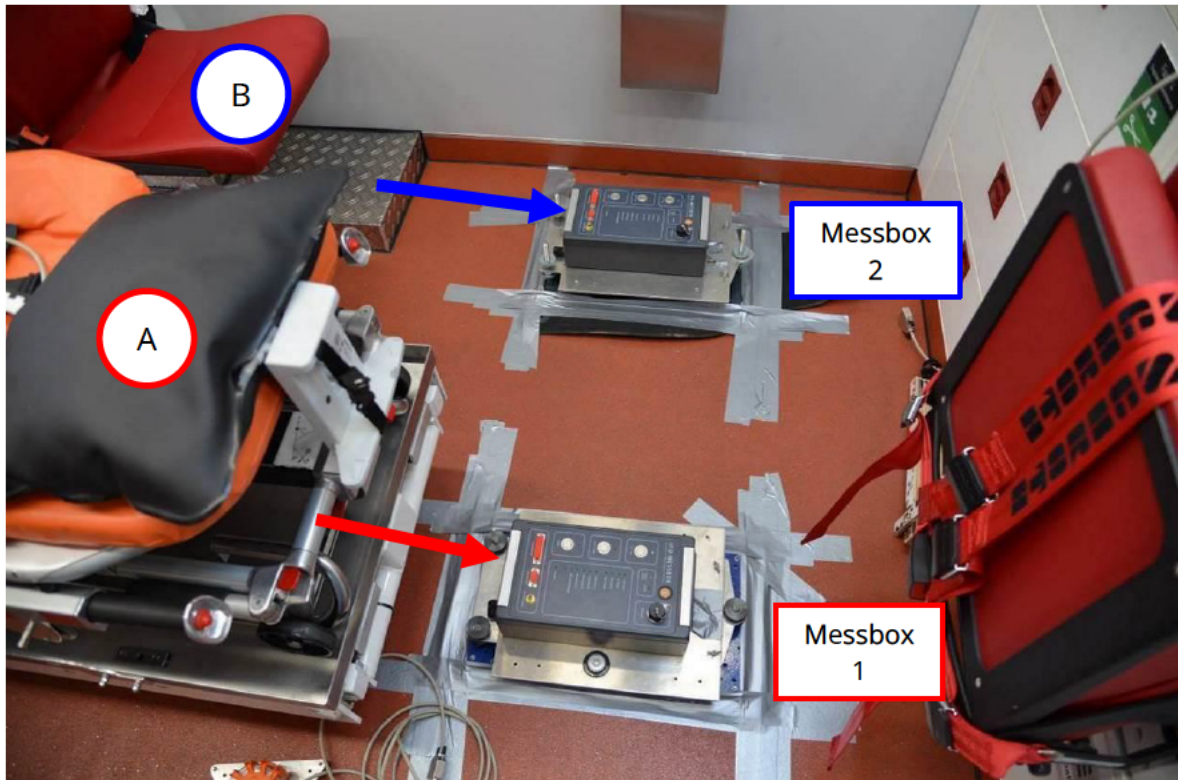


Abbildung 10: Messboxen im Patientenraum des Rettungswagens.



Abbildung 11: Anordnung der Probanden im Kofferaufbau des RTW in der Seitenansicht.

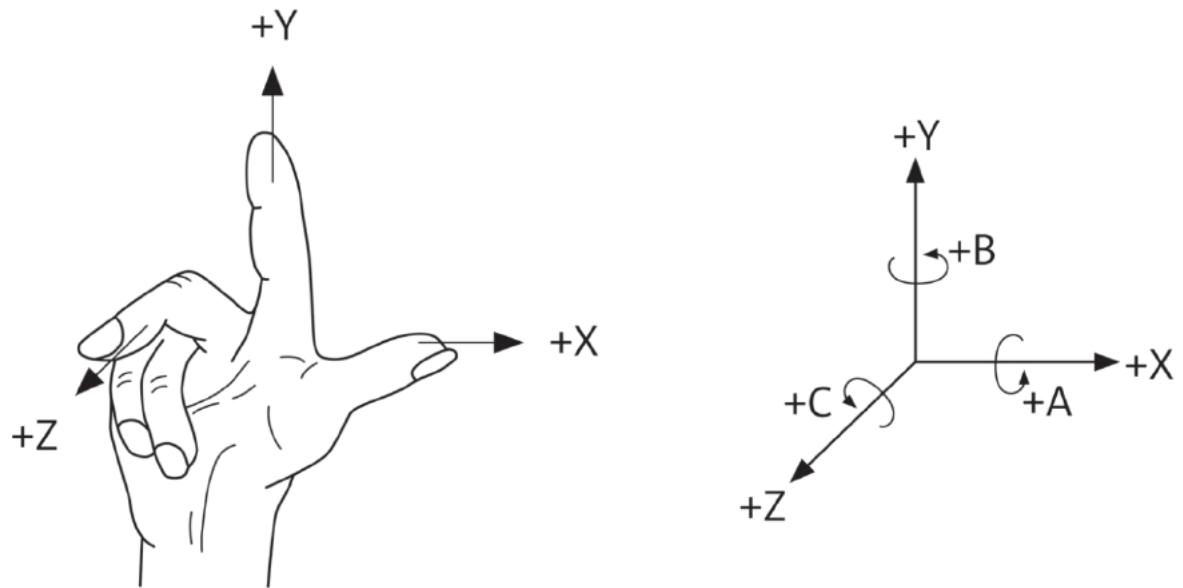


Abbildung 12: Darstellung des rechtshändigen Koordinatensystems. (Quelle: www.wiwiweb.de [aufgerufen am 25.07.2022 um 22:55 Uhr])

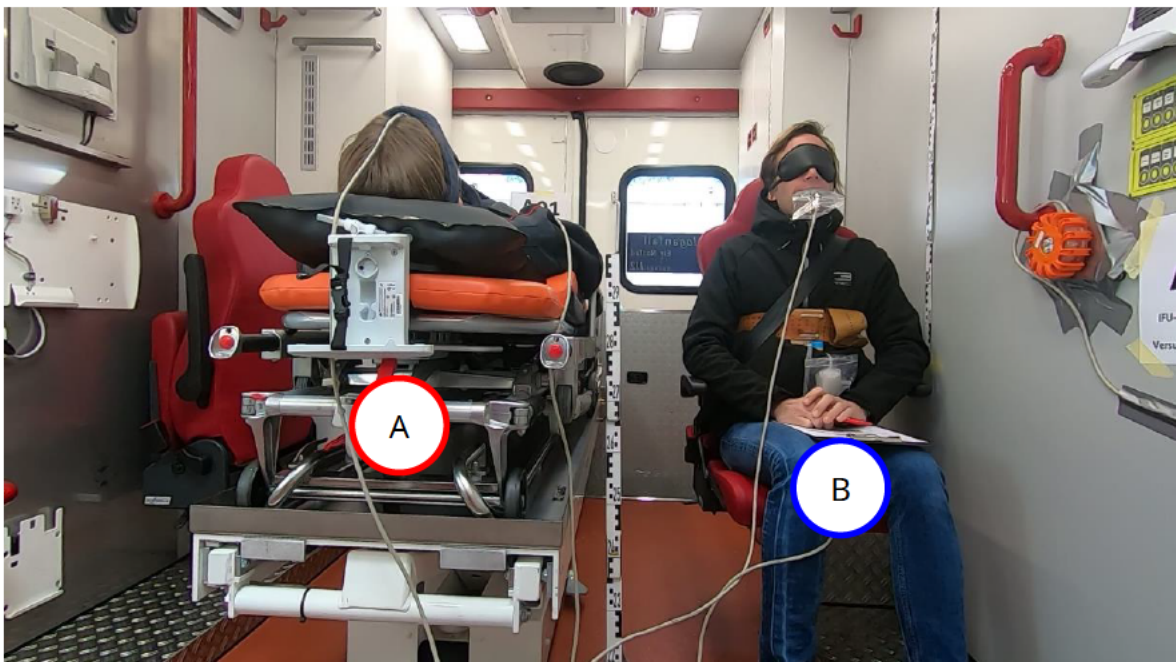


Abbildung 13: Probanden mit installierter Messtechnik und Augenbinden

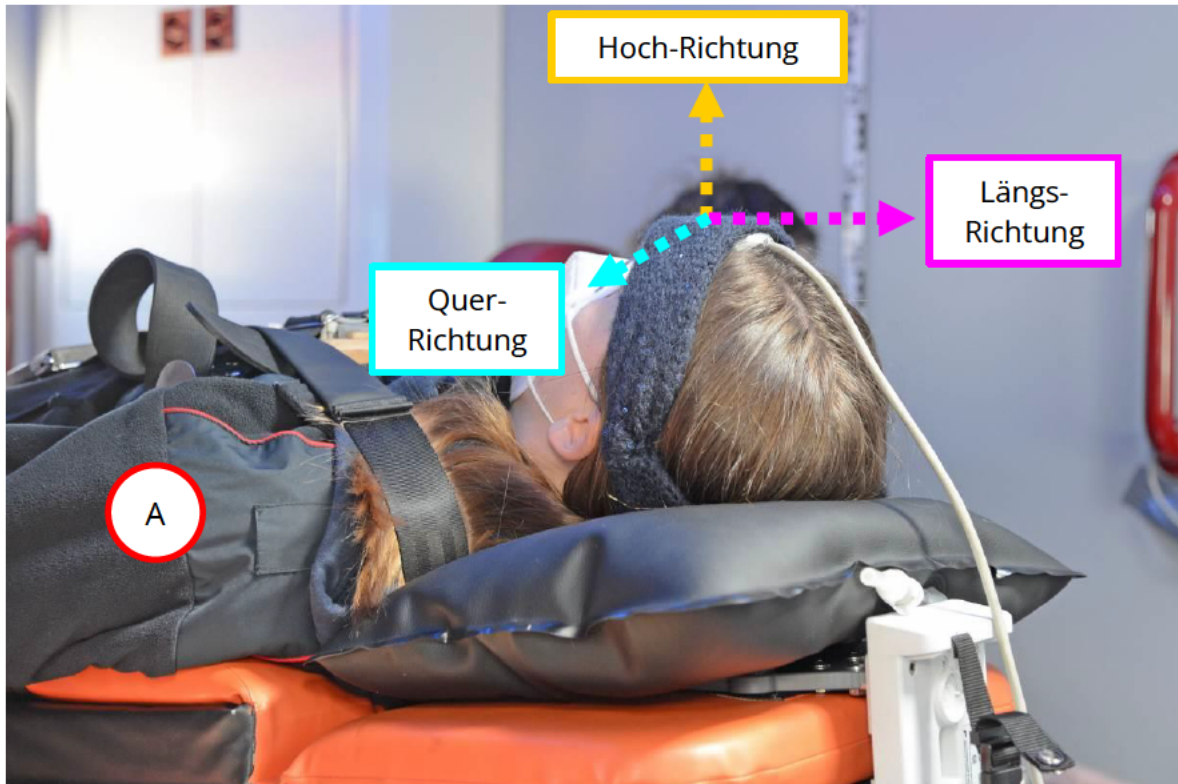


Abbildung 14: Kopfsensor der Probanden A mit dargestellten Aufnahme-Richtungen der Beschleunigung

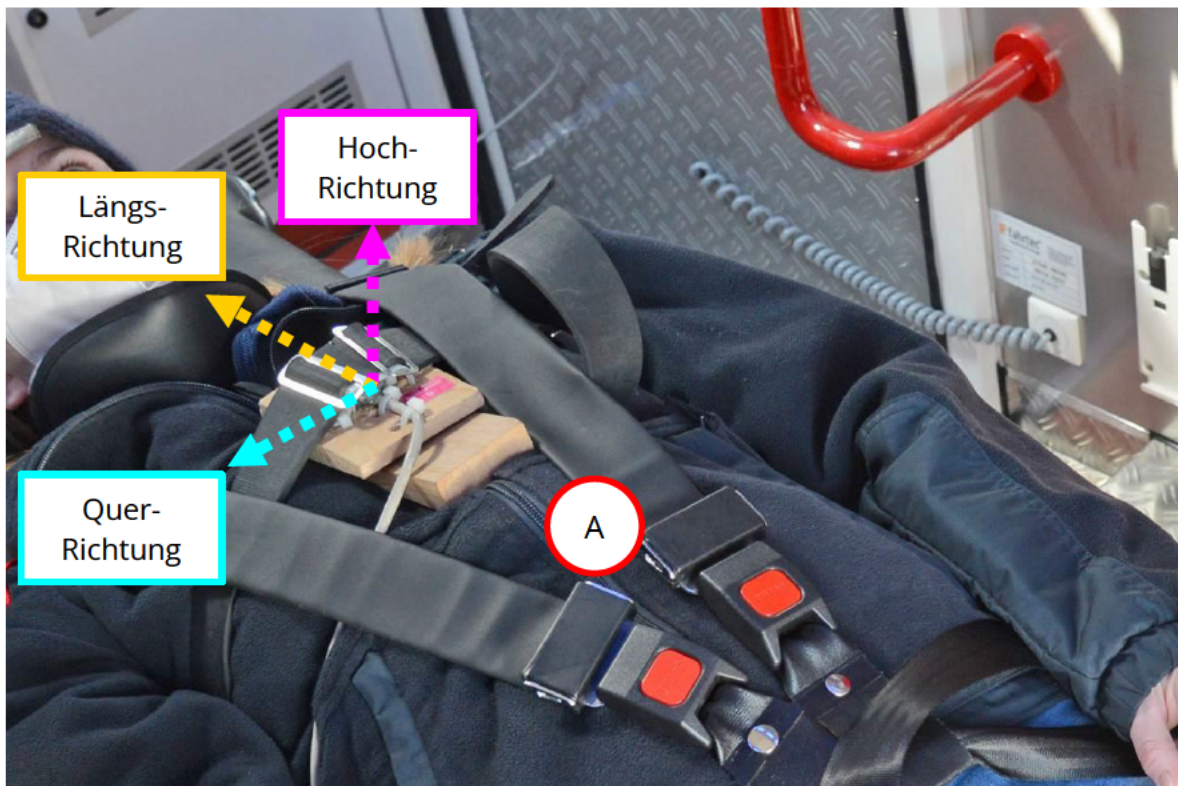


Abbildung 15: Durch das Liegen des Probanden A ändern sich die Aufnahme-Richtungen des Brustsensors.

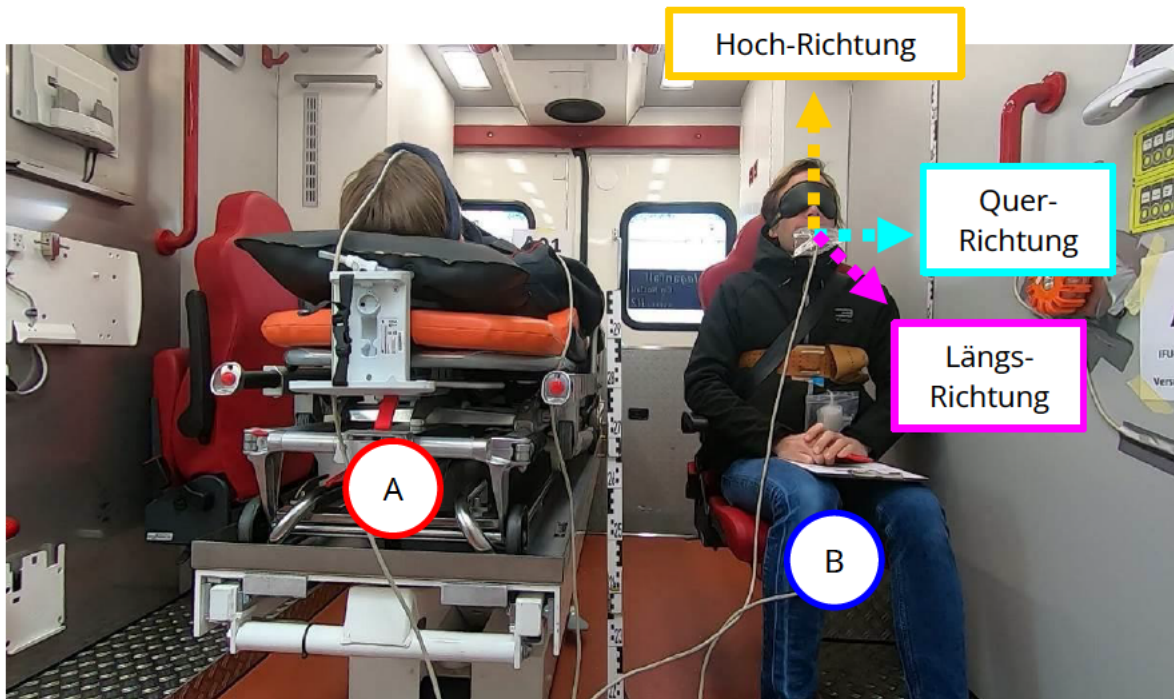


Abbildung 16: Die Aufnahme-Richtungen des Probanden B bleiben sowohl am Kopf als auch an der Brust gleich.

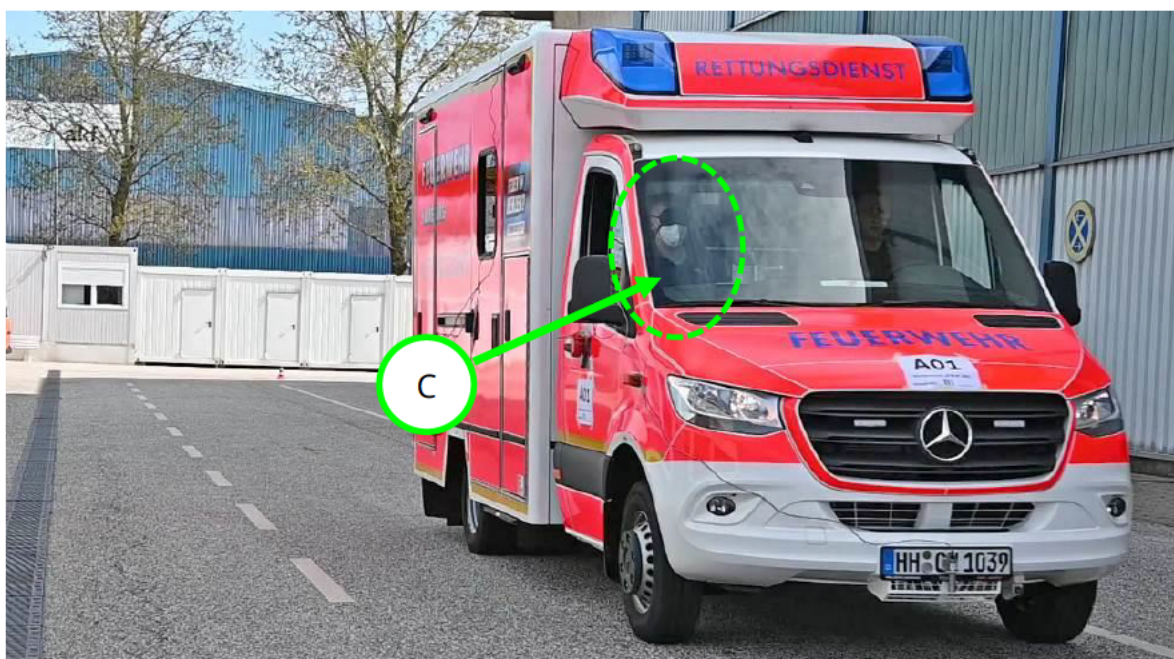


Abbildung 17: Der dritte Proband sitzt auf dem Beifahrersitz in der Fahrerkabine.

3.4. Durchführung

Nachdem auf das Fahrzeug, die Probanden und die Messtechnik eingegangen wurde, wird im folgenden Abschnitt die Durchführung der Versuche näher erläutert.

Die Positionen der teilnehmenden Probanden wurden vor Beginn der Versuchsreihen per Zufallsprinzip ausgewählt. Durch das direkte Nebeneinander-sitzen bzw. Liegen der Probanden A und B konnte im Nachgang eine direkte Korrelation der Messdaten erfolgen. Für die Erhebung der Daten wurden, wie im Abschnitt 3.3. *Messtechnik* zwei IFU-Messboxen im Fahrzeug platziert. Die Probanden wurden vor Beginn der Versuchsreihen auf ihren Plätzen vermessen und ihre Positionen fotografisch dokumentiert.

Durch Aufzeichnung der GPS-Koordinaten in jeder IFU-Messbox wurde direkt die Geschwindigkeit des Fahrzeugs aufgezeichnet. Somit wurden die Belastungswerte der Insassen mit der gefahrenen Geschwindigkeit festgehalten und konnte im Nachgang zusammenhängend analysiert werden.

Nach jedem einzelnen Versuchsdurchgang wurden die Aussage der Probanden zur taktilen Wahrnehmbarkeit auf einen Fragebogen (zwei Fragen je Versuch) festgehalten. Somit konnte in der Analyse auch auf den persönlichen Eindruck der Probanden eingegangen werden.

Für die Bild- und Videoauswertung wurden im Innenraum des Versuchs-RTW zwei Kameras in der Seiten- und Forntalansicht befestigt. Eine Übersichtsaufnahme des Versuches erfolgt durch eine weitere dritte Kamera von außerhalb.

Für die unterschiedlichen Versuche wurde eine festdefinierte Strecke in verschiedenen Geschwindigkeiten gefahren. Die Versuchsfahrten, die prinzipiell Einsatzfahrten simulieren sollen, fanden in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 15 und $60 \frac{km}{h}$ statt, wobei riskante Fahrmanöver nicht durchgeführt

wurden. Die Versuchsfahrten stellen Einsatzfahrten im normalen Straßenverkehr nach. Sie sind vergleichbar mit den Trainingsfahrten eines Fahrsicherheitstrainings des DVR.

Der Versuchsaufbau beinhaltet jedoch keine Fremdbeteiligung von anderen Fahrzeugen. Die Fahrstrecken wurden in folgende Abschnitte unterteilt: Beschleunigung, Bremsung, Kurvenfahrt und Bodenwelle. Die Bodenwelle wurde mit dem Überfahren einer Schlauchbrücke (Höhe ca. 10 cm) simuliert, um eine Belastung der Insassen nach in z-Richtung zu erhalten. Ein Vergleich zur Realität ist das Überfahren Bodenwelle oder eines Kantsteins.

Für die Erhebung der Messdaten waren drei Probanden ausreichend. Vereinfacht man die physikalische Betrachtung, so werden alle Körper, unabhängig vom Gewicht, eine gleiche Beschleunigung erfahren. Auf dieser Grundlage werden nur drei Probanden für das Forschungsvorhaben untersucht.

Die einzelnen Abschnitte der Versuche wurden in konkrete Versuchsreihen unterteilt:

- Beschleunigung auf einer geraden Strecke
- Durchführung einer Gefahrenbremsung auf einer geraden Strecke
- Fahren eines Ausweichmanövers (Lastwechsel) auf einer geraden Strecke
- Durchführung einer Gefahrenbremsung im Scheitel einer Kurvenfahrt
- Überfahren einer Bremsschwelle

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der Versuchsreihen. Die Versuchsreihen wurden mit dem Buchstaben A gekennzeichnet. Zudem wurden die durchgeführten Versuche mit aufsteigenden, arabischen Zahlen nummeriert. Die jeweiligen Unterversuche eines Versuchs wurden ebenfalls mit arabischen Zahlen in auf-

steigender Reihenfolge gekennzeichnet und durch einen Punkt voneinander getrennt.

Um die taktile Wahrnehmbarkeit der Probanden zu dokumentieren, wurde ein geeigneter Fragebogen erstellt. Dieser wurde, wie in den Abbildung 18 und 19 dargestellt ist, in den jeweiligen Versuchsreihen unterteilt.

Die Probanden konnten durch Ankreuzen jeweils ihre Einschätzung zum taktil wahrgenommenen Ereignis angeben. Dabei wurde zwischen folgenden Wahrnehmbarkeitsstufen unterschieden: 0 = nicht wahrgenommen, 1 = kaum wahrgenommen, 2 = normal wahrgenommen, 3 = stark wahrgenommen und 4 = sehr stark wahrgenommen. Weiter stand jedem Probanden für eine zusätzliche Dokumentation der Wahrnehmbarkeit vier weitere Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung. Somit konnte die taktile Wahrnehmbarkeit als ein Vibrieren, Neigen, Rütteln oder einen Schlag näher von den Probanden beschrieben werden. Zudem waren durch das Freifeld weitere, individuelle Anmerkungen möglich.

Eine Gefahrenbremsung wird definiert über das Erreichen der stärksten Bremskraft innerhalb kürzester Zeit. Hierfür muss das Bremspedal schnellstmöglich und vollständig betätigt werden (vgl. Burg & Moser 2017: 134). In den Versuchsreihen A02 und A04 wird die Beschleunigung der Probanden bei diesem Ereignis untersucht.

Tabelle 2: Durchgeführte Versuchsreihen mit deren Unterversuchen und Geschwindigkeiten.

Versuchsreihe A01 <i>Beschleunigung auf einer geraden Strecke</i>	A01.1	15 km/h
	A01.2	30 km/h
	A01.3	45 km/h
Versuchsreihe A02 <i>Gefahrenbremsung auf einer geraden Strecke</i>	A02.1	15 km/h
	A02.2	30 km/h
	A02.2	45 km/h
	A02.4	60 km/h
Versuchsreihe A03 <i>Lastwechsel auf einer geraden Strecke</i>	A03.1	15 km/h
	A03.2	30 km/h
	A03.3	45 km/h
Versuchsreihe A04 <i>Gefahrenbremsung während einer Kurvenfahrt</i>	A04.1	15 km/h
	A04.2	30 km/h
	A04.2	45 km/h
	A04.4	60 km/h
Versuchsreihe A05 <i>Überfahren einer Bodenwelle</i>	A05.1	5 km/h
	A05.2	8 km/h
	A05.2	12 km/h

Fragebogen Bemerkbarkeit der Belastung - Fahrversuche RTW

Skala: 0=nicht, 1=kaum, 2=normal, 3=stark, 4=sehr stark

Proband: _____

A01		Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch -
		A01.1	A01.2	A01.3	A01.4	A01.5	Bemerkung
Wurde eine Beschleunigung g espürt?	0	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Wie wurde die Beschleunigung w ahrgenommen?	a	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	a Vibrieren/Zittern
	b	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	b Neigen/Wanken
	c	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	c Ruck/Schlag
	d	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	d Rütteln

A02		Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch -
		A02.1	A02.2	A02.3	A02.4	A02.5	Bemerkung
Wurde eine Beschleunigung g espürt?	0	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Wie wurde die Beschleunigung w ahrgenommen?	a	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	a Vibrieren/Zittern
	b	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	b Neigen/Wanken
	c	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	c Ruck/Schlag
	d	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	d Rütteln

A03		Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch -
		A03.1	A03.2	A03.3	A03.4	A03.5	Bemerkung
Wurde eine Beschleunigung g espürt?	0	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Wie wurde die Beschleunigung w ahrgenommen?	a	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	a Vibrieren/Zittern
	b	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	b Neigen/Wanken
	c	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	c Ruck/Schlag
	d	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	d Rütteln

Abbildung 18: Fragebogen der Probanden zur Dokumentation der gespürten und wahrgenommenen Belastung in den Versuchsreihen A01 bis A03.

Fragebogen Bemerkbarkeit der Belastung - Fahrversuche RTW

Skala: 0=nicht, 1=kaum, 2=normal, 3=stark, 4=sehr stark

Proband: _____

A04		Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch -
		A04.1	A04.2	A04.3	A04.4	A04.5	Bemerkung
Wurde eine Beschleunigung g espürt?	0	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Wie wurde die Beschleunigung w ahrgenommen?	a	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	a Vibrieren/Zittern
	b	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	b Neigen/Wanken
	c	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	c Ruck/Schlag
	d	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	d Rütteln

A05		Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch -
		A05.1	A05.2	A05.3	A05.4	A05.5	Bemerkung
Wurde eine Beschleunigung g espürt?	0	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Wie wurde die Beschleunigung w ahrgenommen?	a	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	a Vibrieren/Zittern
	b	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	b Neigen/Wanken
	c	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	c Ruck/Schlag
	d	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	d Rütteln

Abbildung 19: Fragebogen der Probanden zur Dokumentation der gespürten und wahrgenommenen Belastung in den Versuchsreihen A04 und A05.

3.5. Datenspeicher und Auswertung

Im folgenden Abschnitt soll nun auf die Auswertung der Versuchsreihen eingegangen werden. Hierfür stand die firmeninterne Software des IFU-Hamburgs und die freiverfügbare Software *DAQLog* des Datenloggers der Firma OMEGA zur Verfügung.

Die erhobenen Messdaten wurden zunächst in der Messbox auf einen Datenspeicher als Datei vom Typ DAT gespeichert. Anschließend erfolgte die Umwandlung der DAT-Dateien mit der Software DAQLog in CSV-Dateien. Die gewonnenen CSV-Dateien wurden weiter mit einem firmeninternen Skript und der Software SciLab weiterverarbeitet und als PNG-Datei veranschaulicht.

Abbildung 20 zeigt das Interface der firmeninternen Software des IFU-Hamburgs.

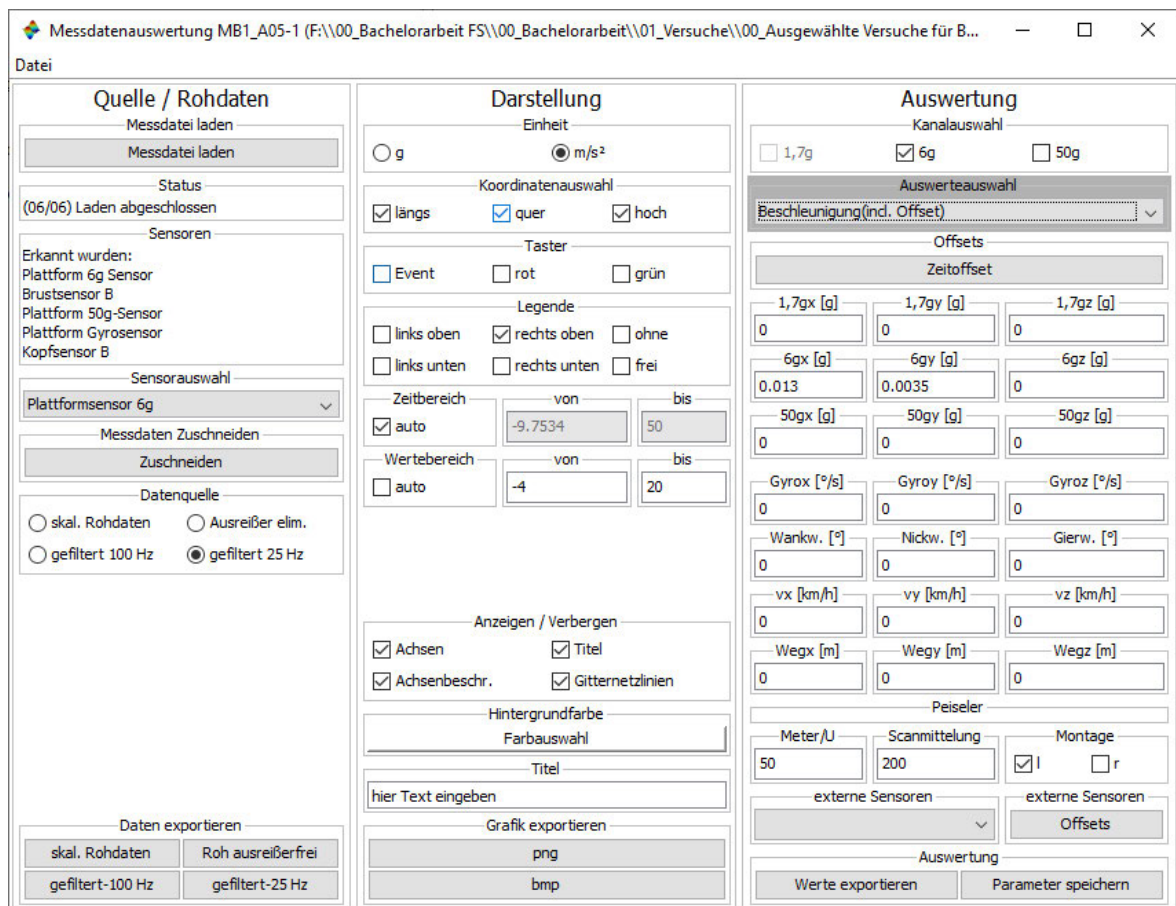


Abbildung 20: Interface der Software zur Auswertung der erhobenen Messdaten.

Zunächst wurden die gewonnenen CSV-Dateien jedes einzelnen Versuchs mit Hilfe des firmeninternen Skripts des IFU-Hamburgs in die Software SciLab geladen. Hierbei passte das Skript mit der Software den Zeitstrahl an den manuell gesetzten Eventmarker automatisch an. Im Anschluss erfolgte die Auswahl des auszuwertenden Sensors. Im Beispiel der Abbildung 21 war dies der 6g-Sensor. Dieser Sensor wurde ebenfalls für alle durchgeführten Versuchsreihen genutzt. Ebenso wurden anhand dieser Vorgehensweise auch die eingesetzten Kopf- und Brustsensoren ausgewertet.

Anschließend erfolgte eine 25 Hz-Butterworth-Filterung 4. Ordnung der Messwerte, um Ausreißer und Fehler zu minimieren. Ein solcher Filter wird ebenfalls von der SAE für Messwernerhebungen in Crashtests empfohlen. In solchen Crashtests wird eine 100 Hz-Butterworth-Filterung angewendet. Aufgrund von Unebenheiten des Asphalts und der Karosserievibration älterer Fahrzeuge, zeigte sich in vergangenen Auswertungen von Fahrversuchen des IFU-Hamburgs, dass sich ein 25 Hz-Filterung für einfache Versuchsfahrten besser bewährt. Deshalb wurde bei diesen Messwerten dieser durchgeführten Versuchsreihen eine 25 Hz-Butterworth-Filterung 4. Ordnung angewendet. Für die Auswertung wurden alle Koordinatenrichtungen auserwählt. Anschließend wurden der Wertebereich und der Offset des 6g-Sensors manuell angepasst. Abbildung 21 stellt den Zusammenhang der Benutzeroberfläche und der möglichen Grafik der Messwerte her.

Schließlich wurden die als Graphen dargestellten Messwerte als PNG-Datei gespeichert. Diese Arbeitsschritte wurden sowohl für jede der beiden IFU-Messboxen und jeden Einzelversuch durchgeführt.

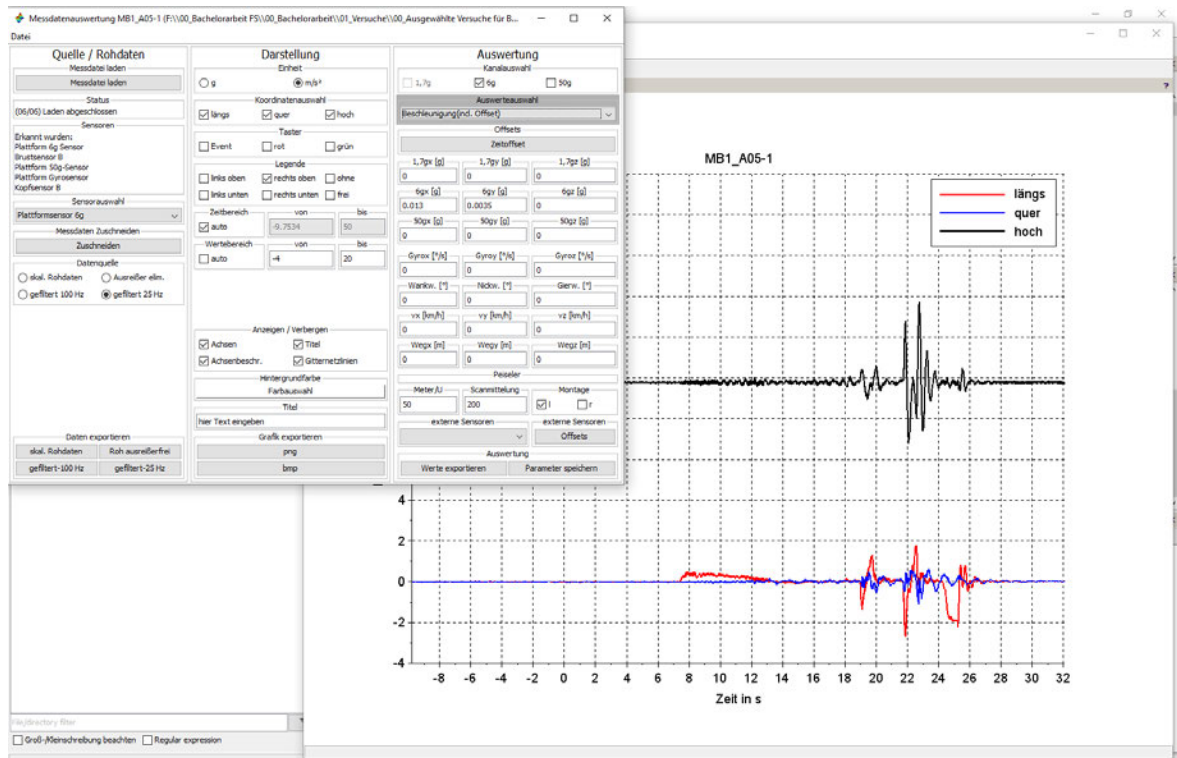


Abbildung 21: Überblick des Vorgangs der Datenauswertung.

3.6. Videoanalyse

In diesem Abschnitt wird die Analyse der Bild- und Videodateien betrachtet. Der Patientenraum des Rettungswagens wurde mit zwei Kameras ausgestattet. Zudem erfolgte die Aufnahme jedes Einzelversuchs über eine dritte Kamera von Außen.

Die drei entstandenen Videos zu jedem Versuch wurden mittels der freizugänglichen Software *Shotcut* bearbeitet und miteinander synchronisiert. Durch das Einfügen mehrerer Videoebenen, wie es in der Abbildung 22 ersichtlich ist, konnten die aufgenommen Dateien der Kameras miteinander synchronisiert werden.

Mit der entstandenen, synchronisierten Videodatei konnte nun der genaue Zeitpunkt des Ereignisses bestimmt werden. Beispielsweise war es so möglich, den genauen Zeitpunkt des Eintritts der Bodenwelle zu lokalisieren und in den aufgezeichneten Messdaten zu lokalisieren.

Zudem erhielt jede zusammengefügte Videodatei eine Überschrift, welche mittig eingesetzt wurde. Das Ergebnis einer Videodatei ist exemplarisch in der Abbildung 23 dargestellt. Die Übersicht des Versuches wurde oben mittig platziert. Die Seitenansicht des Innenraums des Kofferaufbaus des Rettungswagens wurde unten an die linke Seite angebunden. Auf der rechten Seite wurde die Frontalansicht eingebettet.

Durch die Erstellung der Einzelbilder aus jedem Video ist eine nachfolgende Auswertung der Bewegung der Probanden und der Trage möglich.

Abbildung 24 zeigt das System der Trage in Ruhe. Durch den angebrachten senkrechten Maßstab kann der Nullpunkt der Trage im Ruhezustand auf rund sechs Zentimeter über der Markierung 24 gesetzt werden. In der späteren Auswertung wird dies als Referenzwert für eine Auslenkung des Tragesystems genutzt.

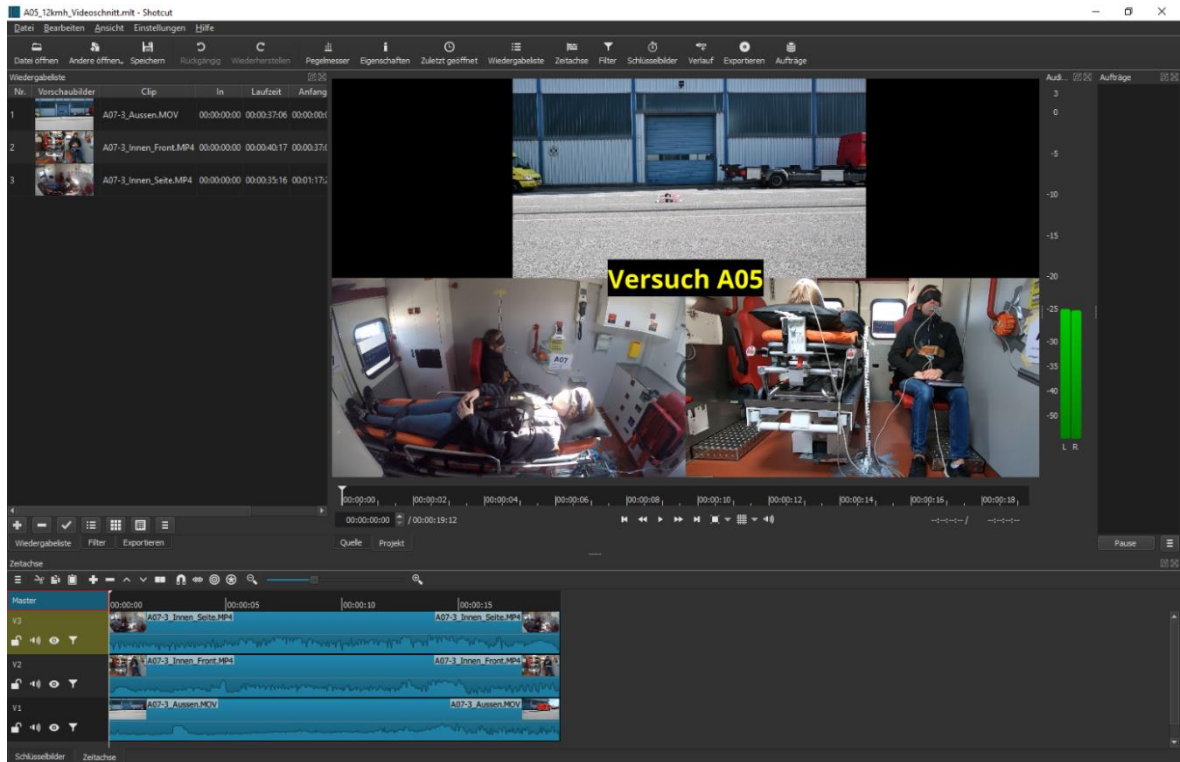


Abbildung 22: Videoanalyse mittels der Software Shotcut.



Abbildung 23: Resultat der Videoanalyse und des Zusammenschnitts.

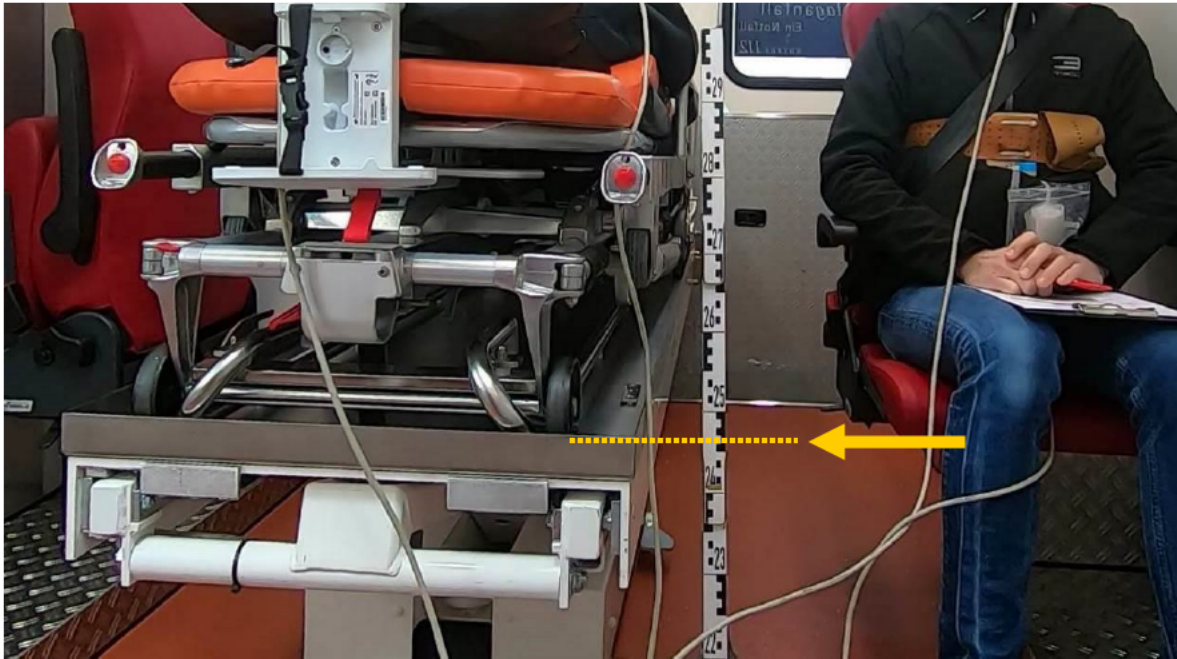


Abbildung 24: Der Nullpunkt im Ruhezustand der Trage wird auf rund 6 cm über der Markierung 24 gesetzt.

4. Ergebnisse

Nach dem alle notwendigen Vorbereitungen, Maßnahmen und Durchführungen der Versuchsreihen erläutert wurden, wird in diesem Kapitel auf die Ergebnisse der Versuchsfahrten eingegangen.

Für eine bessere Übersichtlichkeit wurde jede Versuchsreihe getrennt betrachtet und analysiert. Es lässt sich daraus eine Korrelation zu den verschiedenen Geschwindigkeiten schließen. Die prinzipielle Anordnung der Auswertung wurde daher folgend gewählt:

- Bildersequenz des Versuchs
- Diagramm der Bemerkbarkeit der Probanden
- Tabelle der Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit
- Messdaten der Messbox
- Messdaten des Kopfsensors
- Messdaten des Brustsensors

Zu Beginn jeder neuen Versuchsreihe wird exemplarische eine Bildersequenz und die Aussagen der Probanden zur taktilen Wahrnehmbarkeit dargestellt. Anschließend folgt die Untergliederung der Versuchsreihe in deren gefahrenen Geschwindigkeiten. Es folgen anschließend die Aussagen über die Beurteilung der Bemerkbarkeit in Form einer Tabelle und die Messdaten der IFU-Messboxen, der Kopf- und Brustsensoren.

Der Begriff der Beschleunigung eines Körpers wird in der vorliegenden Arbeit ebenfalls als einwirkende Belastung definiert.

4.1. Ergebnis Versuchsreihe Beschleunigung

In der ersten Versuchsreihe A01 wird die Fahrzeugbeschleunigung in allen drei Raumrichtungen untersucht. Ziel der einzelnen Versuche war, die Beschleunigung der Insassen während einer Fahrzeugbeschleunigung zu gewinnen. Hierzu beschleunigte der Rettungswagen aus dem Stand zur jeweiligen Geschwindigkeit des Unterversuchs und hielt diese dann für kurze Zeit konstant.

Abbildung 25 zeigt die Bildersequenz, indem der Ablauf der Unterversuche beispielhaft dargestellt ist.

Als Fahrweg der ersten Versuchsreihe wurde eine gerade Strecke von 65 m gewählt. Das Ereignis soll den beginnenden Transport des Patienten mit einem Rettungswagen in ein entsprechendes Krankenhaus simulieren.

Abbildung 26 stellt die Synchronisation der Videodateien der ersten Versuchsreihe beispielhaft dar. Im Anschluss an jeden Einzelversuch wurde die Aussage der Probanden auf einem Fragebogen dokumentiert.

Betrachtet man die Aussagen der Probanden zur Bemerkbarkeit der Beschleunigung, welche im Diagramm 2 dargestellt sind, so fällt auf, dass sich diese stetig zur ansteigenden Geschwindigkeit verhalten. Im ersten Versuch der Beschleunigung wurde die taktile Bemerkbarkeit als kaum wahrgenommen. In den beiden anderen Fahrversuchen empfanden die Probanden das Ereignis der Beschleunigung als normal bis stark. Über die gesamte Versuchsreihe ist anhand der Aussagen der Probanden ein stetiger Anstieg der Insassenbelastungen zu erwarten. Bei dieser Versuchsreihe ist eine Beschleunigung primär in Längsrichtung zu erwarten.

In allen Diagrammen der Versuchsreihe grenzen schwarz gepunktete Linien den Bereich des Ereignisses im Fahrversuch ein. Die grünen und orangen Hilfslinien unterstützen bei der Ermittlung der Messwerte.

In dieser Versuchsreihe liegt Proband A auf der Trage. Proband B sitzt im Begleitstuhl des Patientenraums neben der Trage. Auf dem Beifahrersitz der Fahrerkabine des Rettungswagens sitzt der dritte Proband C. Proband C wurde durch seine Position auf dem Beifahrersitz mit keiner Messtechnik ausgestattet.



Abbildung 25: Bildersequenz der durchgeführten Versuchsreihe A01.



Abbildung 26: Exemplarische Videosynchronisation der Versuchsreihe A01.

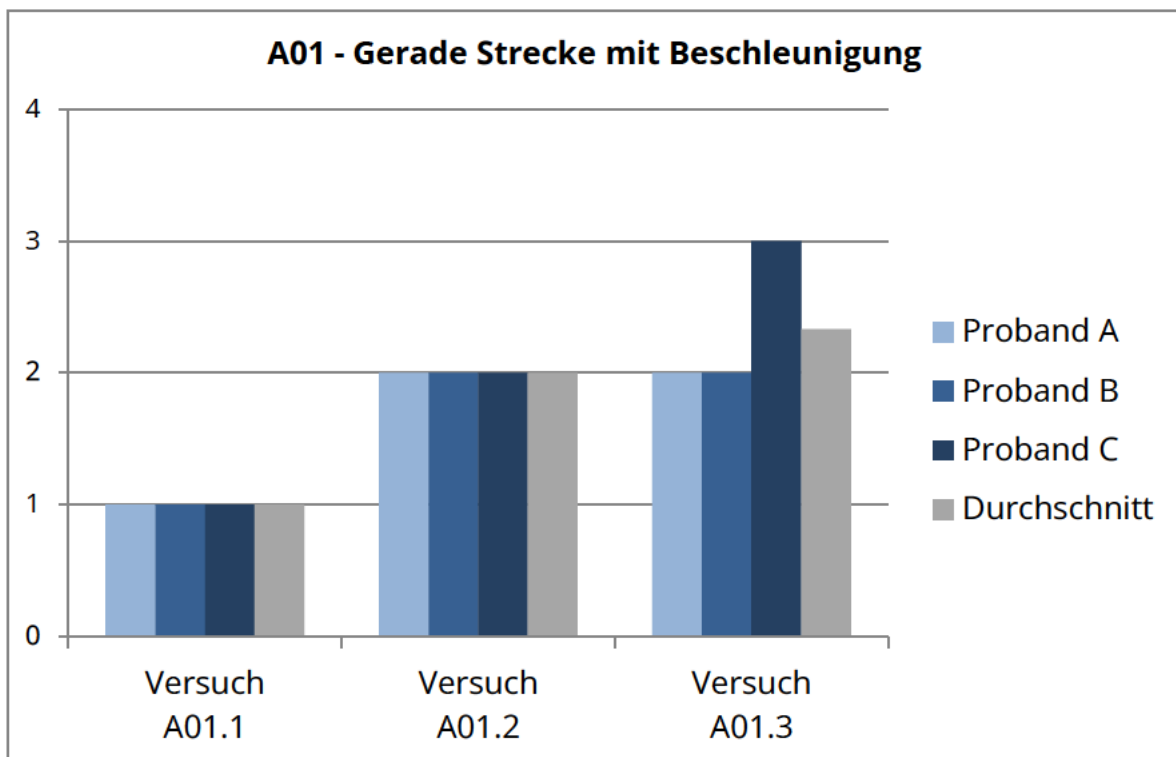


Diagramm 2: Ergebnis des Fragebogens der Bemerkbarkeit zum Versuch A01.

Skala: 0=nicht, 1=kaum, 2=normal, 3=stark, 4=sehr stark

4.1.1. Versuch A01.1 – 15 km/h

Korreliert man die Aussagen der ersten Versuchsfahrt bei $15 \frac{km}{h}$, so zeigt sich, wie in der Tabelle 3 dargestellt, dass die Probanden die Wahrnehmung des Ereignisses unterschiedlich bewerten. Proband A, welcher auf der Trage liegt, beschreibt seine Bemerkbarkeit als ein Neigen oder Wanken. Begründen lässt sich dies durch das Anheben des Vorderwagens bei Anfahrt. Das Heck des Fahrzeugs senkt sich dabei etwas ab. Diese minimale Rotation des Fahrzeugs um die Querachse ist vom liegenden Probanden A wahrgenommen worden. Auch der Proband C auf dem Beifahrersitz nimmt eine Besonderheit im Ereignis wahr. Er protokolliert dies als Ruck oder Schlag. Proband B dokumentiert bei dieser Versuchsfahrt keinerlei Wahrnehmungen.

Tabelle 3: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A01.1.

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A		✓		
Proband B				
Proband C			✓	

Betrachtet man die Messdaten auf den folgenden Seiten, so ist zu erkennen, dass das Ereignis nur wenige Sekunden andauert. In den vier Sekunden der Anfahrt des Fahrzeugs erfahren beide Probanden eine Beschleunigung von ca. $2 \frac{m}{s^2}$ in Längsrichtung. Die grüne Hilfslinie in den Diagrammen 3 und 4 markiert dieses Ergebnis. Die Beschleunigung in den anderen Koordinatenrichtungen kann dagegen als vernachlässigbar gering angesehen werden.

Die Diagramme 3 und 4 zeigen identische Kurvenläufe trotz unterschiedlicher Skalierung auf. Dies ist auf die geringe Abweichung der Positionierung der IFU-Messboxen im Patientenraum des Rettungswagens zurückzuführen.

Diagramm 5 und 6 stellen die Messdaten der beiden Kopfsensoren dar. Die Kopfbeschleunigung des Probanden A ist mit ca. $2,5 \frac{m}{s^2}$ in Längsrichtung im Di-

Diagramm 5 abzulesen (vgl. grüne Hilfslinie). Diagramm 6 zeigt die Messdaten des Kopfsensors des Probanden B. Nach Abzug des Offsets ergibt sich ein Belastungswert von ca. $2 \frac{m}{s^2}$.

Die Messwerte der Brustsensoren des Probanden A und B werden in den Diagrammen 7 und 8 dargestellt. Der Wert der Brustbelastung des Probanden A, welcher auf der Trage liegt, beträgt ca. $2,5 \frac{m}{s^2}$ in Längsrichtung. Einen kleinen Unterschied weist der erhobene Messwert des Probanden B auf. Proband B erfährt, entgegen seiner dokumentierten Wahrnehmung, eine Beschleunigung in Längsrichtung von ca. $2,8 \frac{m}{s^2}$ (vgl. grüne Hilfslinie).

Als Fazit kann über diesen Einzelversuch die Aussage getroffen werden, dass beide Probanden im Patientenraum etwa die gleiche körperliche Beschleunigung erfahren. Die Messdaten des Probanden B können aufgrund der sitzenden Position ebenfalls auf den Probanden C übertragen werden.

Versuch A01.1 - Messdaten der IFU-Messboxen

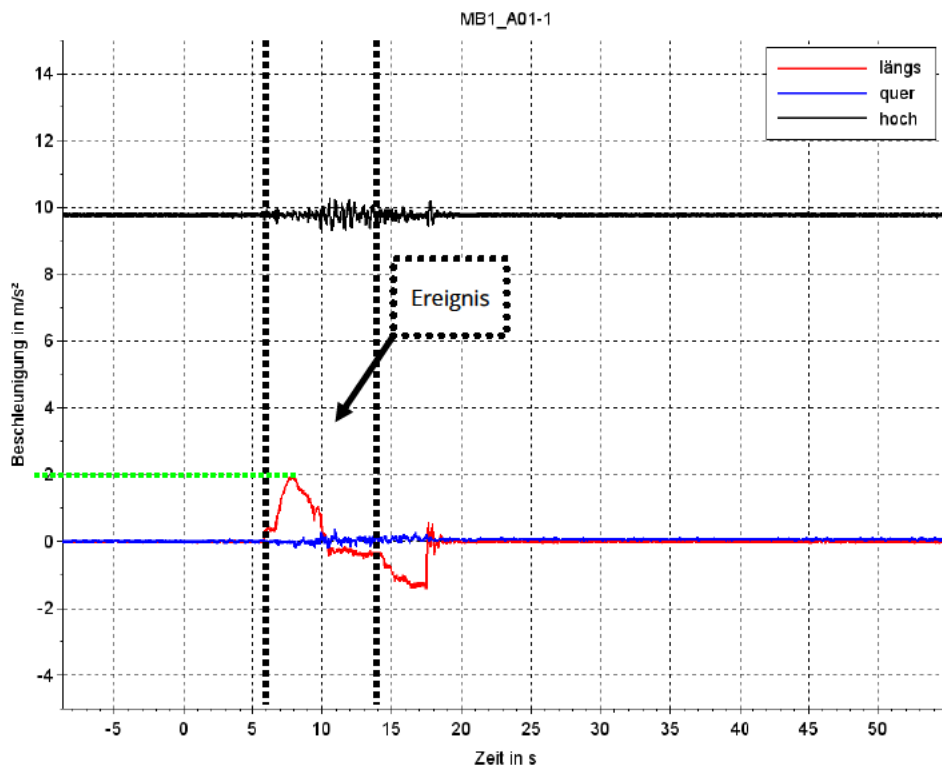


Diagramm 3: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A01.1.

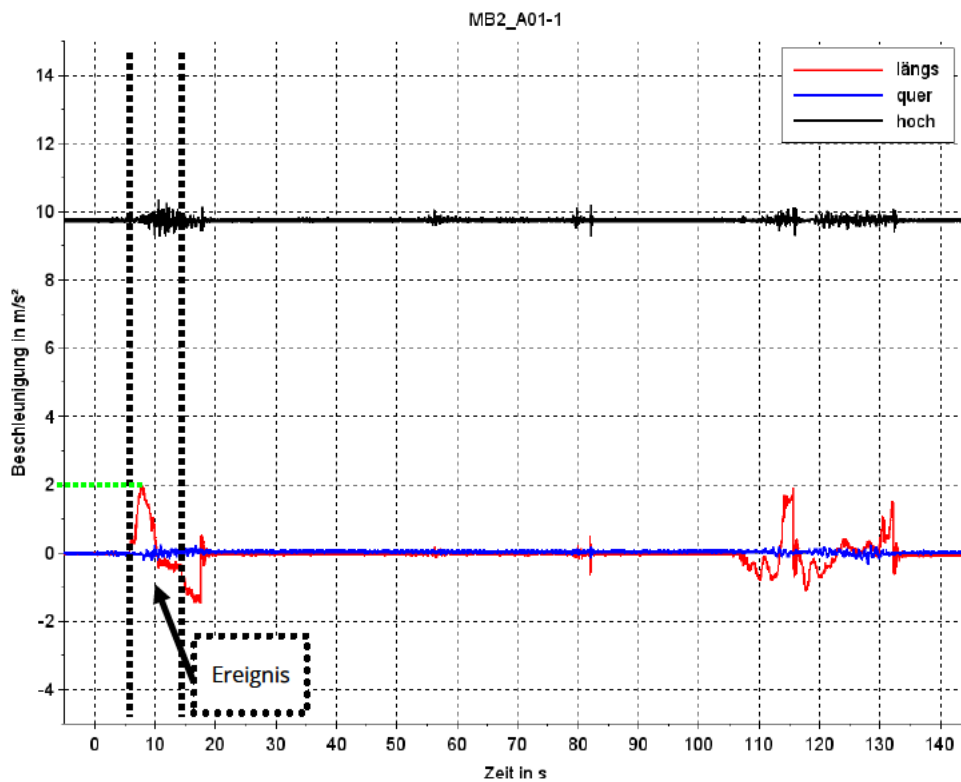


Diagramm 4: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A01.1.

Versuch A01.1 - Messdaten der Kopfsensoren

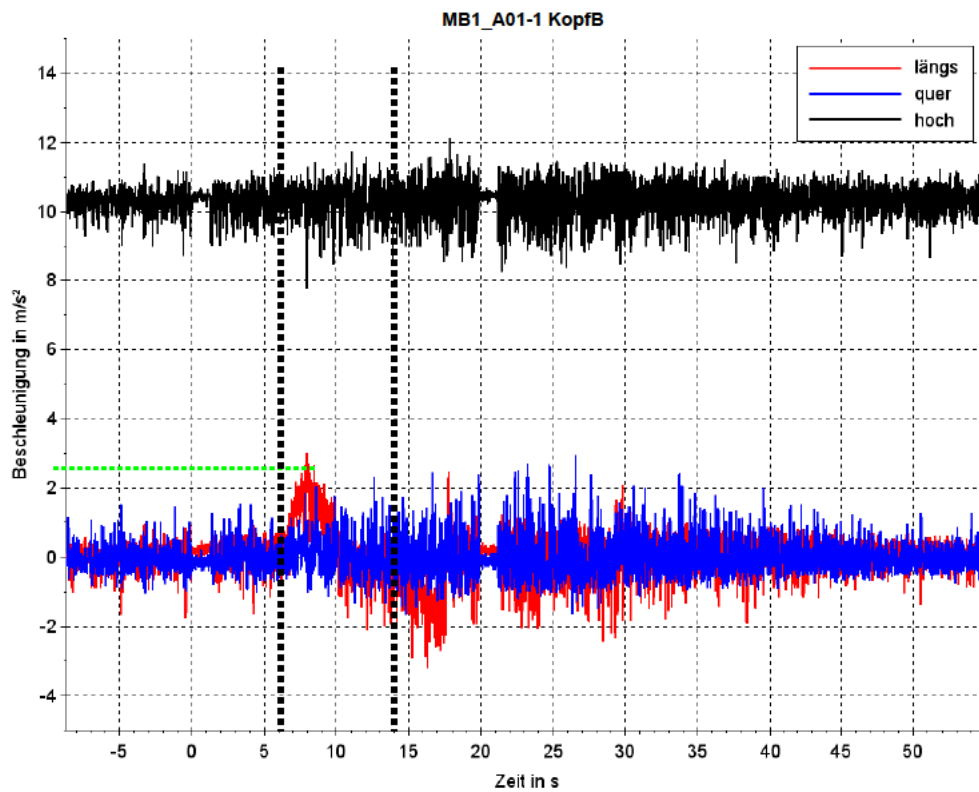


Diagramm 5: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A01.1.

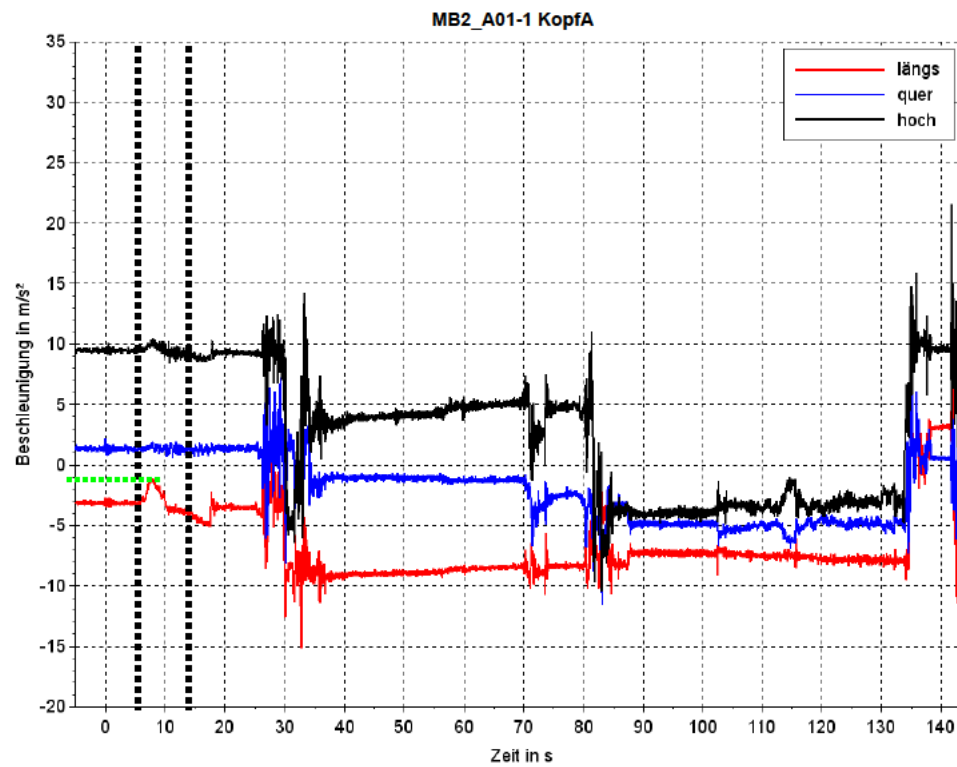


Diagramm 6: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A01.1.

Versuch A01.1 - Messdaten der Brustsensoren

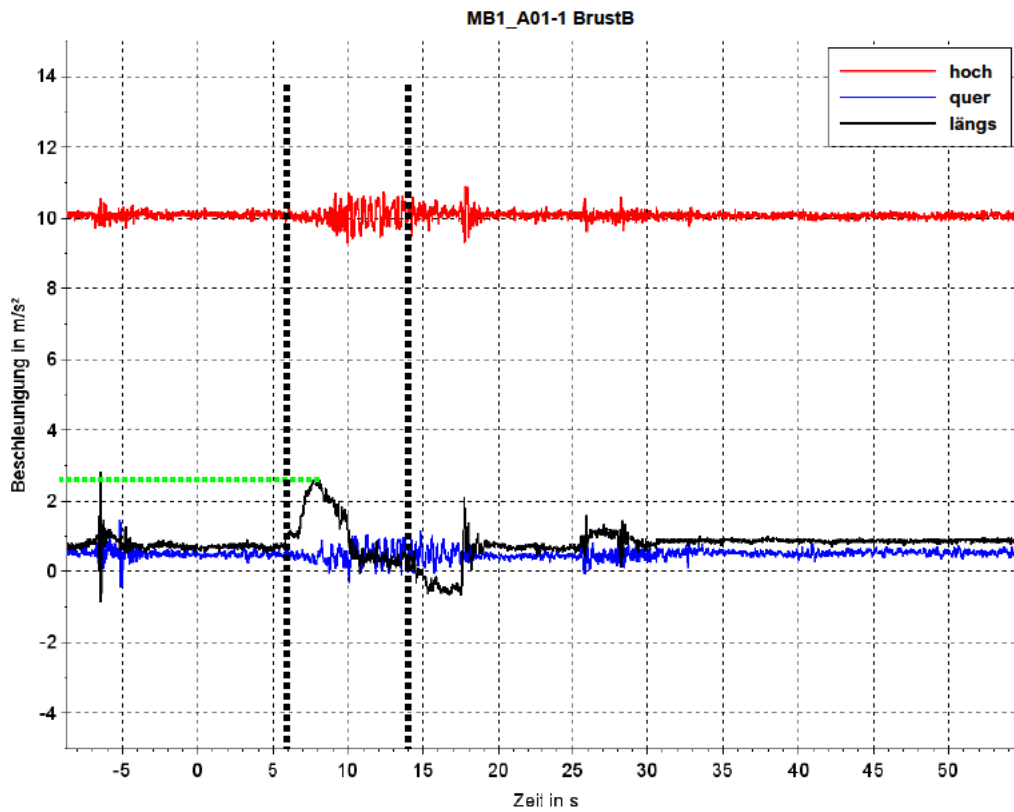


Diagramm 7: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A01.1.

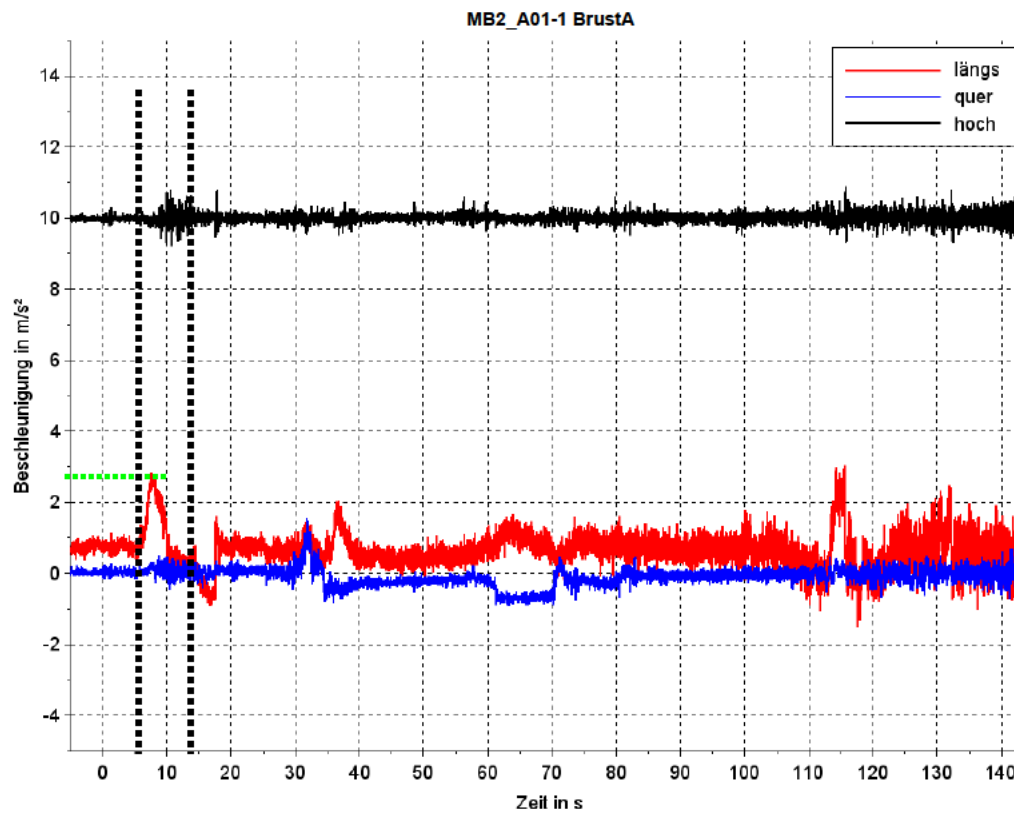


Diagramm 8: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A01.1.

4.1.2. Versuch A01.2 – 30 km/h

Im zweiten Fahrversuch der ersten Versuchsreihe wird die gefahrene Geschwindigkeit von ca. $30 \frac{km}{h}$ untersucht. Die Probanden A und B dokumentieren, wie in der Tabelle 4 gezeigt, ein Neigen des Rettungswagens. Proband C, welcher auf dem Beifahrersitz positioniert ist, nimmt einen Ruck des Fahrzeugs wahr.

Das Neigen des Fahrzeugs kann auf den Moment des Anfahrens zurückgeführt werden. Hierbei hebt sich die Front des Rettungswagens an, während sich zeitgleich das Heck des Fahrzeugs absenkt. Den Ruck, welchen der Proband C dokumentiert, lässt sich ebenfalls durch das zügige Anfahren des Versuchsfahrzeugs erklären.

Tabelle 4: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A01.2.

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A		✓		
Proband B		✓		
Proband C			✓	

Der zugehörige Graphenverlauf ist in den Diagrammen 9 und 10 zu kennen. Beide Diagramme der IFU-Messboxen liefern einen Wert der Beschleunigung in Längsrichtung von ca. $2,9 \frac{m}{s^2}$ (vgl. grüne Hilfslinie im Diagramm 9 und 10). Die identische Ausführung des Kurvenverlaufs ist nachvollziehbar auf die ähnliche Positionierung im Patientenraum zurückzuführen. Die Beschleunigung der anderen Koordinatenrichtungen ist sehr gering und somit als vernachlässigbar anzusehen.

Die ausgewerteten Messdaten der Kopfsensoren sind in den Diagrammen 11 und 12 ersichtlich. Das Rauschen des Sensors, welches im Diagramm 11 abgebildet ist, lässt einen Wert der körperlichen Beschleunigung von ca. $3,8 \frac{m}{s^2}$ in Längsrichtung ablesen (vgl. grüne Hilfslinie). Hierbei handelt es sich um die

Belastung des liegenden Patienten, welcher auf der Trage positioniert ist. Im Diagramm 12 sind die Messwerte des Kopfsensors des Probanden B dokumentiert. Der Sprung der Messwerte lässt sich durch die Empfindlichkeit der Sensoren ableiten. Bewegt sich der Kopf des Probanden ruckartig oder neigt er den Kopf während des Eintritts des Ereignisses, so können Die Messwerte verfälscht werden. Somit kann der Offset der Beschleunigung in Längsrichtung durch eine solche Kopfbewegung erklärt werden.

Die gemessene Beschleunigung des Oberkörpers des Probanden A ist im Diagramm 13 dargestellt. Durch die veränderte Position des Sensors am Probanden, wechseln, wie bereits erwähnt, Hoch- und Längsrichtung in der Erhebung. Es zeigt sich, dass die körperliche Belastung des Probanden B im Brustbereich rund $3,8 \frac{m}{s^2}$ beträgt (vgl. grüne Hilfslinie). Vernachlässigt man das Rauschen des Brustsensors im Diagramm 14, so ergibt sich ein etwa gleicher Belastungswert in Längsrichtung für den Probanden B, welcher auch dem Sitz positioniert war.

Als Fazit kann über den zweiten Einzelversuch der Versuchsreihe A01 die Aussage getroffen werden, dass erneut beide Probanden etwa die gleiche körperliche Beschleunigung erfahren. Analog können die Messdaten des Probanden B auf den Probanden C übertragen werden.

Versuch A01.2 - Messdaten der IFU-Messboxen

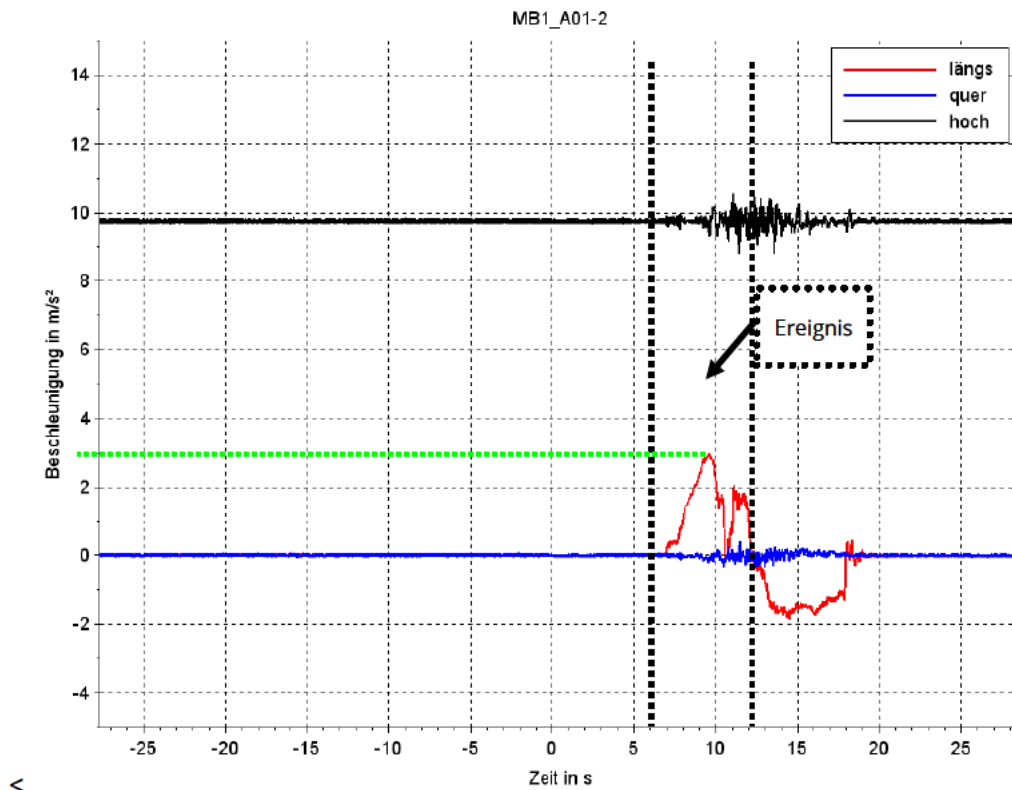


Diagramm 9: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A01.2.

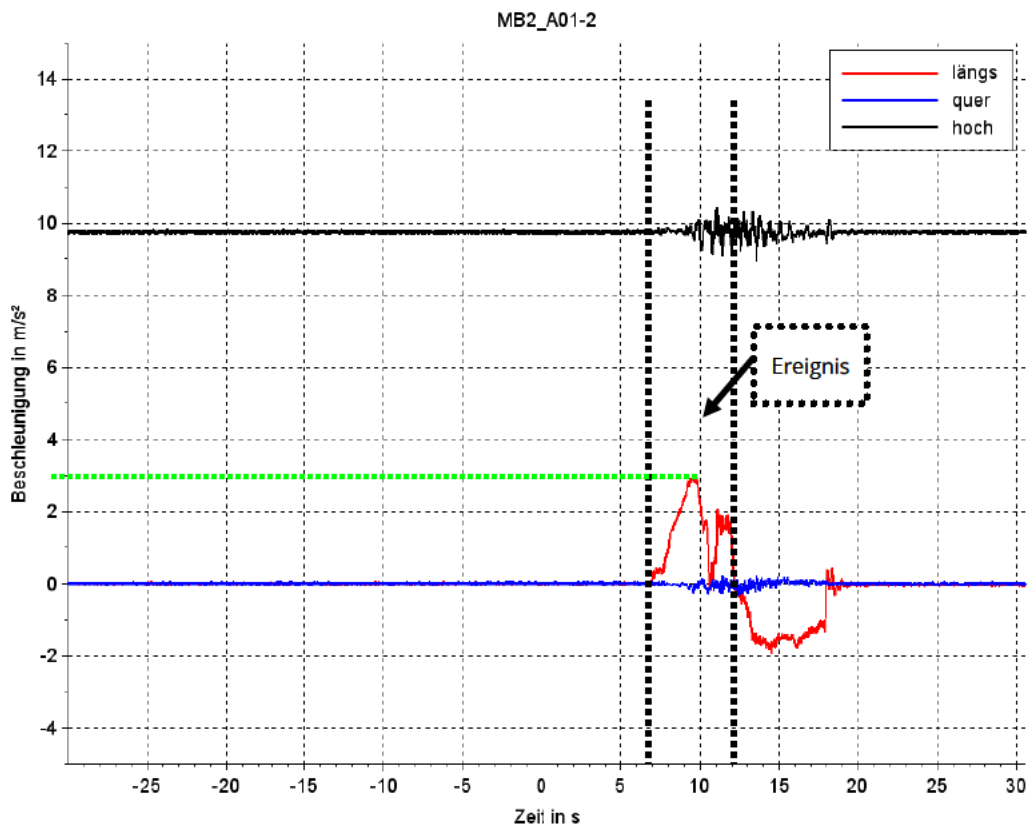


Diagramm 10: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A01.2.

Versuch A01.2 - Messdaten der Kopfsensoren

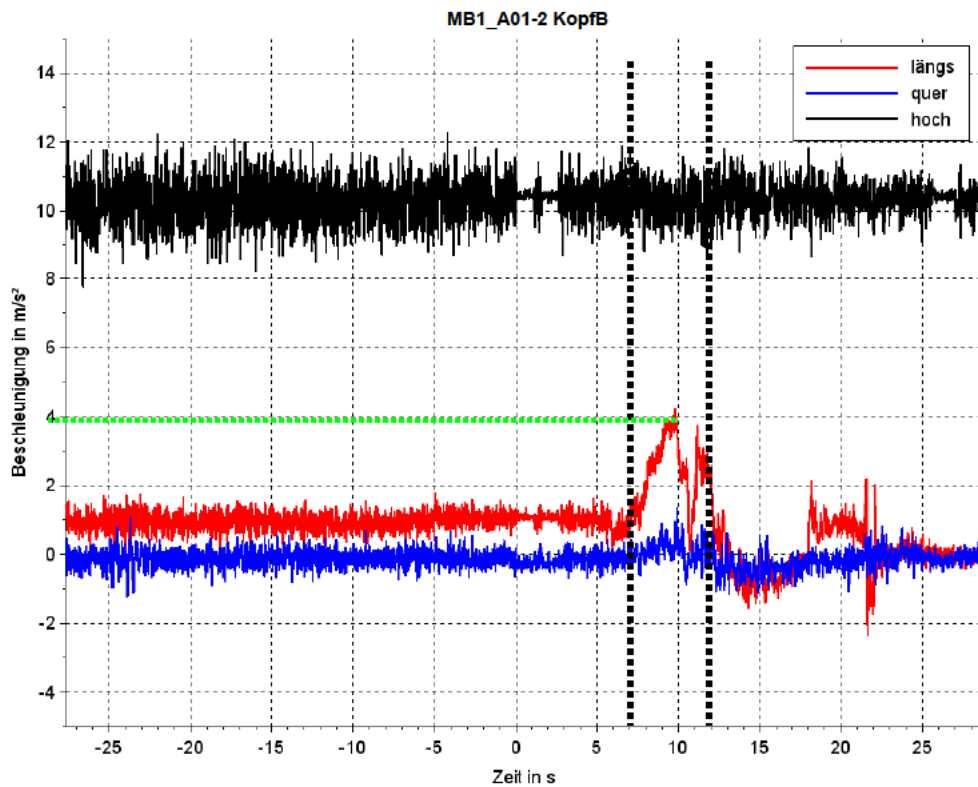


Diagramm 11: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A01.2.

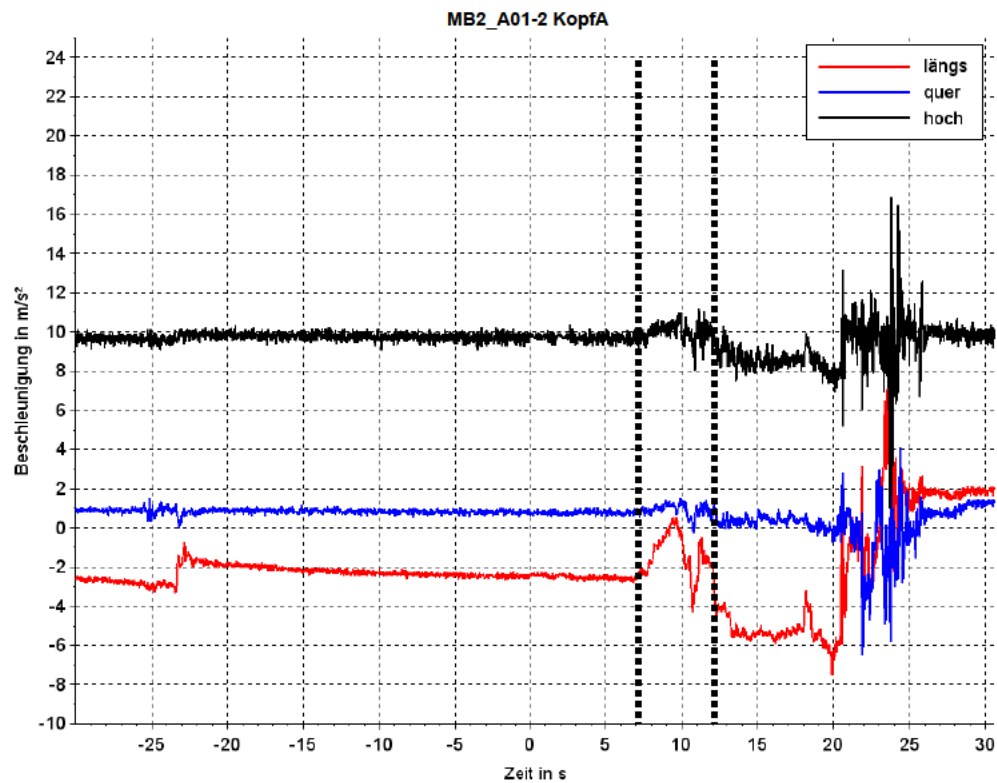


Diagramm 12: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A01.2.

Versuch A01.2 - Messdaten der Brustsensoren

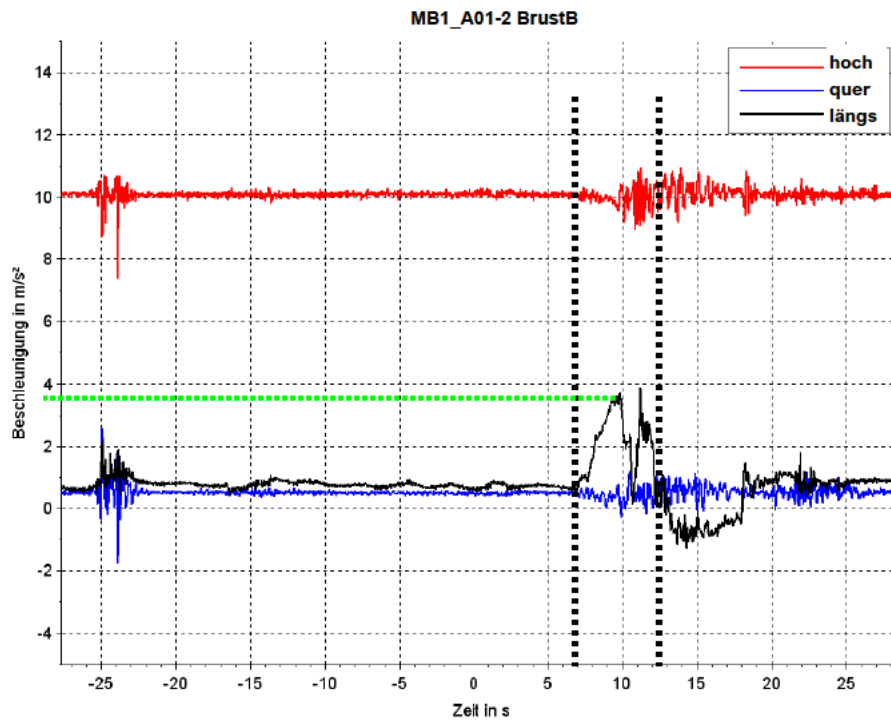


Diagramm 13: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A01.2.

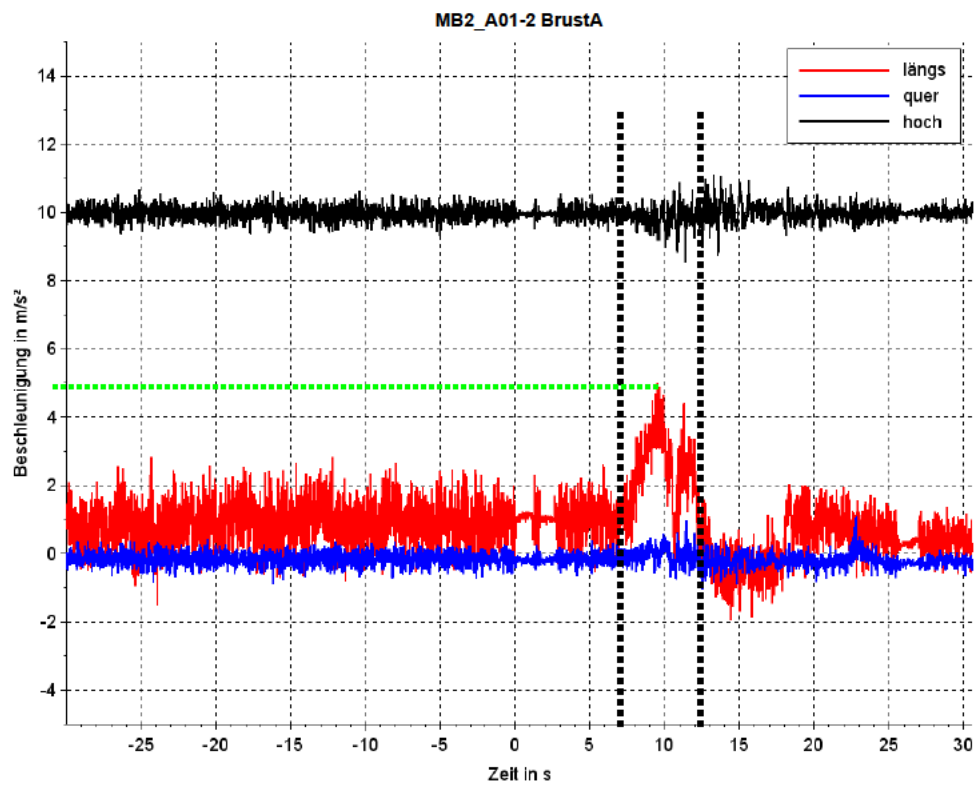


Diagramm 14: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A01.2.

4.1.3. Versuch A01.3 – 45 km/h

Im letzten Versuch der Versuchsreihe beträgt Geschwindigkeit ca. $45 \frac{km}{h}$. Hier zeigen sich keine Unterschiede der taktilen Wahrnehmung der Probanden zur vorherigen Versuchsfahrt. Proband A und B nehmen, wie in der Tabelle 5 dargestellt, ein Neigen und Wanken des Rettungswagens wahr. Proband C, welcher ebenfalls in den ersten beiden Versuchen einen Ruck bemerkte, dokumentiert auch in diesem Einzelversuch einen Ruck.

Erläuterungen hierzu wurden bereits in den Versuche A01.1 und A01.2 verfasst.

Tabelle 5: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A01.3.

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A		✓		
Proband B		✓		
Proband C			✓	

Auf den folgenden drei Seiten sind die ausgewerteten Messdaten der verschiedenen Sensoren dargestellt. Anhand des Diagramms 15 und 16 lässt sich entnehmen, dass die Beschleunigung des Probanden in Längsrichtung bei ca. $2,8 \frac{m}{s^2}$ liegt. Der Rückgang der Beschleunigung in Längsrichtung ist auf die abweichende Anfahrt des Fahrers des Rettungswagens zurückzuführen. Anhand des Vergleiches der Kurvenverläufe in den Versuchen A01.2 und A01.3 der IFU-Messboxen ist zu erkennen, dass im vorangegangenen Versuch ein steilerer Anstieg vorlag und somit mit einer höheren Beschleunigung des Fahrzeugs auszugehen ist. Auch die Synchronität der Kurvenverläufe der Diagramme 15 und 16 ist wiederum zu erkennen.

Die Auswertung der Kopfsensoren der beiden Probanden im Patientenraum ist in den Diagrammen 17 und 18 ersichtlich. Auch hier liegt eine Beschleunigung überwiegend in Längsrichtung vor. Eine Belastung in Hoch- und Quer-

richtung kann aufgrund des niedrigen Ausschlags vernachlässigt werden. Der Proband auf der Trage erfährt in diesem Fahrversuch eine Belastung des Kopfes in Längsrichtung von ca. $3 \frac{m}{s^2}$. Begründet ist dieser Wert durch den Offset in negativer Richtung des Kurvenlaufs von etwa $0,5 \frac{m}{s^2}$. Addiert man diesen Wert zum ablesenden Wert von ca. $2,5 \frac{m}{s^2}$, so ergibt sich die resultierende Belastung in Längsrichtung von ca. $3 \frac{m}{s^2}$. Der gleiche Arbeitsschritt erfolgt im Diagramm 18. Der Offset in Längsrichtung beträgt ca. $1,5 \frac{m}{s^2}$. Fügt man nun den maximalen Wert des Ausschlags von rund $1 \frac{m}{s^2}$ hinzu, so erhält man als Lösung den Belastungswert des Kopfes des Probanden B von rund $2,5 \frac{m}{s^2}$.

Die Begründungen eines solchen Offsets sind vielschichtig. Als häufigste Ursache wird die Empfindlichkeit der externen Sensoren benannt. Die Sensoren können beispielsweise durch ein Neigen oder Senken des Kopfes während eines Ereignisses beeinflusst werden.

Ein solcher Offset ist ebenfalls in den Daten der Brustsensoren ersichtlich. Die erhobenen Werte dieser Sensoren sind in den Diagrammen 19 und 20 dargestellt. Im Diagramm 19 ist ein Offset in positiver Richtung von ca. $1 \frac{m}{s^2}$ der Kurve zu verzeichnen. Durch Subtraktion des Offsets vom Maximalwert der Beschleunigung erhält man die Lösung. Es ergibt sich daraus eine gemessene Beschleunigung in Längsrichtung von rund $3 \frac{m}{s^2}$, die auf den Probanden A einwirkt. Eine gleiche Beschleunigung kann für den Probanden B ausgesagt werden. Die Messwerte des sitzenden Probanden B sind im Diagramm 20 dargestellt.

Als Fazit kann über den letzten Einzelversuch der Versuchsreihe A01 ausgesagt werden, dass beide Probanden A und B in etwa die gleiche körperliche Beschleunigung erfahren. Die Messdaten des Probanden B können zudem auf den Probanden C übertragen werden.

Versuche A01.3 - Messdaten der IFU-Messboxen

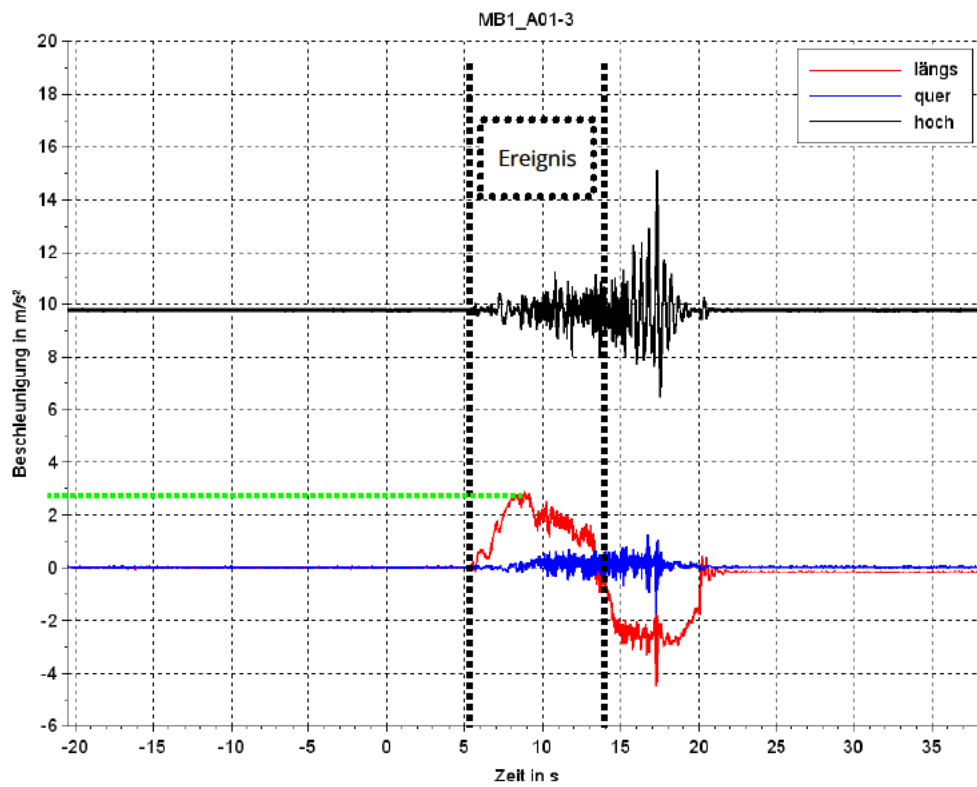


Diagramm 15: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A01.3.

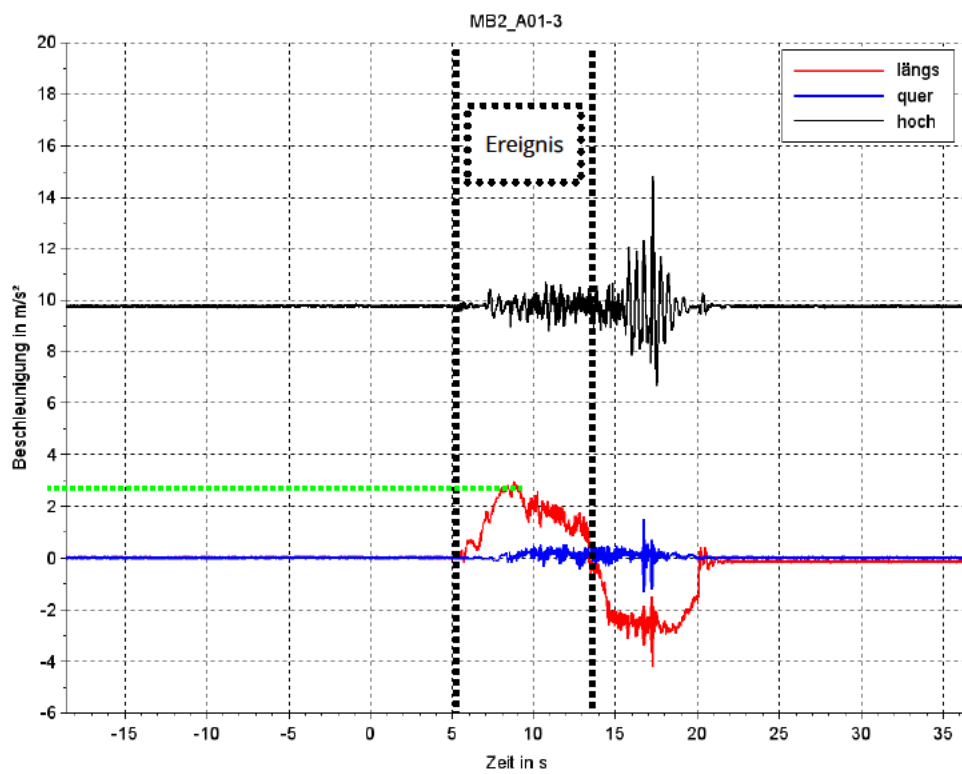


Diagramm 16: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A01.3.

Versuche A01.3 - Messdaten der Kopfsensoren

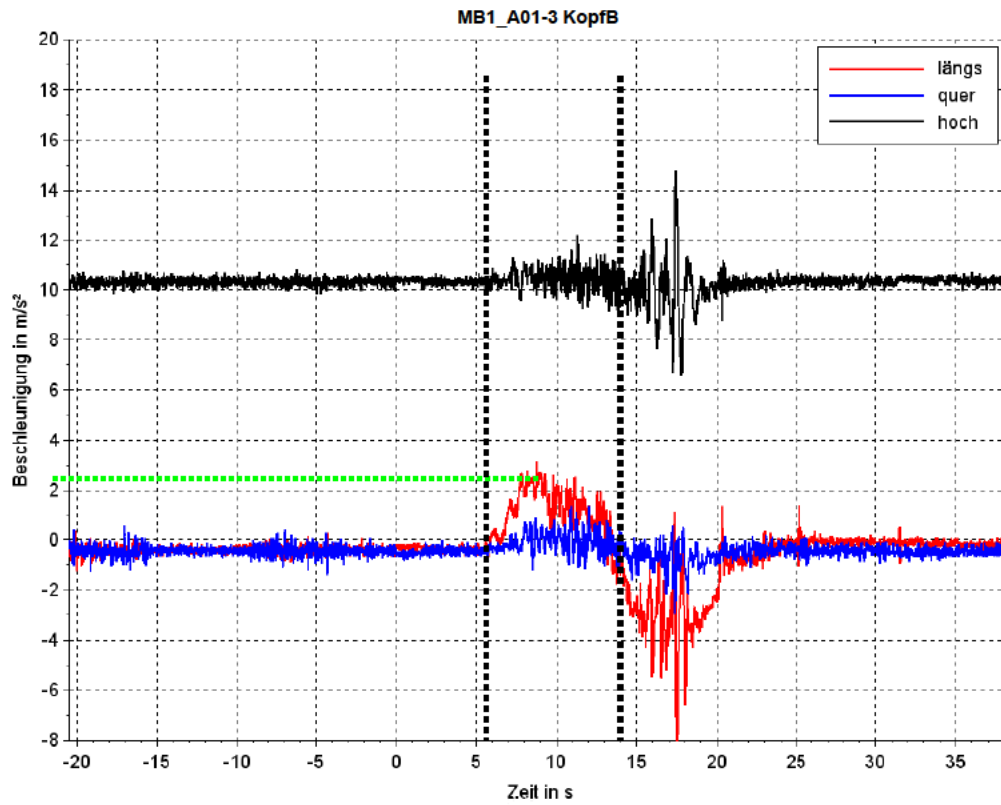


Diagramm 17: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A01.3.

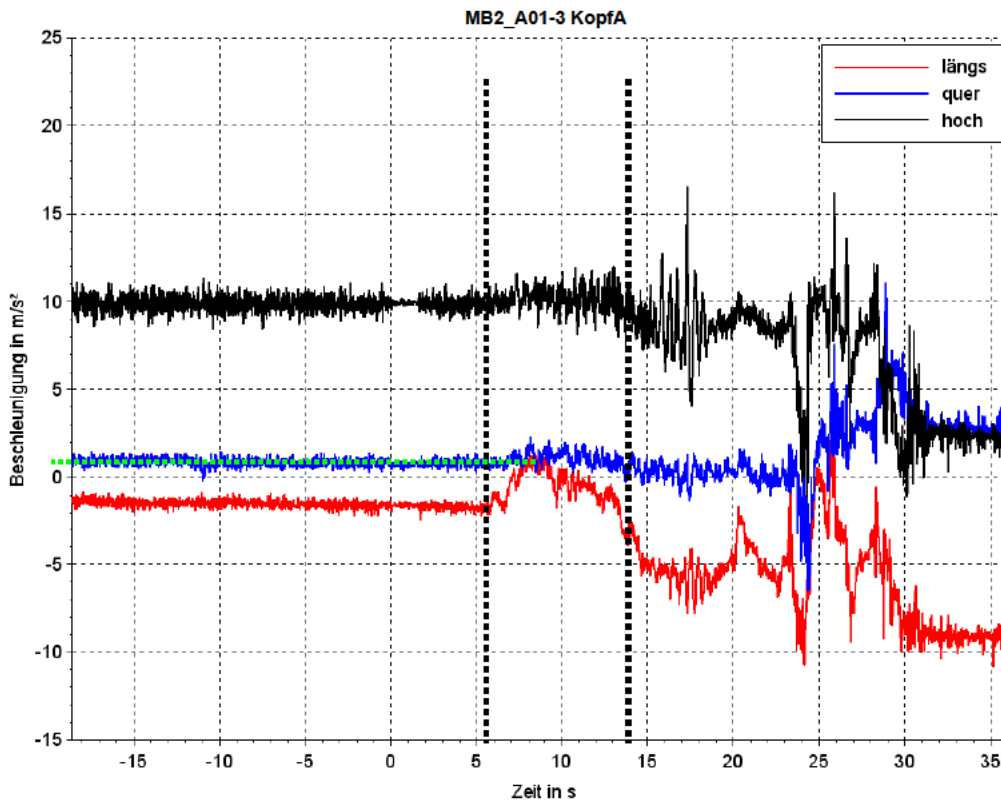


Diagramm 18: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A01.3.

Versuche A01.3 - Messdaten der Brustsensoren

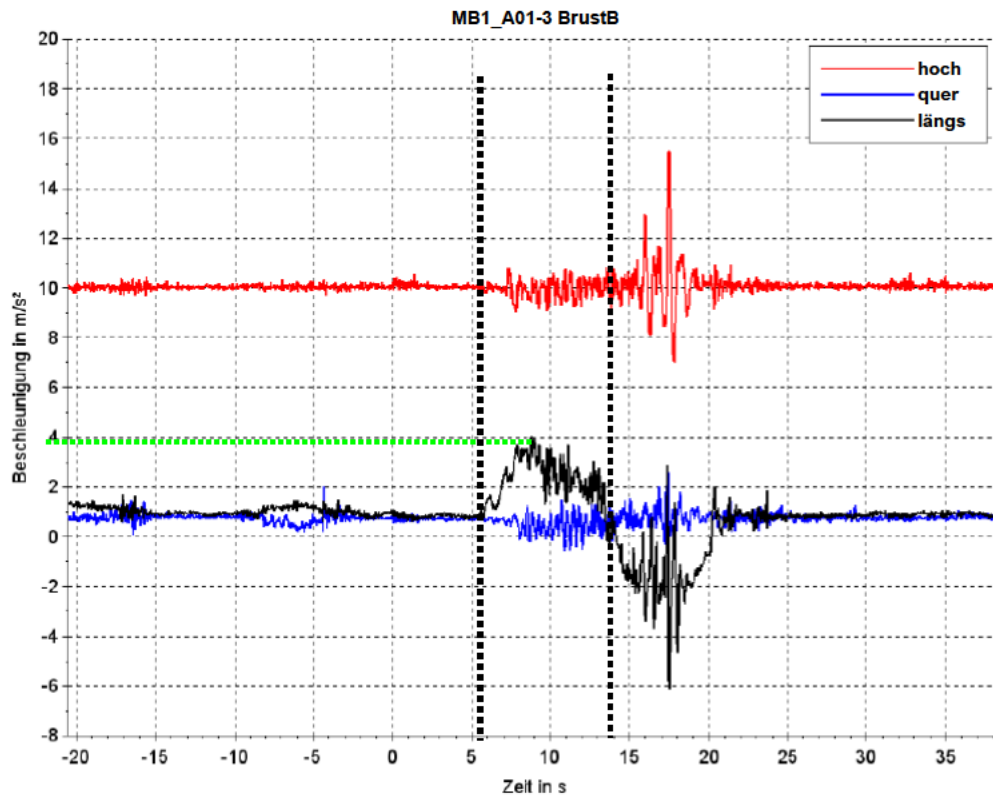


Diagramm 19: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A01.3.

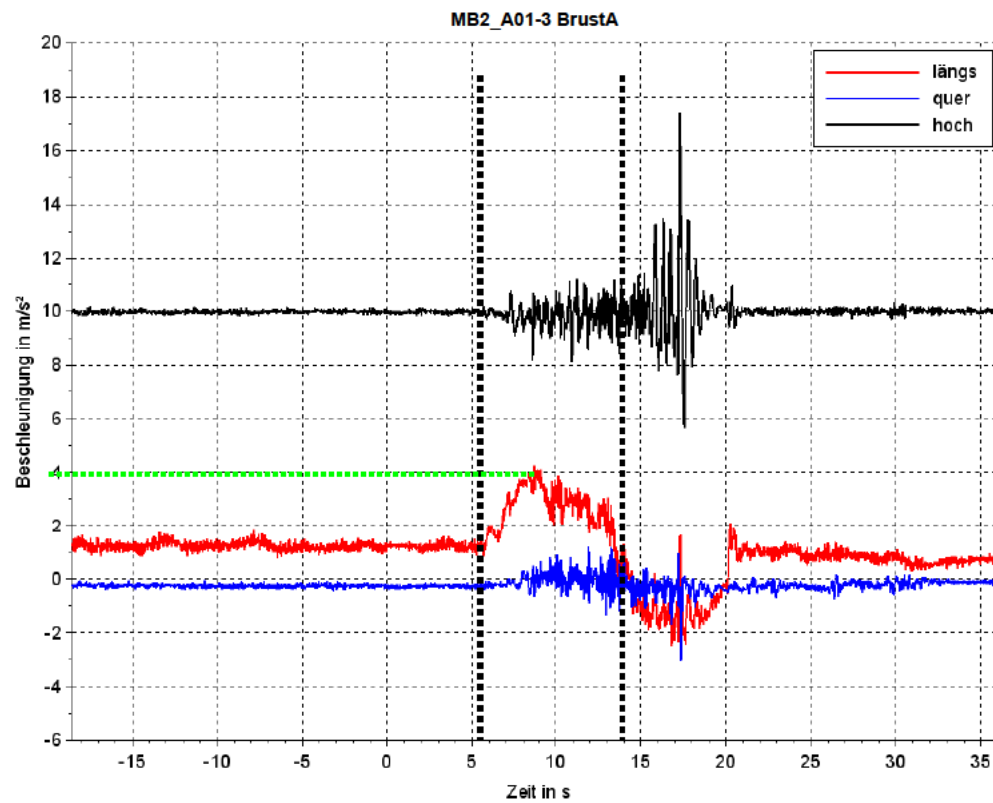


Diagramm 20: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A01.3.

4.2. Ergebnis Versuchsreihe Gefahrenbremsung

In manchen Verkehrssituationen ist ein plötzliches Abbremsen des Fahrzeugs notwendig. Daher wird in der zweiten Versuchsreihe die Belastung der Insassen bei einer Gefahrenbremsung des Rettungswagens untersucht. Ziel der einzelnen Versuche ist es, die Insassenbelastung während einer sogenannten Gefahrenbremsung zu messen. Hierzu beschleunigt das Fahrzeug zunächst auf die Geschwindigkeiten von 15, 30, 45 und 60 $\frac{km}{h}$. Es hält die jeweilige Versuchsgeschwindigkeit für eine kurze Zeit konstant und bremst anschließend bis zum Stillstand stark ab. Abbildung 27 zeigt die Bildersequenz, indem der Ablauf dieses Versuchs exemplarisch dargestellt ist.

In der zweiten Versuchsreihe wurde ebenfalls eine gerade Strecke gewählt. Dieser Versuchsablauf soll eine Gefahrenbremsung in einer Geradeausfahrt simulieren.

Abbildung 28 stellt die Synchronisation der Videoaufnahmen der zweiten Versuchsreihe beispielhaft dar. Im Anschluss an jeden Einzelversuch wurde die Aussage der Probanden auf einem Fragebogen dokumentiert.

Betrachtet man die Aussagen der Probanden zur taktilen Wahrnehmbarkeit der Verzögerung des Rettungswagens, so ist im Diagramm 21 ersichtlich, dass sich die Aussage des Probanden C sichtlich von den Probanden A und B unterscheidet. In allen vier Versuchsfahrten beurteilen die Probanden A und B ihre Wahrnehmbarkeit gleich. So nehmen Proband A und B das Ereignis zunächst als ausgeprägt wahr und steigern anschließend ihre Aussage mit jeder Versuchsfahrt. Proband C nimmt hingegen das Ereignis als normal wahr. Erst im dritten und letzten Versuch steigert er seine Einschätzung der Bemerkbarkeit.

Insgesamt ist anhand der Aussagen der Probanden ein stetiger Anstieg der Insassenbelastungen zu erwarten. In dieser Versuchsreihe der Gefahrenbrem-

sung auf gerader Strecke ist eine negative Beschleunigung in Längsrichtung zur erwarten.

In allen Diagrammen der Versuchsreihe grenzen die schwarz gepunkteten Linien den Bereich des Ereignisses im Fahrversuch ein. Die grünen und orangen Hilfslinien unterstützen bei der Ermittlung der Messwerte.

Der Proband A liegt in dieser Versuchsreihe auf der Trage. Der Proband B sitzt im Begleitstuhl des Patientenraums neben der Trage. Der dritte Proband C sitzt auf dem Beifahrersitz in der Fahrerkabine des Rettungswagens. Proband C wurde durch seine Position auf dem Beifahrersitz mit keiner Messtechnik ausgestattet.



Abbildung 27: Bildersequenz der durchgeführten Versuchsreihe A02.



Abbildung 28: Exemplarische Videosynchronisation der Versuchsreihe A02.

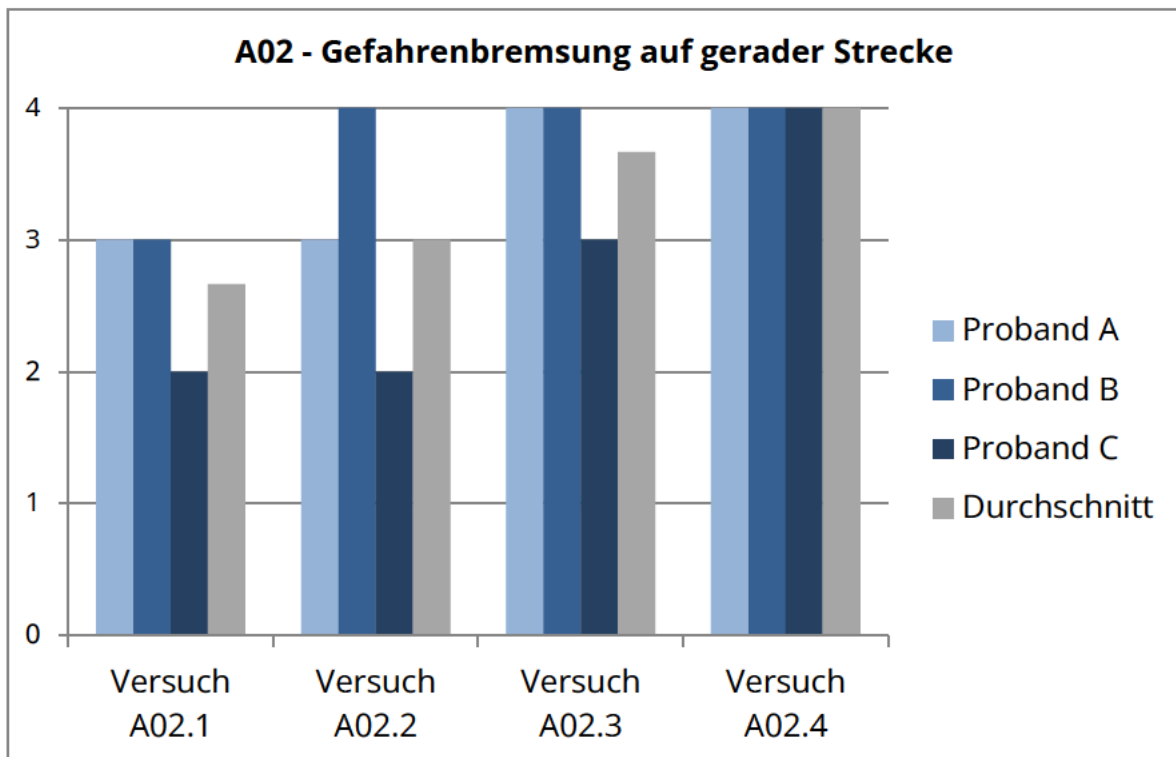


Diagramm 21: Ergebnis des Fragebogens der Bemerkbarkeit zum Versuch A02.

Skala: 0=nicht, 1=kaum, 2=normal, 3=stark, 4=sehr stark

4.2.1. Versuch A02.1 – 15 km/h

Die Geschwindigkeit des ersten Versuchs beträgt ca. $15 \frac{km}{h}$.

Tabelle 6 stellt die Beurteilung der taktilen Wahrnehmung der Probanden dar. Klar erkenntlich zeigt sich, dass jeder der drei Probanden einen Ruck und ein Rütteln des Fahrzeugs gespürt hat. Erklären lässt sich dies am asphaltierten Untergrund der Teststrecke. Die Probanden B und C nahmen zudem auch ein Neigen des Fahrzeugs wahr. Dies lässt sich durch das Eintauchen des Fahrzeugs bei einer Bremsung erklären. Ähnlich wie bei einer Beschleunigung, stauchen sich bei einer Bremsung die vorderen Fahrzeugfedern zusammen und die hinteren Fahrzeugfedern dehnen sich aus. Somit taucht das Fahrzeug nach vorne ein. Anschaulich kann man diese bremsbedingte Achlastverlagerung des Rettungswagens durch ein „Bremsnicken“ erklären.

Tabelle 6: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A02.1.

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A			✓	✓
Proband B		✓	✓	✓
Proband C		✓	✓	✓

Auf den folgenden Seiten sind die Messdaten der jeweiligen drei Sensoren von den Probanden A und B dargestellt. Die Diagramme 22 und 23 zeigen, wie erwartet, einen negativen Ausschlag der Messwerte in Längsrichtung der Belastung auf die IFU-Messbox. Dabei kann die Aussage getroffen werden, dass eine Gesamtbeschleunigung auf den Probanden A von ca. $7 \frac{m}{s^2}$ einwirkt, wie die grüne Hilfslinie verdeutlicht. Gleiches gilt für den Probanden B.

Ebenfalls ist bei beiden Diagrammen ein geringer Ausschlag in Hochrichtung zu verzeichnen. Dies begründet sich durch das stärkere Eintauchen des Fahrzeugs bei einem Bremsvorgang.

Diagramm 24 präsentiert die Messdaten des Kopfsensors des Probanden A. Durch den positiven Versatz des Kurvenverlaufs von ca. $1 \frac{m}{s^2}$ ergibt sich mit dem abzulesenden Ausschlagswert von $8 \frac{m}{s^2}$ eine einwirkende Beschleunigung von ca. $9 \frac{m}{s^2}$. Höhere Messwerte sind im Diagramm 25 ersichtlich. Diese zeigen eine körperliche Belastung auf den sitzenden Probanden B in Längsrichtung von ca. $11 \frac{m}{s^2}$. Der Wert setzt sich aus dem Offset von ca. $1 \frac{m}{s^2}$ in negativer Richtung und dem Ausschlagswert von $12 \frac{m}{s^2}$ zusammen. Weiter erfährt der Proband B ebenfalls eine resultierende Beschleunigung von rund $12,2 \frac{m}{s^2}$ in Hochrichtung. Wie im Abschnitt 3.3. *Messtechnik* erklärt, wirkt in Hochrichtung ebenfalls die Erdbeschleunigung auf den Sensor ein. Demnach ist dieser vom dargestellten Messwert der Abbildung 25 abzuziehen.

In den Diagrammen 26 und 27 sind die erhobenen Messdaten der beiden Brustsensoren dargestellt. Es zeigt sich, dass im Vergleich der beiden Kurvenverläufe in Hochrichtung, die Auslenkung der Trage in Hochrichtung einen Einfluss auf die Belastung des Probanden besitzt. Die Messwerte des Probanden B im Diagramm 27 sind größer als im Diagramm 26. Folglich dämpft das hydraulisch gefederte Tragesystem die Bewegung des liegenden Patienten A ab. Die Brustbelastung in Längsrichtung beträgt für den Probanden A ca. $8 \frac{m}{s^2}$. Dies zeigt das Diagramm 26 mit Hilfe der grünen Linie. Weiter wird der Offset in positiver Richtung berücksichtigt. Proband B erfährt in diesem Fahrversuch ebenfalls eine Belastung des Oberkörpers von ca. $8 \frac{m}{s^2}$. Dieser Wert setzt sich aus dem Versatz in positiver Richtung von ca. $2 \frac{m}{s^2}$ und der Amplitude von ca. $6 \frac{m}{s^2}$ zusammen.

Das Fazit über diesen Einzelversuch mit einer Geschwindigkeit von $15 \frac{km}{h}$ ist, dass wiederum beide Probanden in etwa die gleiche körperliche Beschleunigung erfahren. Es ist jedoch zu erkennen, dass das in Hochrichtung schwin-

gende Tragesystem die Belastung des liegenden Probanden A beeinflusst. In Analogie können Messdaten des Probanden B auf Probanden C übertragen werden.

Versuch A02.1 - Messdaten der IFU-Messboxen

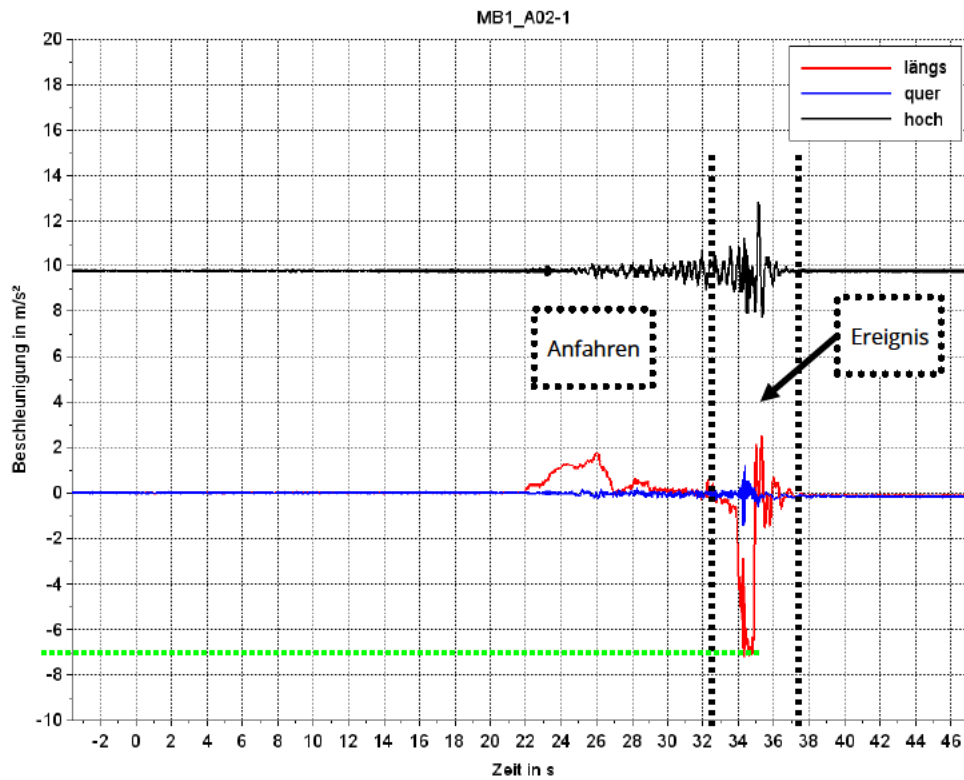


Diagramm 22: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A02.1.

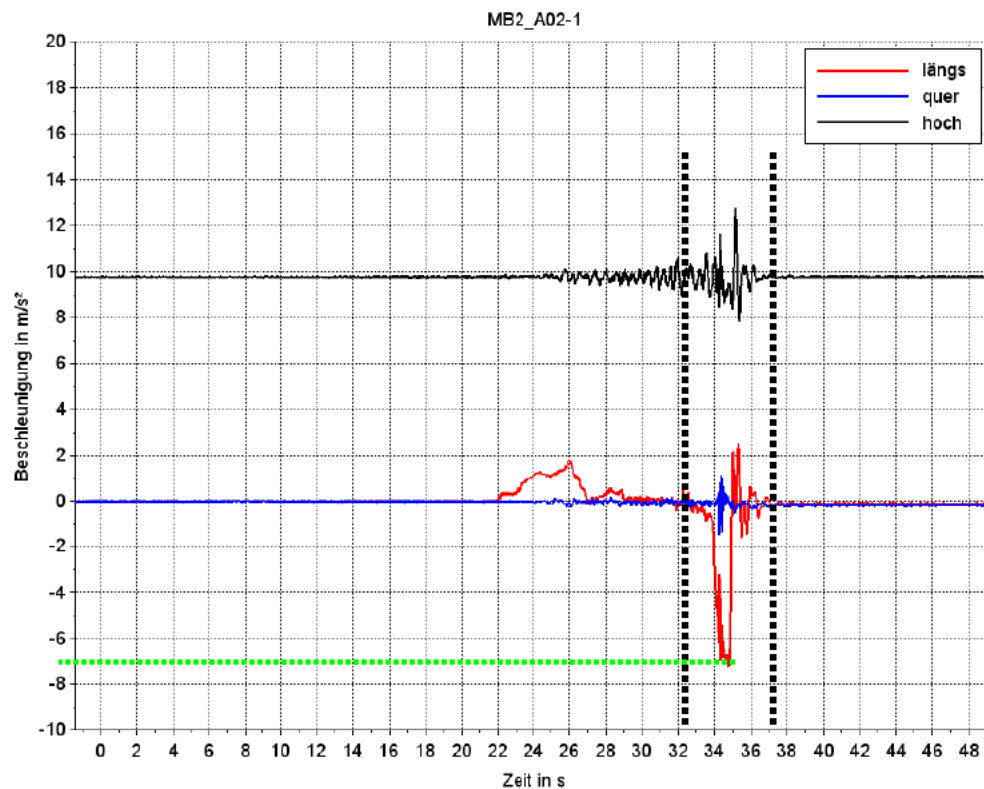


Diagramm 23: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A02.1.

Versuch A02.1 - Messdaten der Kopfsensoren

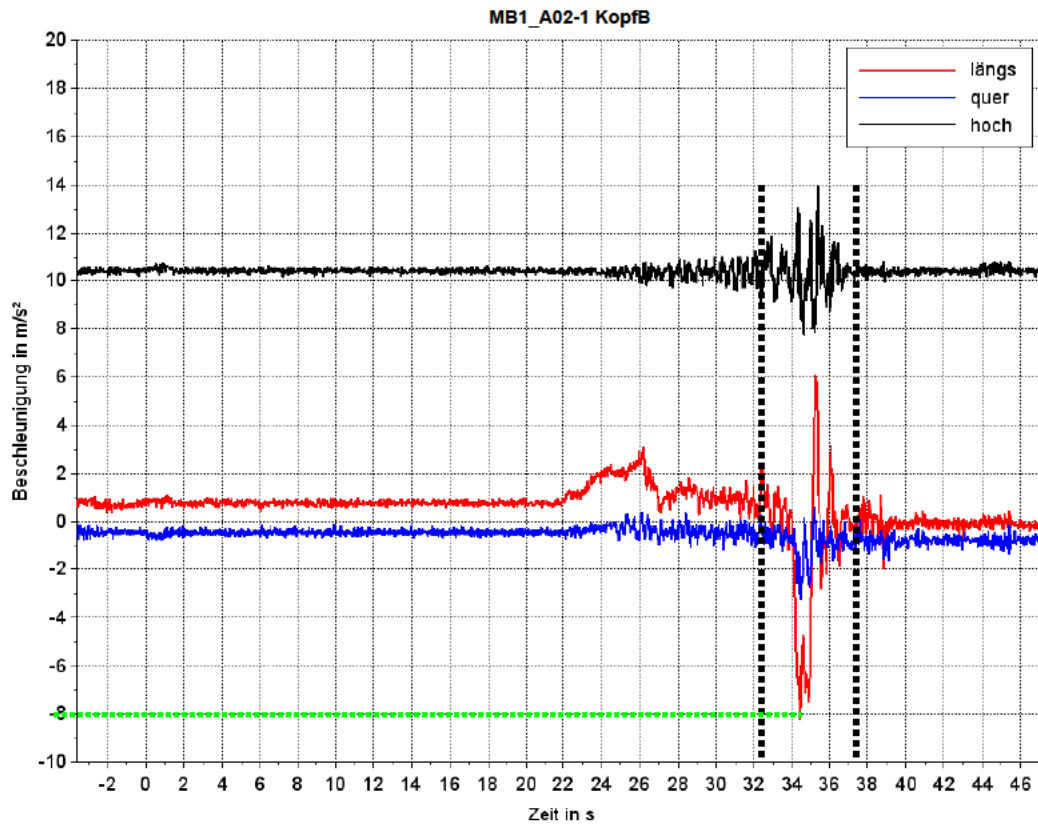


Diagramm 24: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A02.1.

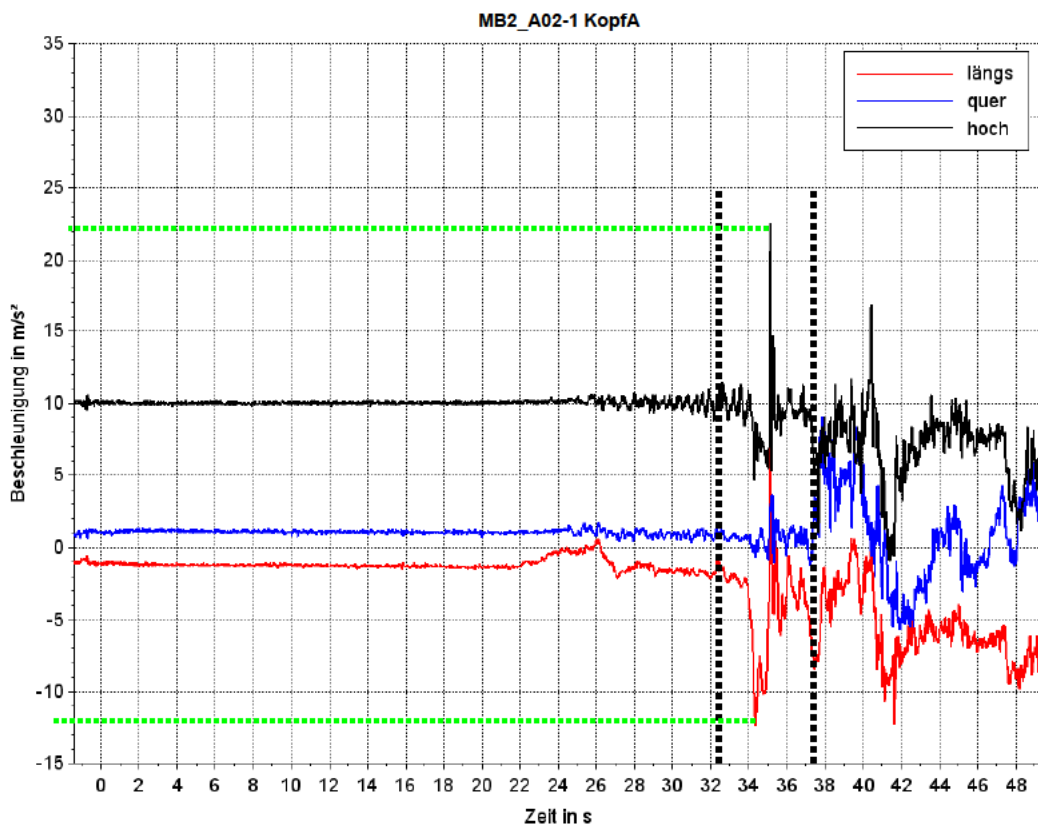


Diagramm 25: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A02.1.

Versuch A02.1 - Messdaten der Brustsensoren

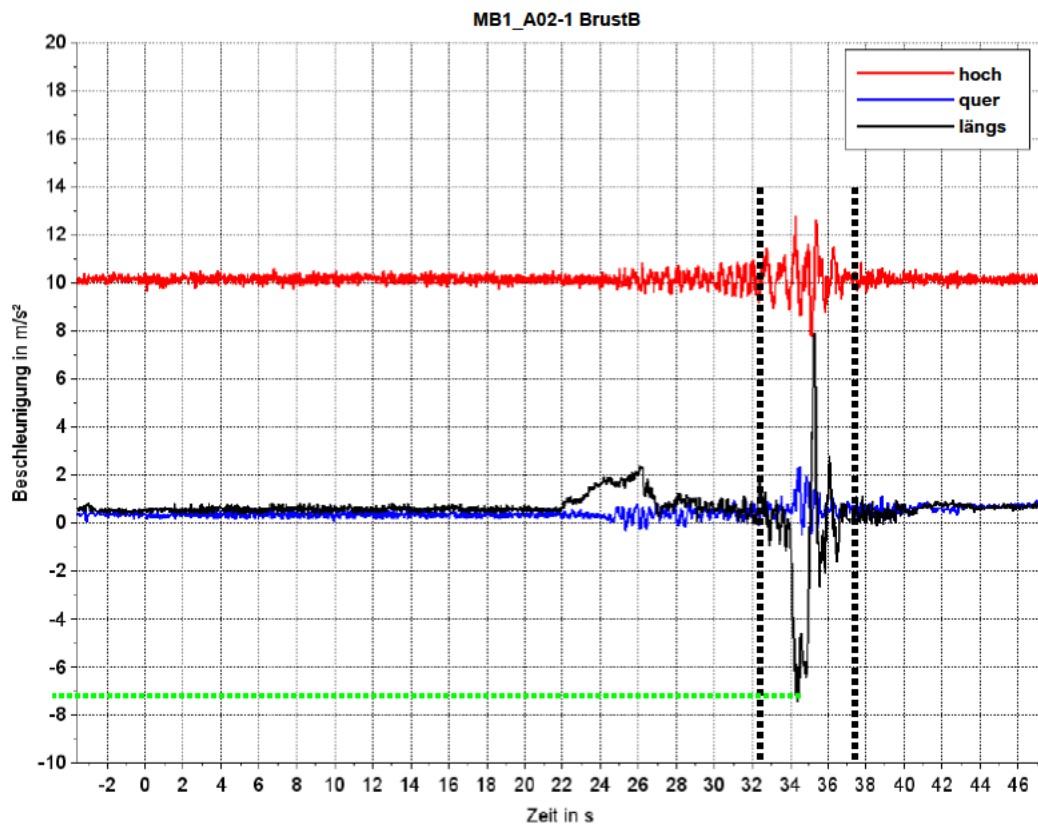


Diagramm 26: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A02.1.

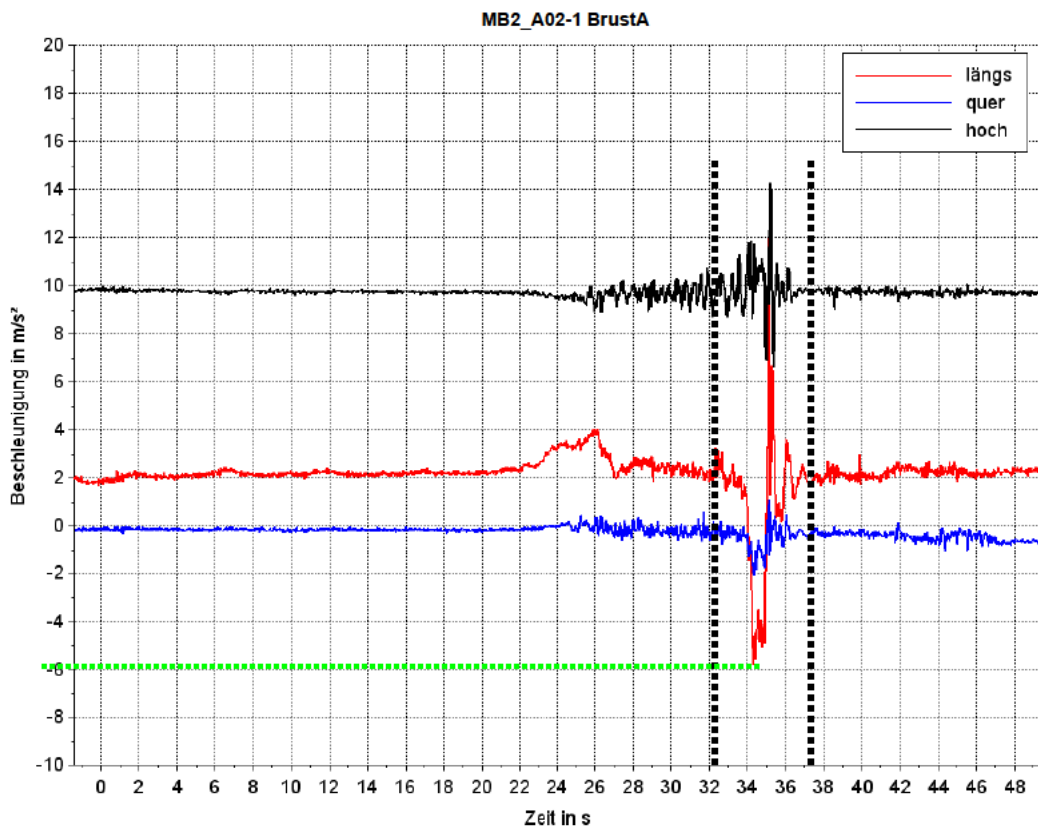


Diagramm 27: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A02.1.

4.2.2. Versuch A02.2 – 30 km/h

Im zweiten Versuch der Versuchsreihe bremst der Rettungswagen aus rund $30 \frac{km}{h}$ ab. Im Gegensatz zum ersten Einzelversuch nimmt Proband C diesmal kein Rütteln wahr, wie in der Tabelle 7 ersichtlich ist. Alle Probanden nahmen jedoch einen Ruck während des Abbremsens wahr. Proband B und C bemerken jeweils in ihrer sitzenden Position ein Neigen des Rettungswagens.

Tabelle 7: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A02.2.

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A			✓	✓
Proband B		✓	✓	✓
Proband C		✓	✓	

Mit rund $8 \frac{m}{s^2}$ wurden die Probanden bei diesem Fahrversuch körperlich belastet, wie es im Diagramm 28 und 29 ersichtlich ist (vgl. grüne Hilfslinie). Dieser Wert wurde von den IFU-Messboxen erfasst und spiegelt eine negative Beschleunigung wider. Diagramm 30 stellt die erhobenen Messwerte des Kopfsensors des Probanden A dar. Durch den Versatz von ca. $0,5 \frac{m}{s^2}$ des Kurvenlaufs in Längsrichtung, ergibt sich eine resultierende Kopfbeschleunigung von rund $11 \frac{m}{s^2}$. Des Weiteren lässt sich an dem Kurverlauf das Ausgleichen des hydraulisch gefederten Tragesystems ablesen. Dieses lässt sich die Ausschläge der Kurve in Hochrichtung erklären. Hierbei kommt es zu einer Belastung in z-Richtung von ca. $8,7 \frac{m}{s^2}$ nach Abzug der Erdbeschleunigung (vgl. orange Hilfslinie). Eine kontinuierliche Abweichung der Messdaten zeigt sich im Diagramm 31. Somit ist nur eine ungefähre Bestimmung der Beschleunigung des Kopfes des Probanden B möglich. Gerechnet mit einem negativen Offset von $1 \frac{m}{s^2}$ zu Beginn der Messdatenerhebung, folgt ein Einwirken einer resultieren-

den Beschleunigung von ca. $11,5 \frac{m}{s^2}$. Bei diesem Wert ist jedoch, aufgrund des Rauschens mit einem Fehler von ca. $\pm 0,336 \frac{m}{s^2}$ zu rechnen.

In den letzten Diagrammen dieses Einzelversuchs sind die Messdaten der beiden Brustsensoren der Probanden A und B dargestellt. Diagramm 32 zeigt einen positiven Offset von $0,5 \frac{m}{s^2}$ in Längsrichtung. Zusammen mit dem maximalen Wert des Ausschlags der Kurve ergibt das eine resultierende Belastung des Oberkörpers von ca. $9,5 \frac{m}{s^2}$ (vgl. grüne Hilfslinie im Diagramm 32). Der Ausschlag der Kurve im Bereich des Ereignisses ist im Diagramm 33 des Brustsensors des Probanden B im Vergleich zum Probanden A nicht allzu groß. Proband B erfährt eine Beschleunigung von ca. $7 \frac{m}{s^2}$ (vgl. grüne Hilfslinie im Diagramm 33).

Zusammenfassend kann über diesen Einzelversuch ausgesagt werden, dass beide Probanden A und B in etwa die gleiche körperliche Beschleunigung erfahren. Es lässt sich jedoch für den Probanden A eine Dämpfung durch das Tragesystem des Rettungswagens nachvollziehen. Das hydraulische Tragesystem gleicht die Bewegung des Eintauchens des Fahrzeugs durch den Bremsvorgang aus und dämpft somit die Belastung des Probanden A.

Proband B und C erfahren durch ihre Lage und der sitzenden Position keine gedämpfte Belastung. Die Messdaten des Probanden B können äquivalent auf den Probanden C übertragen werden.

Versuch A02.2 - Messdaten der IFU-Messboxen

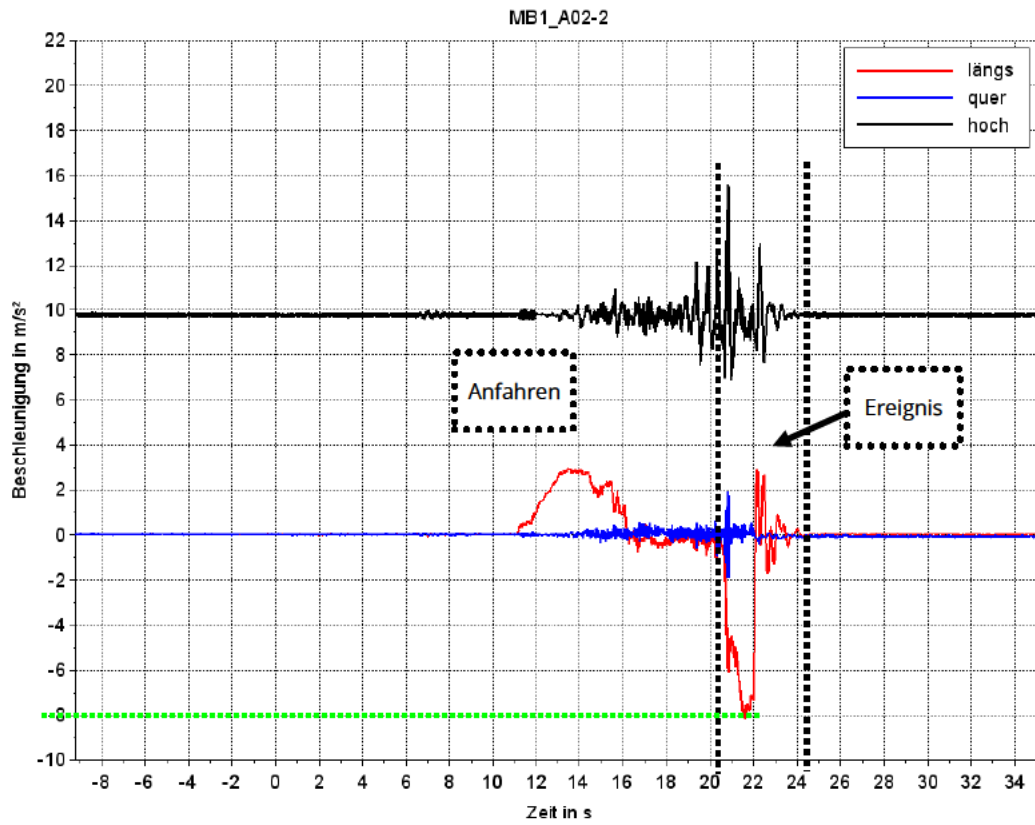


Diagramm 28: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A02.2.

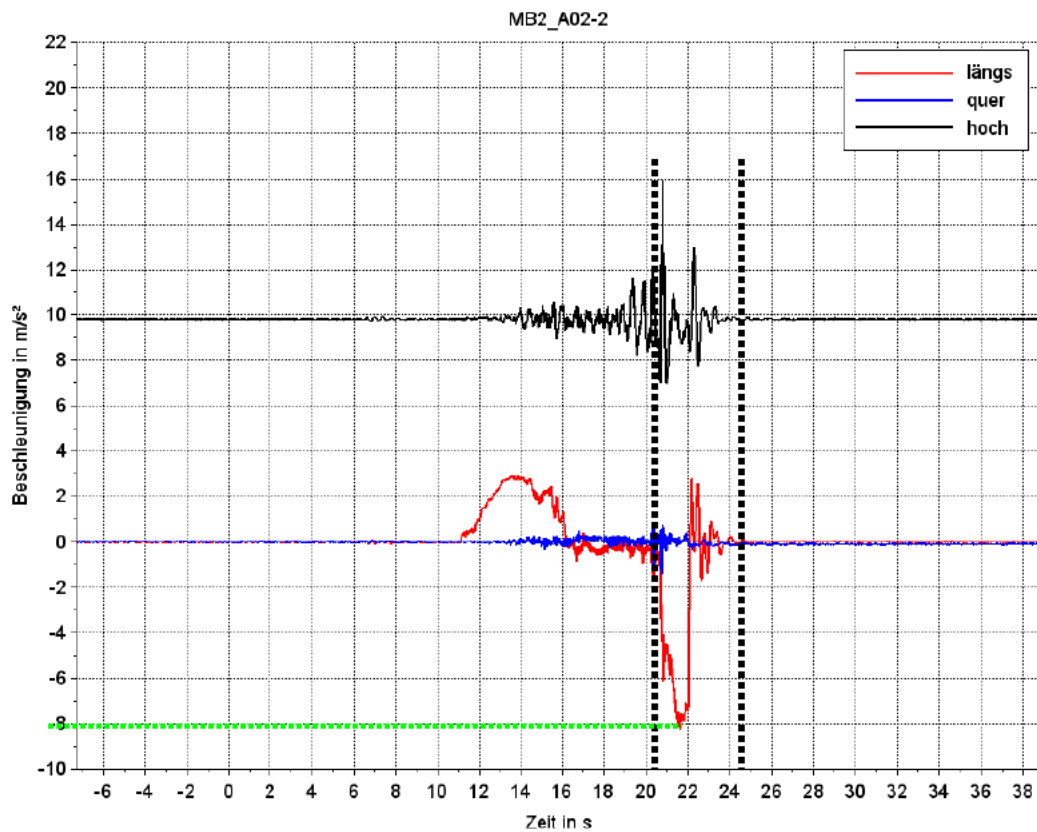


Diagramm 29: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A02.2.

Versuch A02.2 - Messdaten der Kopfsensoren

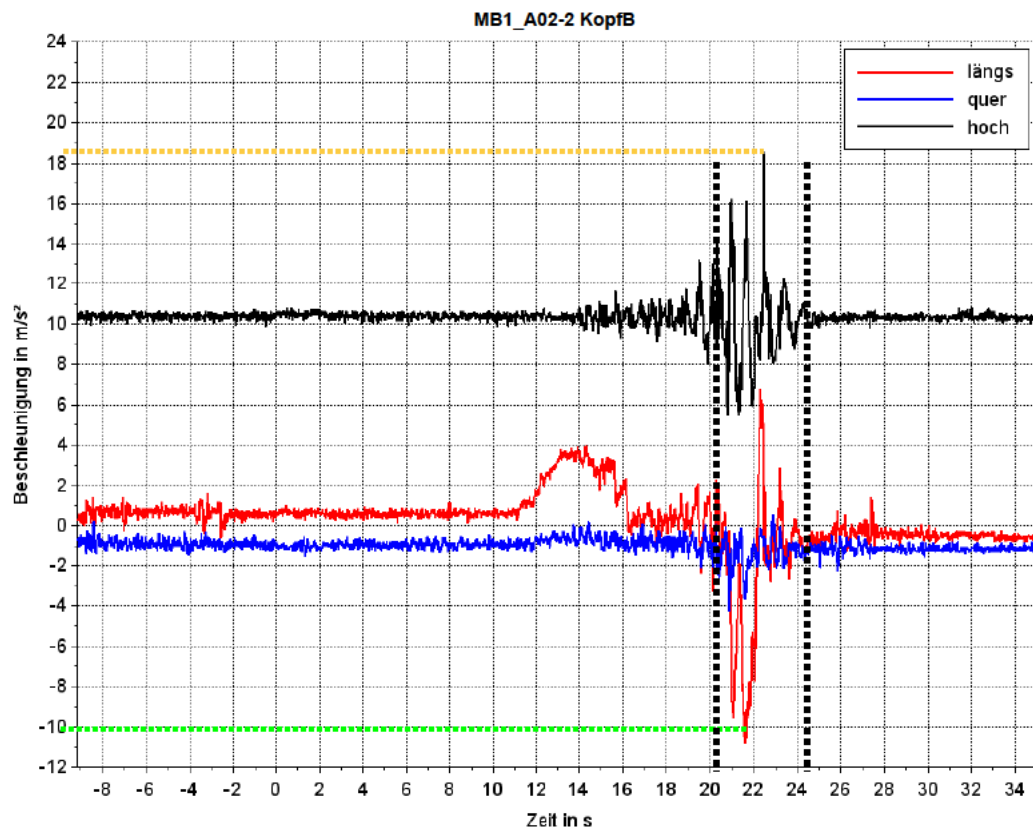


Diagramm 30: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A02.2.

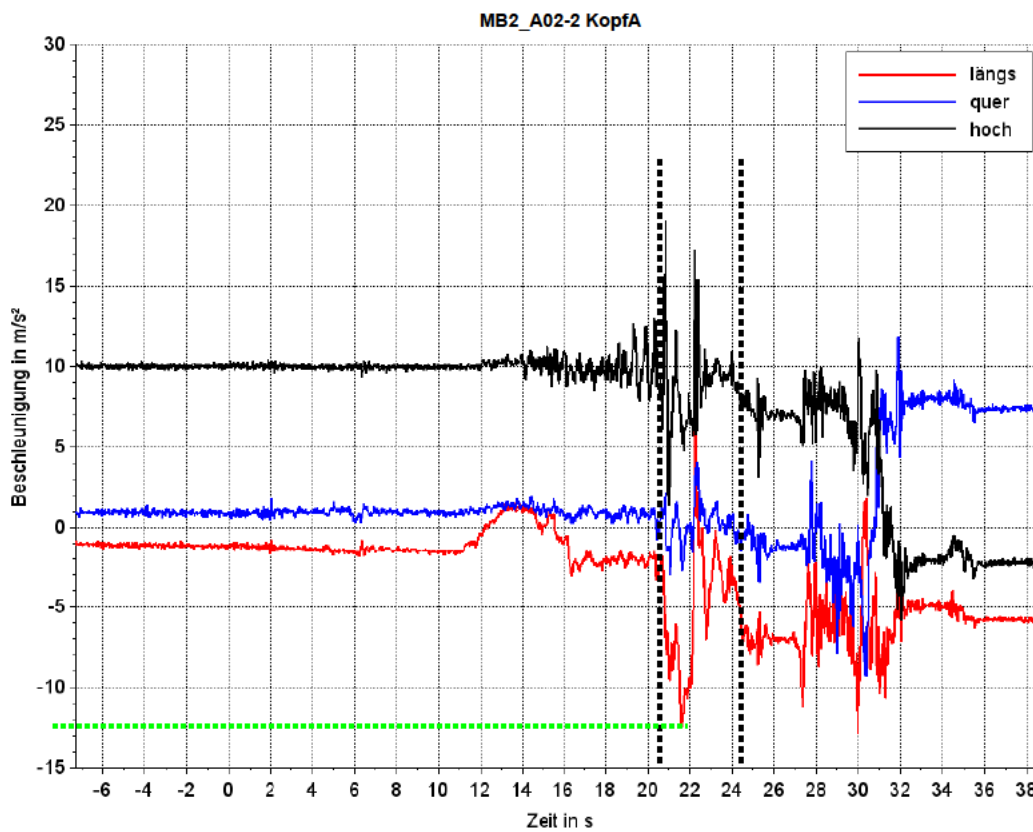


Diagramm 31: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A02.2.

Versuch A02.2 - Messdaten der Brustsensoren

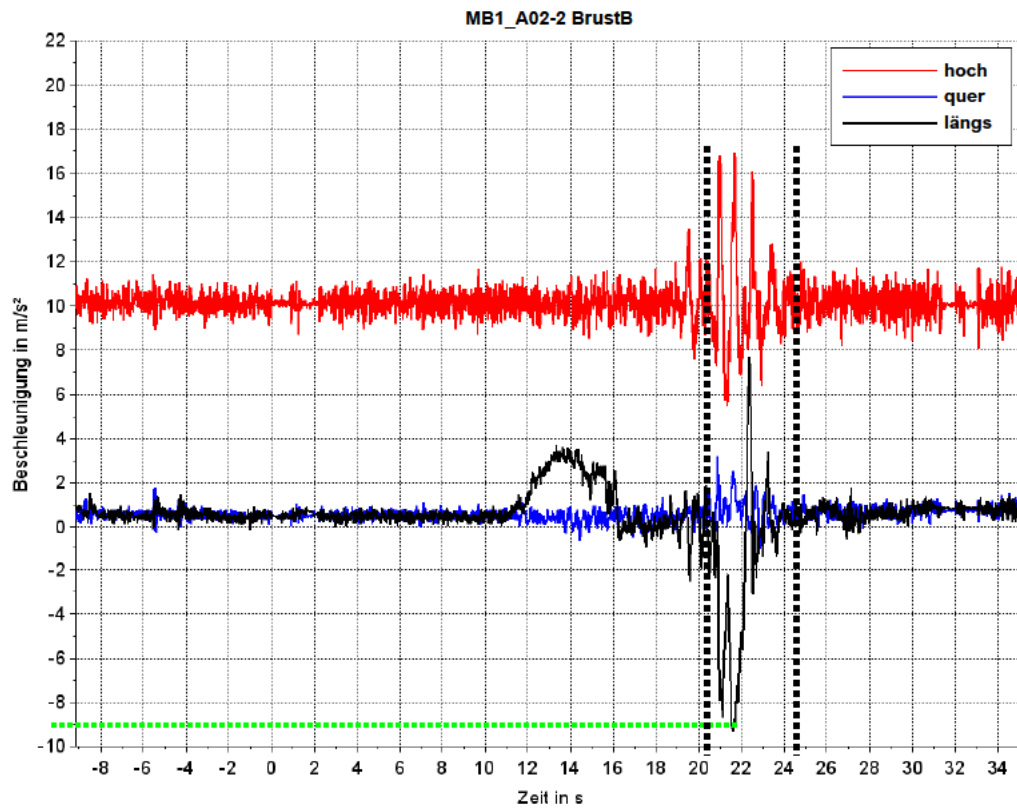


Diagramm 32: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A02.2.

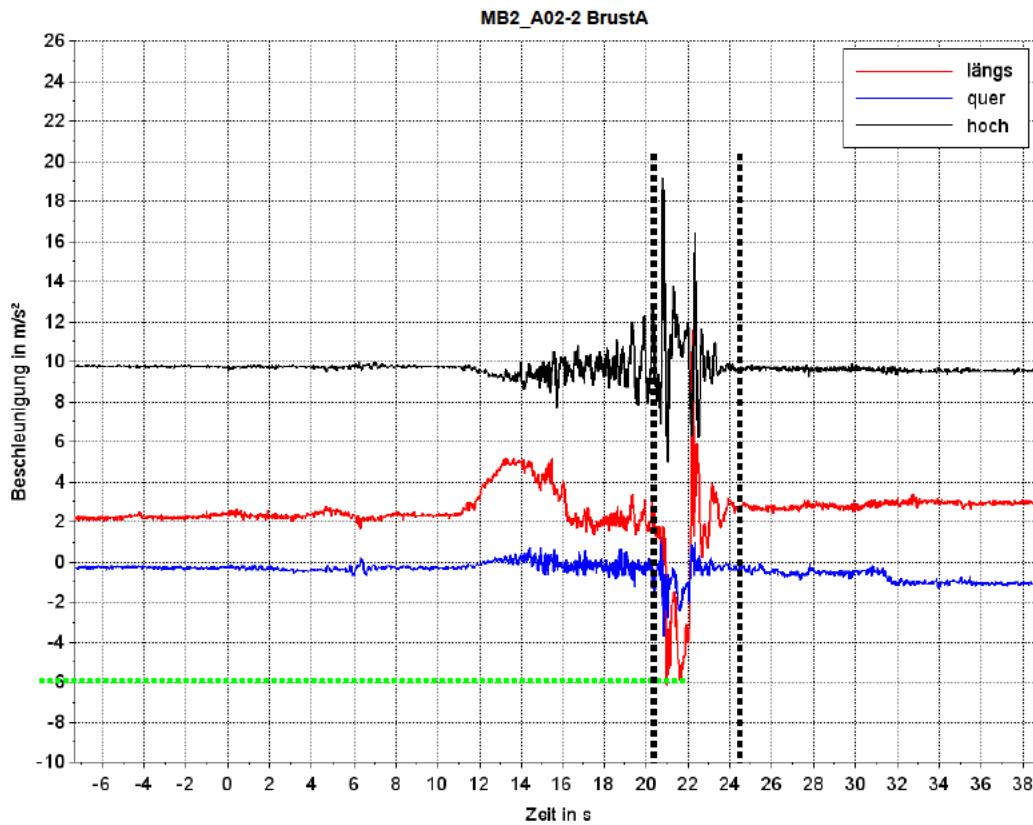


Diagramm 33: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A02.2.

4.2.3. Versuch A02.3 – 45 km/h

Im dritten Fahrversuch wird mit dem Rettungswagen eine Bremsung aus ca. $45 \frac{km}{h}$ durchgeführt. Hier zeigt sich ein ähnliches Bild der taktilen Wahrnehmung aller Probanden wie im ersten Einzelversuch. Jeder Proband dokumentiert, wie in Tabelle 8 ersichtlich, ein Ruck und Rütteln des Fahrzeugs. Die Probanden B und C nehmen zudem ein Wanken bzw. Neigen des Fahrzeugs wahr.

Tabelle 8: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A02.3.

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A			✓	✓
Proband B		✓	✓	✓
Proband C		✓	✓	✓

Betrachtet man die identischen Ausschläge der Längskurven im Diagramm 34 und 35, so fällt auf, dass eine körperliche Belastung von ca. $9,5 \frac{m}{s^2}$ auf die Probanden einwirkt. Zudem lässt sich in beiden Diagrammen ein ähnlicher Kurvenverlauf der Beschleunigung in Hoch- und Querrichtung ablesen.

Die Messung des Kopfsensors, wie sie im Diagramm 36 ersichtlich ist, ergab für den Probanden A eine negative Beschleunigung von rund $10,5 \frac{m}{s^2}$. Dieser Wert setzt sich aus dem positiven Versatz der Kurve in Längsrichtung von ca. $0,5 \frac{m}{s^2}$ und dem maximalen Ausschlag der Kurve von rund $10 \frac{m}{s^2}$ im Betrag zusammen. Aufgrund des Rauschens des externen Sensors lässt sich im Diagramm 37 kein eindeutiger Wert der Belastung des Kopfes des Probanden B ablesen. Es zeigen sich zu Beginn des Kurvenverlaufs Äquivalenzen zum Diagramm 36 (vgl. grüne Hilfslinie). Es kann somit eine Analogie zur Belastung des Kopfes zum Probanden A gezogen werden.

Diagramm 38 und 39 stellen die Messwerte der beiden externen Brustsensoren der jeweiligen Probanden dar. Das Rauschen des Sensors ist im Diagramm 38 in allen Richtungskordinaten ersichtlich. Eine genaue Aussage über den Wert der Belastung lässt sich nur mit starken Toleranzen angeben. Der Durchschnitt des Rauschens in Längsrichtung ergibt einen Versatz in positiver Richtung von ca. $1 \frac{m}{s^2}$. Im Bezug auf die negative Amplitude von ca. $8,5 \frac{m}{s^2}$, ergibt sich eine resultierende Beschleunigung von $9,5 \frac{m}{s^2}$, welche auf den Probanden A wirkt. Ein vergleichbarer resultierender Beschleunigungswert lässt sich auch im Diagramm 39 feststellen. Hier beträgt der positive Offset jedoch rund $2,7 \frac{m}{s^2}$. Addiert man nun den Ausschlagswert von gut $6,4 \frac{m}{s^2}$, so erhält man das Ergebnis der Belastung von rund $9,1 \frac{m}{s^2}$.

Als Resümee folgt aus diesem Versuch, dass die Probanden A und B etwa die gleiche körperliche Belastung erfahren. Die Messdaten des Probanden B können analog auf den Probanden C übertragen werden.

Versuch A02.3 - Messdaten der IFU-Messboxen

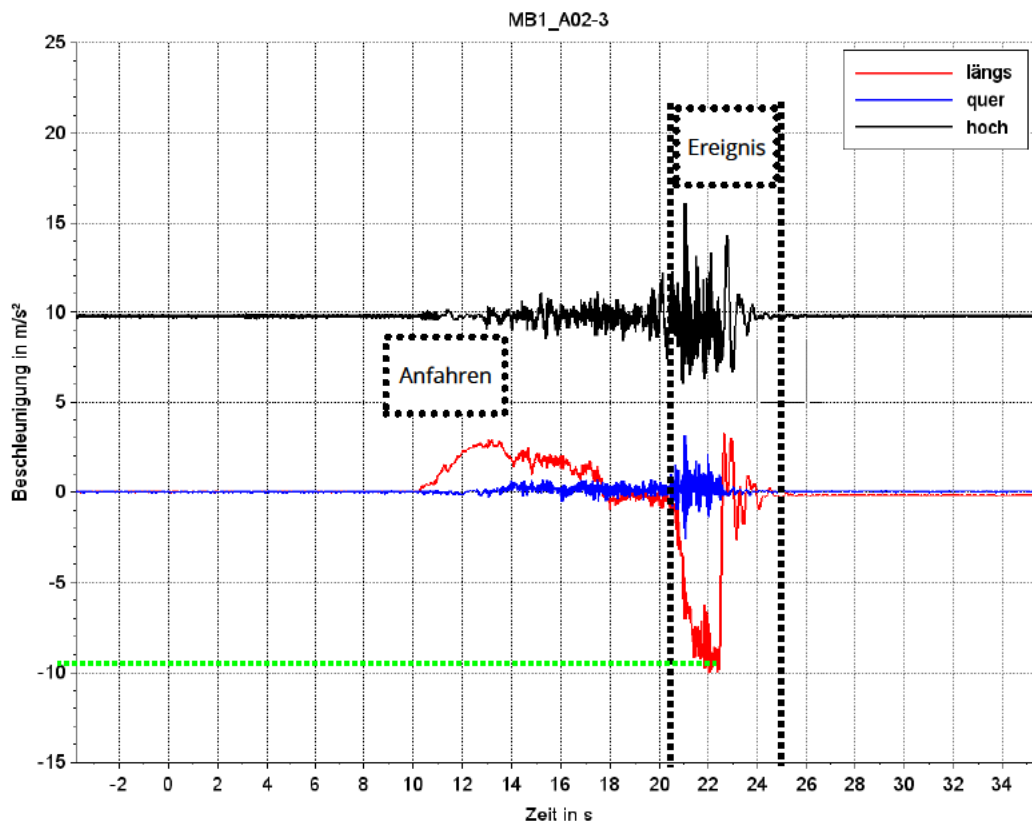


Diagramm 34: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A02.3.

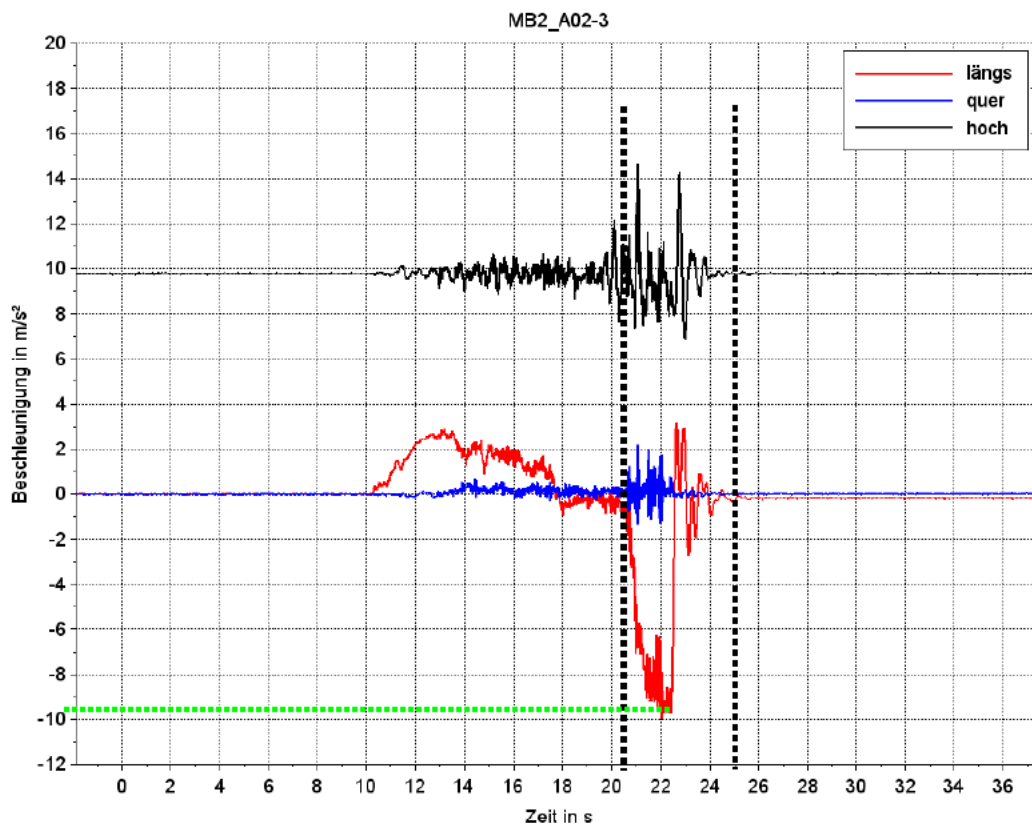


Diagramm 35: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A02.3.

Versuch A02.3 - Messdaten der Kopfsensoren

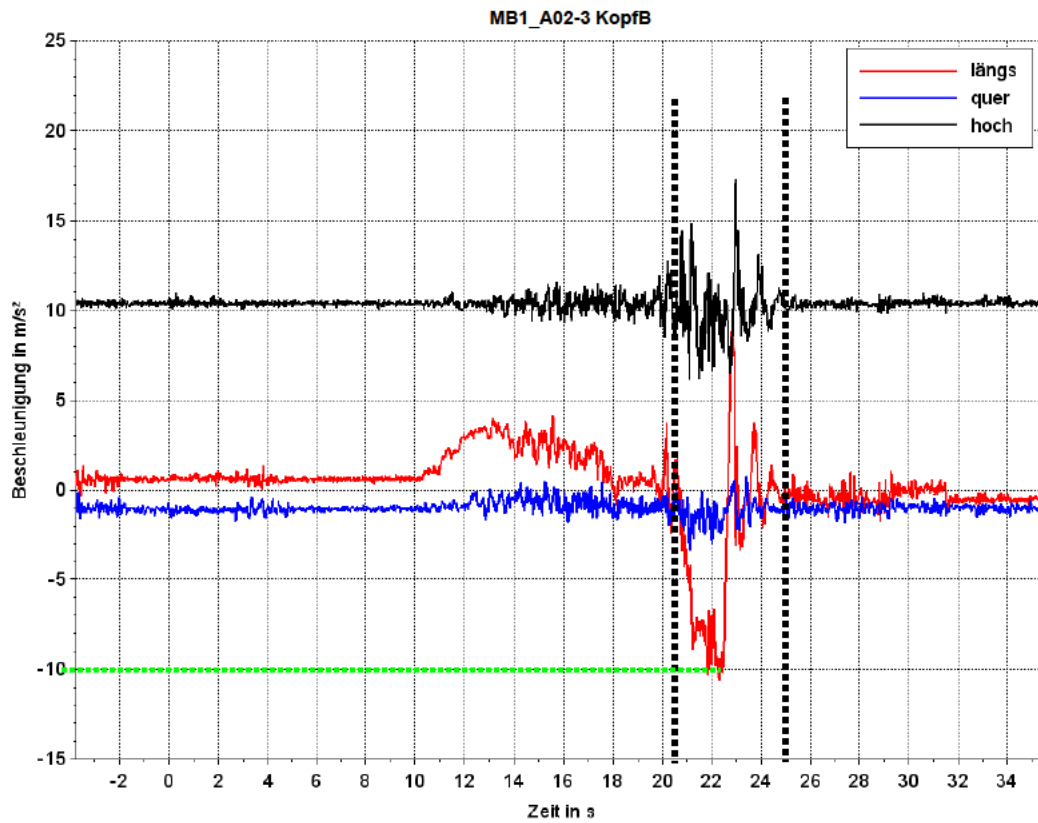


Diagramm 36: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A02.3.

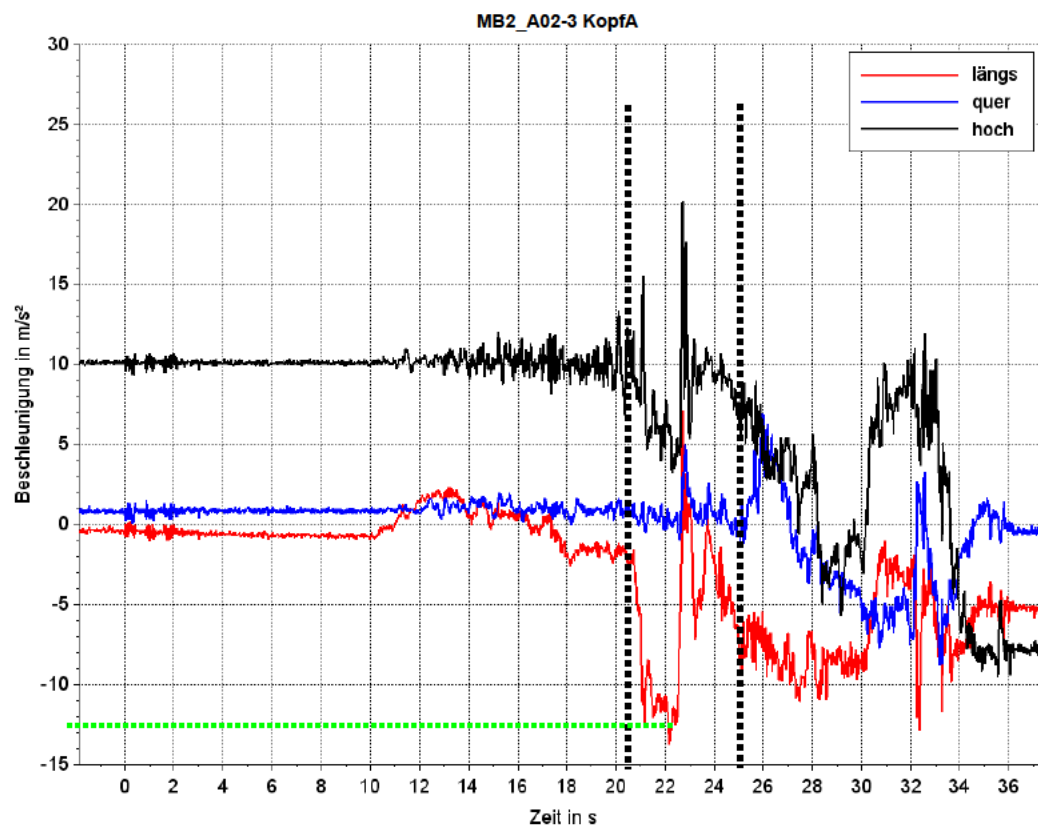


Diagramm 37: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A02.3.

Versuch A02.3. - Messdaten der Brustsensoren

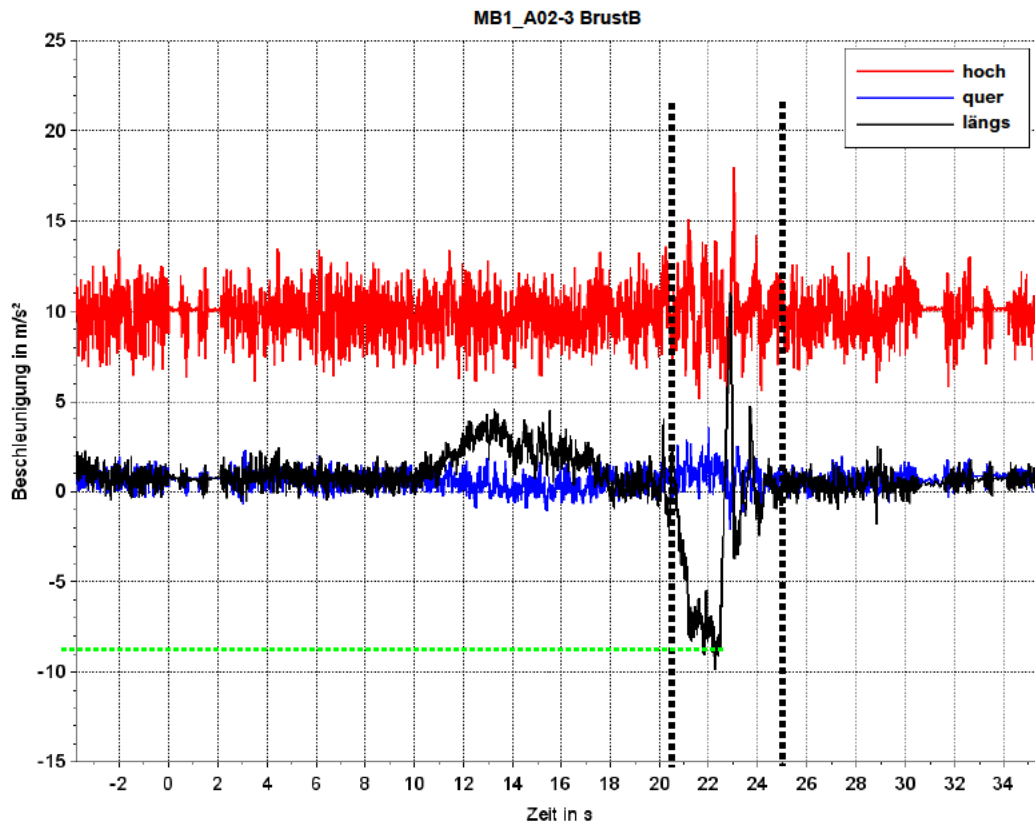


Diagramm 38: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A02.3.

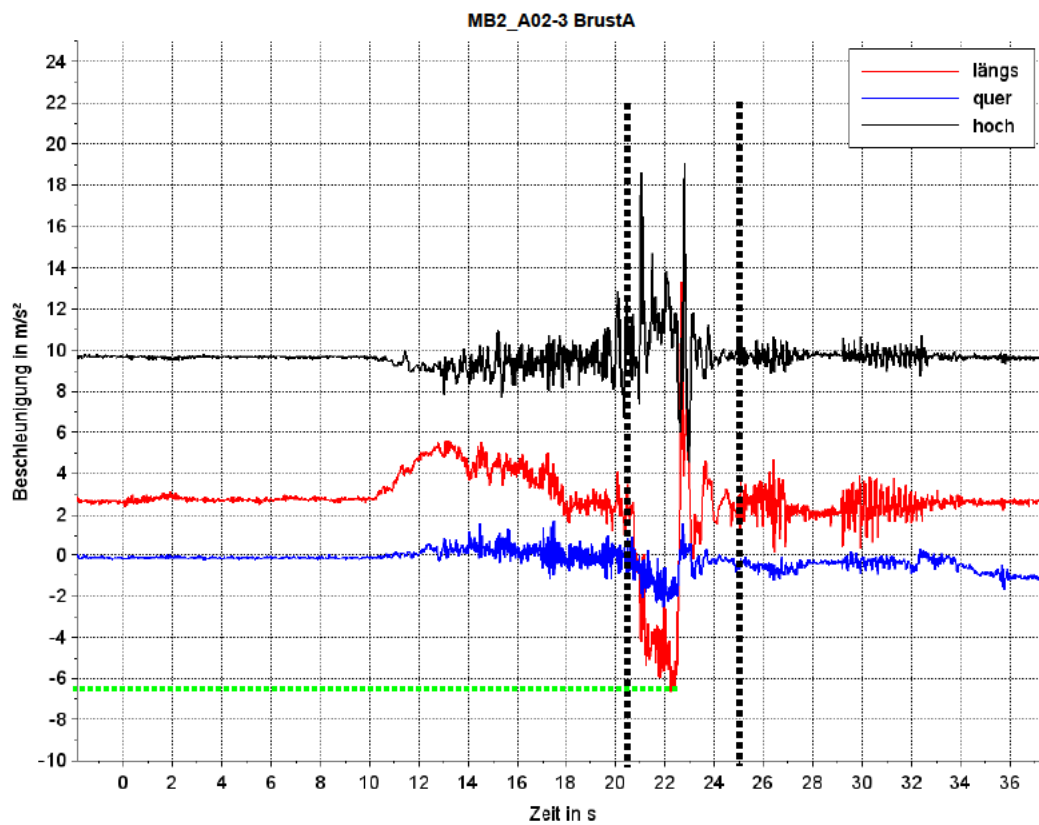


Diagramm 39: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A02.3.

4.2.4. Versuch A02.4 – 60 km/h

Im letzten Versuch wird eine Bremsung bei einer Einsatzfahrt aus rund $60 \frac{km}{h}$ simuliert. Im Anschluss an diese Versuchsfahrt dokumentierten die Probanden erneut ihre Aussagen, welche in Tabelle 9 dargelegt sind. Alle Probanden nahmen das Ereignis als Ruck und Rütteln wahr. Lediglich Proband B notierte zusätzlich ein Neigen des Fahrzeugs aufgrund der Bremsung.

Tabelle 9: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A02.4.

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A			✓	✓
Proband B		✓	✓	✓
Proband C			✓	✓

Auf den folgenden Seiten sind die Messdaten der externen Sensoren abgebildet. Diagramm 40 und 41 gibt die Messdaten der beiden IFU-Messboxen wieder. In der Spitze des negativen Ausschlags, welches im Diagramm 40 abgebildet ist, lässt sich ein Wert von ca. $10 \frac{m}{s^2}$ im Betrag ablesen. Gleiches lässt sich dem Diagramm 41 entnehmen (vgl. grüne Hilfslinie). Somit erfahren beide Probanden in etwa die gleiche Beschleunigung auf ihren Körper.

In den Diagrammen 42 und 43 wird einzeln die Beschleunigung auf den Kopf der Probanden betrachtet. Als Maximalwert in Längsrichtung lässt sich dem Diagramm 42 ein Wert von ca. $11,6 \frac{m}{s^2}$ ablesen. Zieht man hiervon den Offset von $0,5 \frac{m}{s^2}$ ab, so ergibt sich ein Gesamtwert von ca. $11,1 \frac{m}{s^2}$. Weiter zeigen sich im Diagramm 42 Beschleunigungswerte der Hochrichtung sowohl in positiver als auch in negativer Richtung von ca. $4 \frac{m}{s^2}$.

Ein ähnlicher Kurvenverlauf lässt sich im Diagramm 43 ablesen. Betrachtet man die Kurve der Messwerte bis zum Beginn des Ereignisbereichs, so lässt sich ein negativer Offset von rund $1 \frac{m}{s^2}$ feststellen. Durch die Messungengenauigkeit des Sensors lässt sich auch hier die Beschleunigung nur toleranzbehaftet

bestimmen. Betrachtet man die maximale Negativauslenkung im Betrag und den negativen Offset, so kann man einen Belastungswert von ca. $11,7 \frac{m}{s^2}$ aussagen. Ein Unterschied zeigt sich in der Hochrichtung der Belastung des Probanden A und B. Diagramm 43 stellt eine Beschleunigung des Kopfes in Hochrichtung von circa $8 \frac{m}{s^2}$ dar. Somit unterscheiden sich die Belastungen der Probanden in Hochrichtung um ca. $4 \frac{m}{s^2}$.

Die Auswertung der jeweiligen Brustsensoren ist in den Diagrammen 44 und 45 aufgezeigt. Auch bei diesen aufgenommenen Messdaten lässt sich ein Versatz feststellen. Diagramm 44 zeigt einen positiven Offset von rund $1 \frac{m}{s^2}$ in Längsrichtung. Zusammengefasst ergibt sich dadurch eine Beschleunigung von rund $10 \frac{m}{s^2}$ des Oberkörpers des Probanden A. In Hochrichtung pendeln sich Werte um $3 \frac{m}{s^2}$ ein.

Diagramm 45 zeigt einen positiven Versatz der Kurve in Längsrichtung von gut $2,7 \frac{m}{s^2}$. Addiert man die maximale Auslenkung von rund $5,5 \frac{m}{s^2}$, so ergibt sich eine resultierende Brustbeschleunigung von ca. $8,2 \frac{m}{s^2}$. Die Brustbeschleunigung der Probanden A und B sind somit vergleichbar.

Zusammenfassend resultiert aus diesem Fahrversuch, dass das hydraulische Tragesystem vor allem in der Beschleunigung des Kopfes des Probanden A entgegenwirkt. Dies lässt sich durch den geringen Beschleunigungswert im Vergleich zum sitzenden Probanden B begründen.

Die Messdaten des Probanden B können äquivalent auf den Probanden C übertragen werden.

Versuch A02.4 - Messdaten der IFU-Messboxen

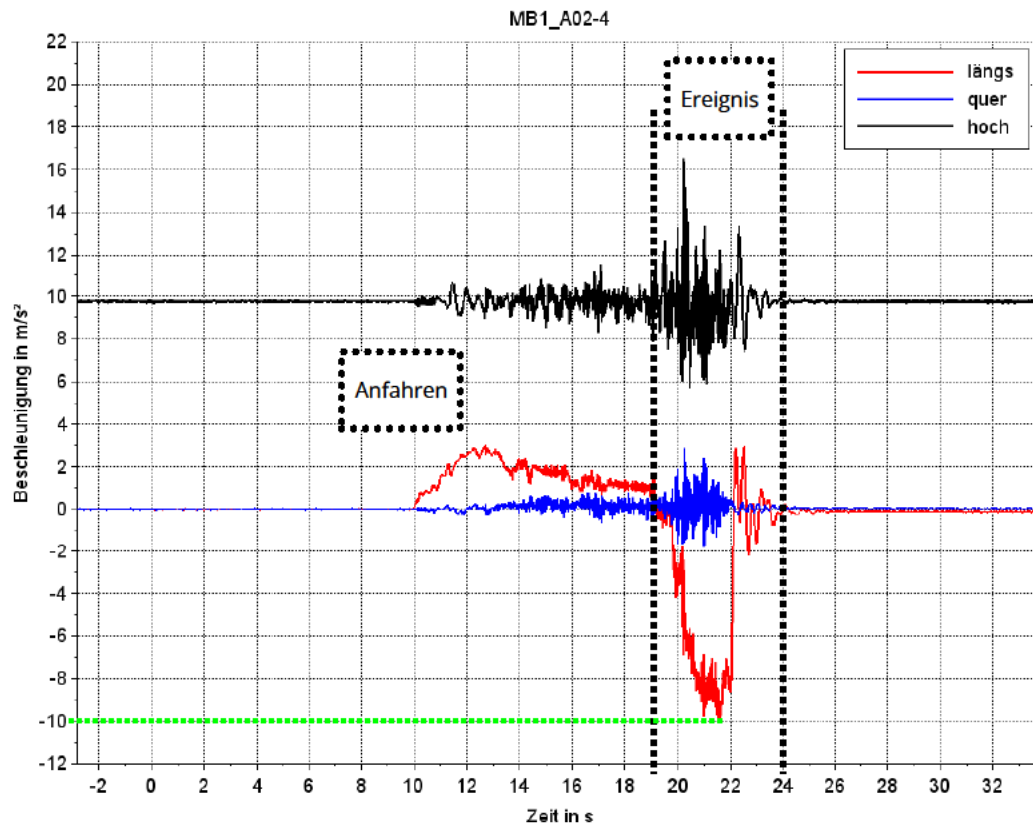


Diagramm 40: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A02.4.

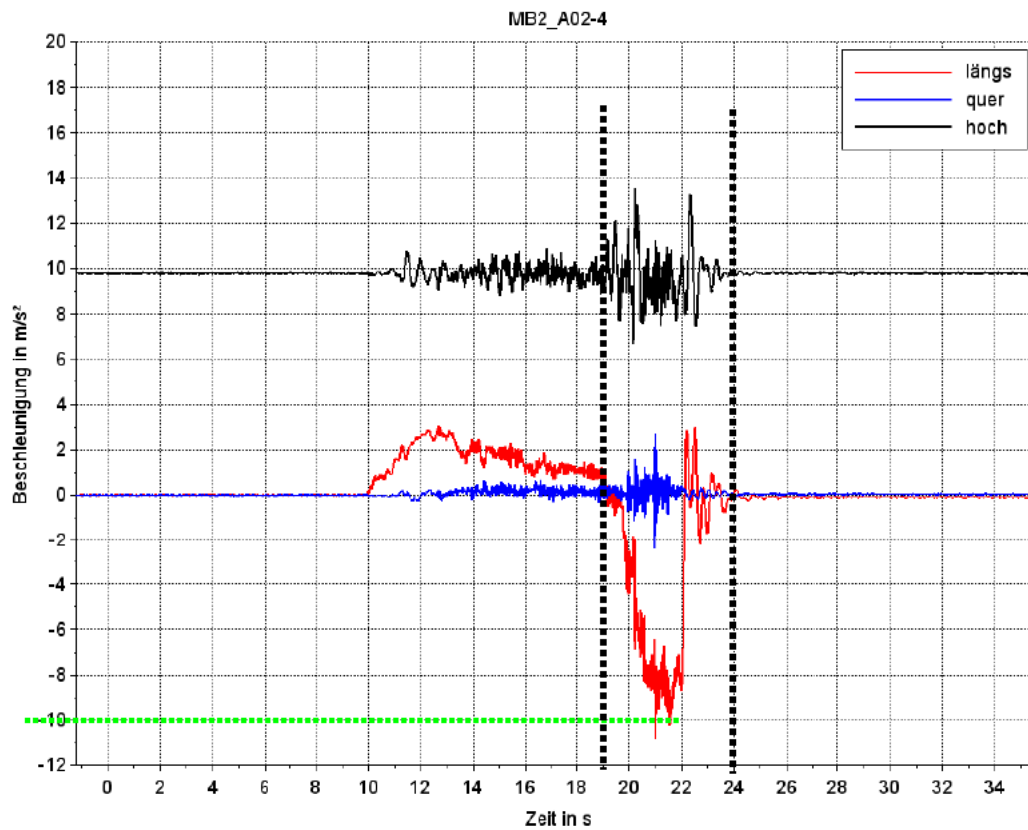


Diagramm 41: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A02.4.

Versuch A02.4 - Messdaten der Kopfsensoren

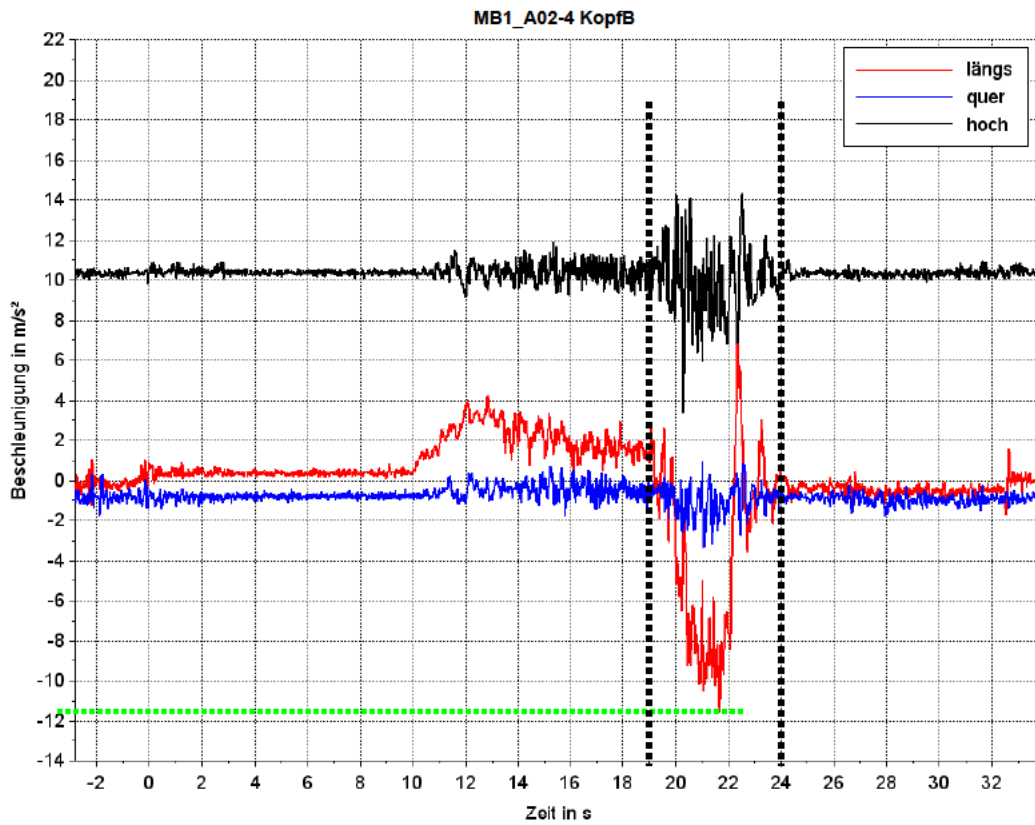


Diagramm 42: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A02.4.

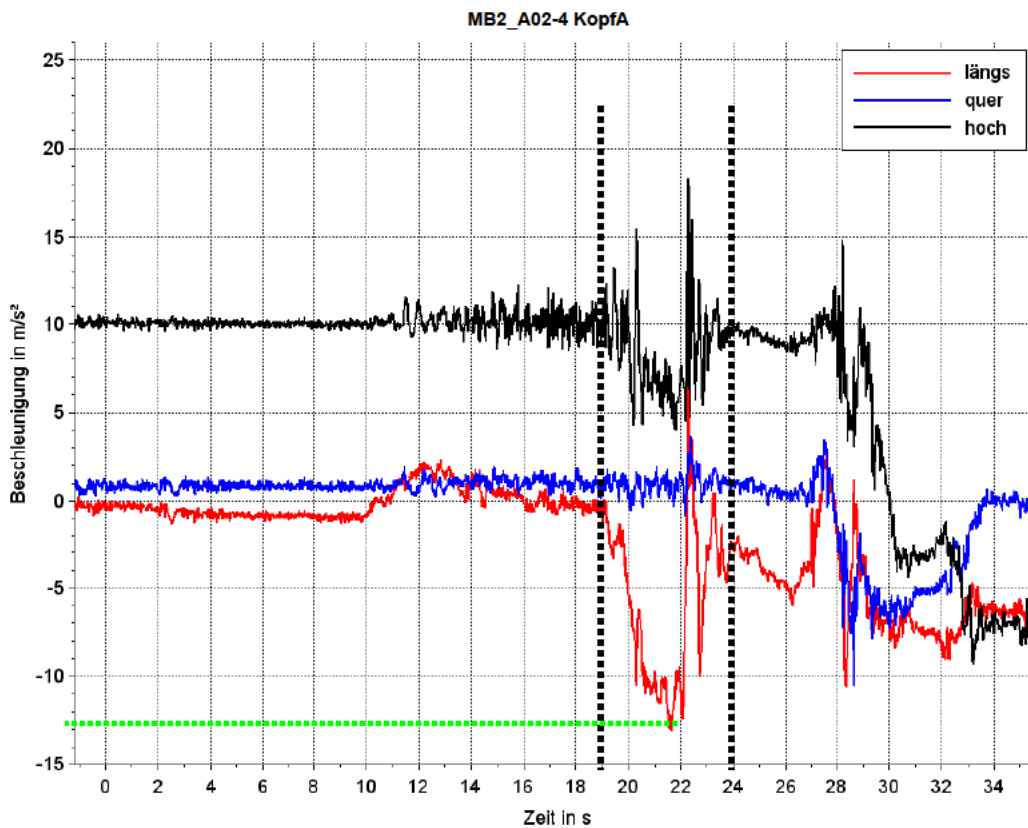


Diagramm 43: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A02.4.

Versuch A02.4 - Messdaten der Brustsensoren

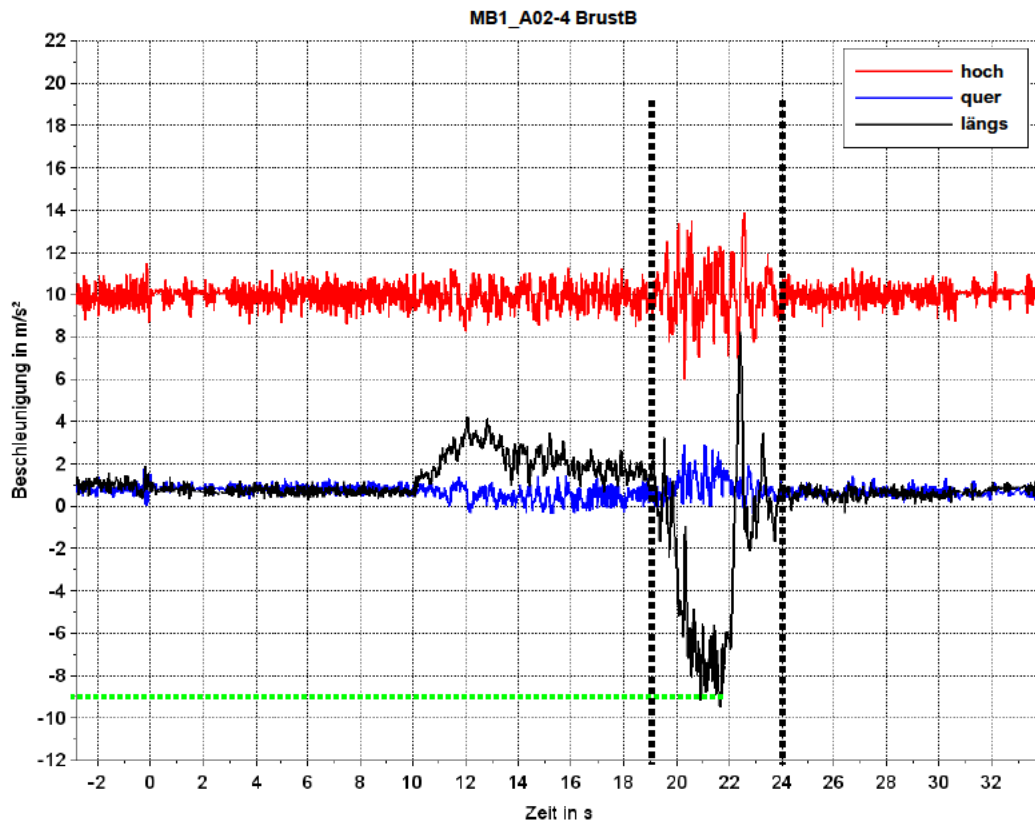


Diagramm 44: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A02.4.

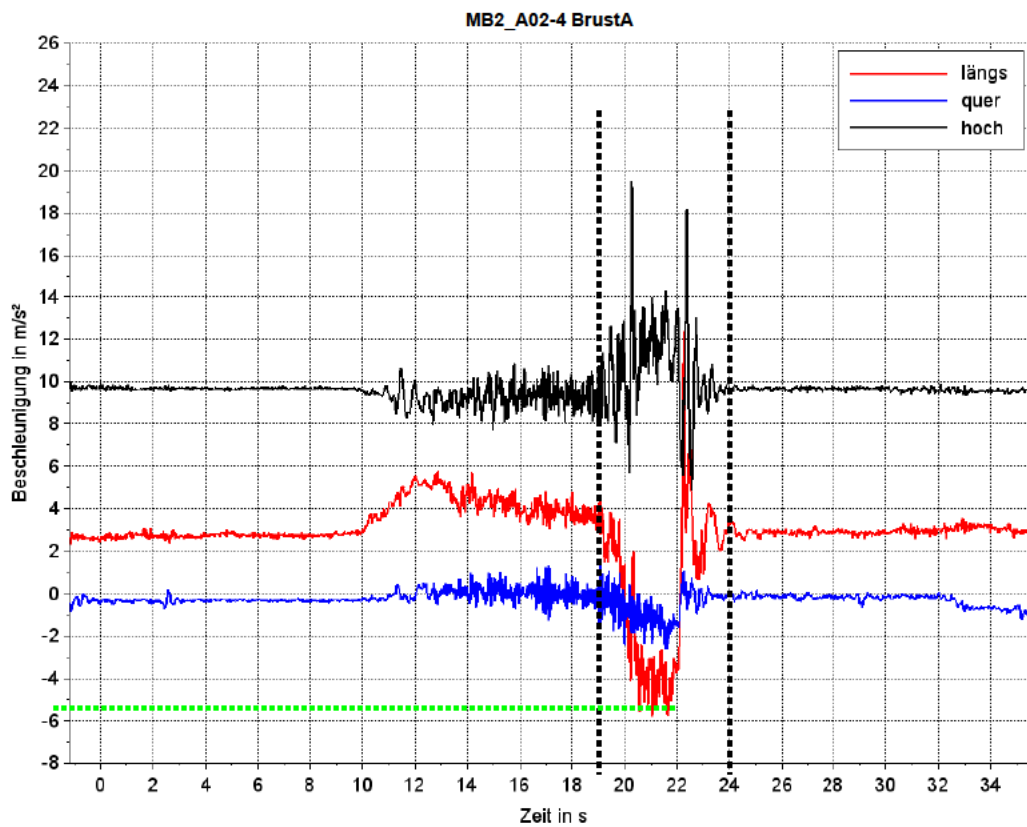


Diagramm 45: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A02.4.

4.3. Ergebnis Versuchsreihe Lastwechsel

In dieser Versuchsreihe wird das Ausweichen eines Rettungssagens im Stadtverkehr simuliert. Ziel der Einzelversuche ist es, die Beschleunigung der Insassen während einem sogenannten Lastwechsel des Fahrzeugs zu messen. Hierzu beschleunigt das Fahrzeug zunächst auf die Versuchsgeschwindigkeit, hält diese konstant und durchfährt dabei einen S-förmigen Parcours, der durch Pylonen begrenzt wird. Abbildung 29 zeigt die Bildersequenz, wobei exemplarisch diese Versuchsreihe dargestellt wird. Abbildung 30 bildet die Synchronisation der Videodateien der dritten Versuchsreihe exemplarisch ab. Im Anschluss an jeden Einzelversuch wurde die Aussage der Probanden auf einem Fragebogen dokumentiert.

Betrachtet man die Aussagen der Probanden zur taktilen Wahrnehmbarkeit des Ausweichens, welche im Diagramm 46 dargestellt sind, so zeigt sich, dass alle drei Probanden identische Aussagen machen. Der liegende Proband A dokumentiert über die drei Fahrversuche den niedrigsten Wert der Wahrnehmung. Dagegen nehmen die Probanden B und C das Ereignis gleich stark wahr.

In Gesamtheit der Aussagen der Probanden ist ein stetiger Anstieg der Insassenbelastungen zu erwarten. Weiter lässt sich bei dieser Versuchsreihe des Lastwechsels ist eine Beschleunigung der Insassen in Querrichtung wahrscheinlich vorausblicken.

In allen Diagrammen der Versuchsreihe grenzen die schwarz gepunkteten Linien den Bereich des Ereignisses im Fahrversuch ein. Die grünen und orangen Hilfslinien unterstützen bei der Ermittlung der Messwerte.

In dieser Versuchsreihe ist Proband A auf der Trage positioniert. Proband B sitzt im Begleitstuhl des Patientenraums neben der Trage. Auf dem Beifahrer-

sitz der Fahrerkabine des Rettungswagens sitzt der dritte Proband C. Proband C wurde durch seine Position auf dem Beifahrersitz nicht mit Messtechnik instrumentiert.

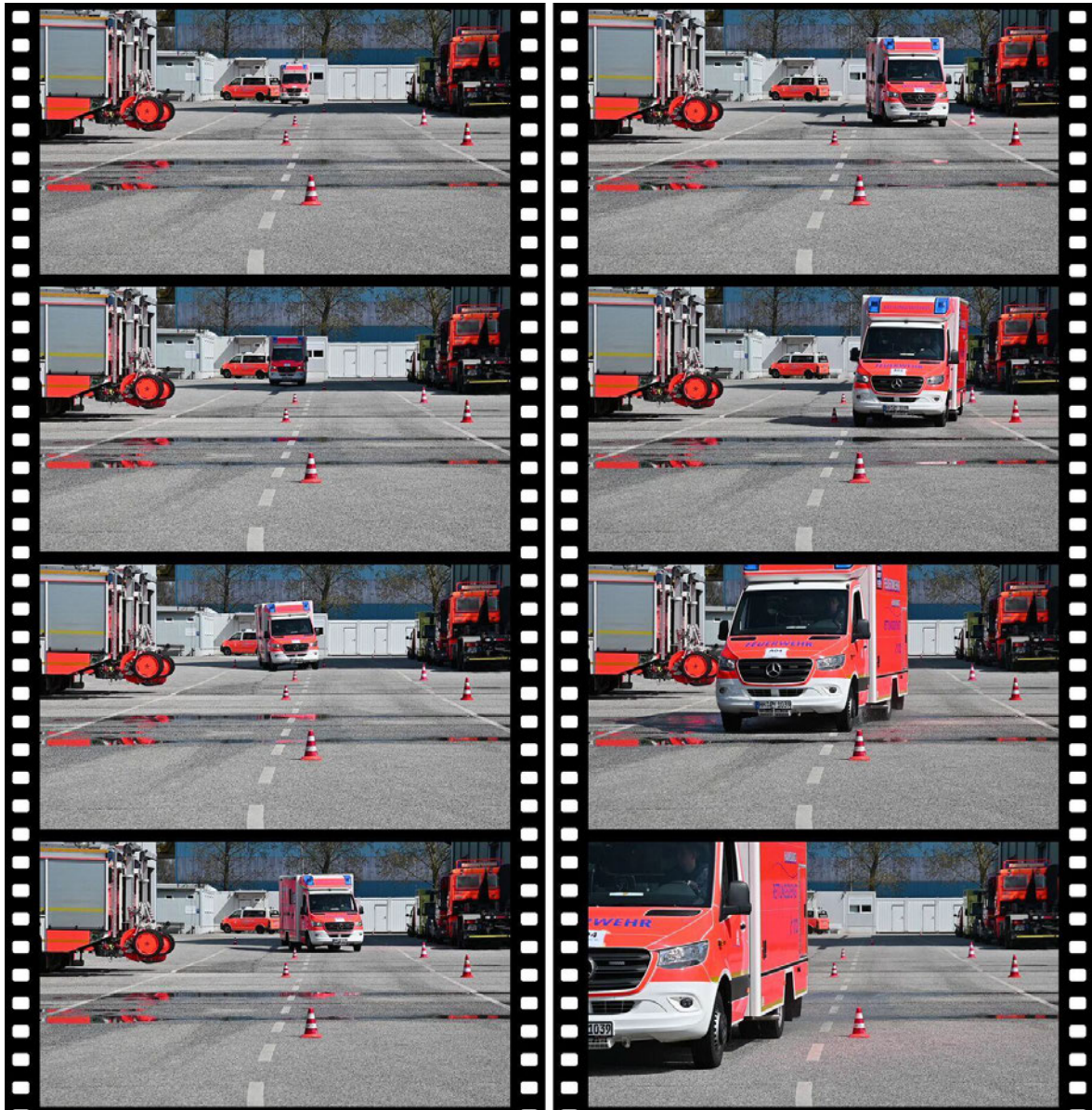


Abbildung 29: Bildersequenz der durchgeführten Versuchsreihe A03.



Abbildung 30: Exemplarische Videosynchronisation der Versuchsreihe A03.

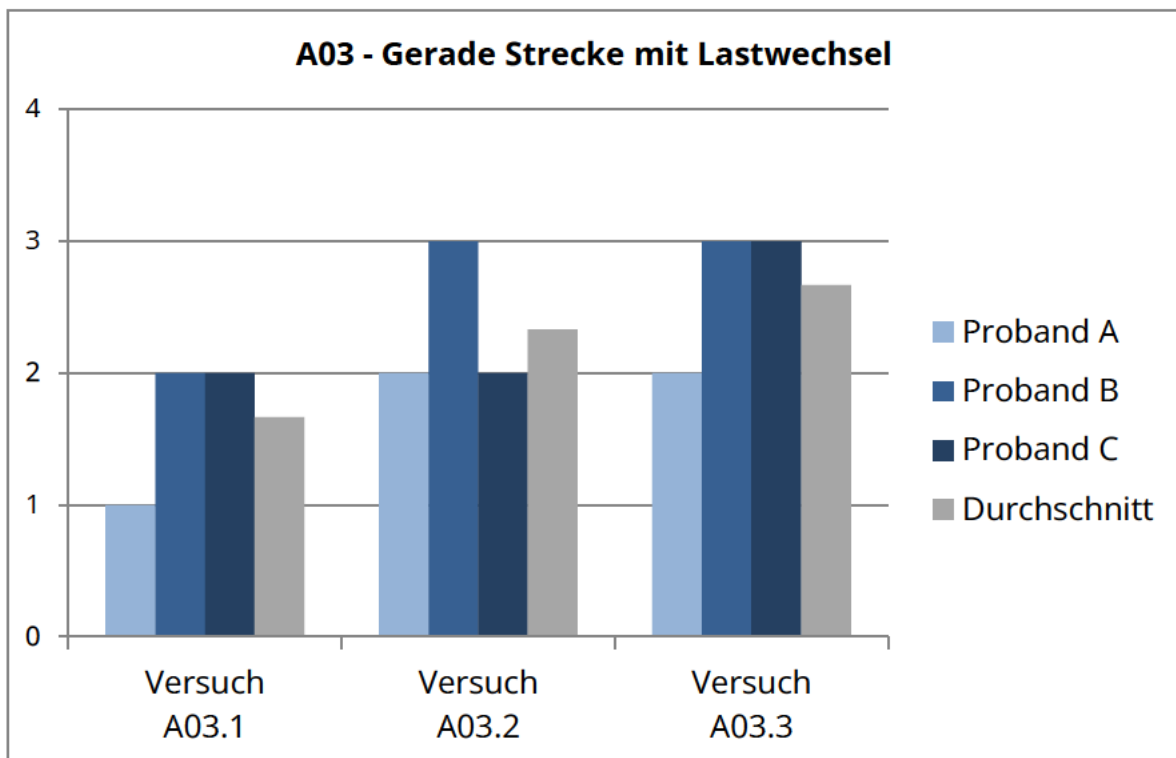


Diagramm 46: Ergebnis des Fragebogens der Bemerkbarkeit zum Versuch A03.

Skala: 0=nicht, 1=kaum, 2=normal, 3=stark, 4=sehr stark

4.3.1. Versuch A03.1 – 15 km/h

Im ersten Fahrversuch der Versuchsreihe beschleunigt der Rettungswagen auf rund $15 \frac{km}{h}$, bevor er die S-Kurve mit konstanter Geschwindigkeit durchfährt.

Die hierzu dokumentierten Aussagen der Probanden sind in Tabelle 10 ersichtlich. Erwartungsgemäß notieren alle Probanden gleichermaßen ein Neigen bzw. Wanken des Fahrzeugs. Dies ist auf den gefahrenen Streckenverlauf und damit verbunden Wanken des Fahrzeugs zur Seite zurückzuführen.

Tabelle 10: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A03.1.

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A		✔		
Proband B		✔		
Proband C		✔		

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Messwerte der Sensoren dargestellt. Diagramm 47 zeigt die Messdaten der IFU-Messbox, welche vor dem Probanden A positioniert wurde. Es zeigen sich in Querrichtung zwei Ausschläge in positiver als auch in negativer Richtung. Dieser Kurvenverlauf spiegelt das Fahren einer Kurve des Fahrzeugs wider. Der Maximalwert beträgt jeweils in positiver als auch in negativer Richtung ca. $1,5 \frac{m}{s^2}$ (vgl. grüne Hilfslinie). Zudem zeigt sich in Hochrichtung ebenfalls ein Maximalwert des Kurvenverlaufs von ca. $3,7 \frac{m}{s^2}$. Einen ähnlichen Verlauf liefert das Diagramm 48. Proband B erfährt äquivalent zum Proband A die gleiche Belastung.

Die einwirkende Belastung auf den Kopf der Probanden ist in den Diagrammen 49 und 50 festgehalten. Trotz des Rauschens des Kopfsensors, lässt sich im Diagramm 49 eine Belastung von rund $2,3 \frac{m}{s^2}$ ablesen. Dieser Wert setzt sich aus dem negativen Versatz und der maximalen Amplitude des Kurvenverlaufs zusammen. Diagramm 50 weist einen ähnlichen Kurvenverlauf in Querrichtung auf. Die Resultierende der Beschleunigung des Kopfes von ca. $2 \frac{m}{s^2}$ er-

rechnet sich aus dem Maximalwert und dem negativen Offset der Messkurve. Weiter zeigt sich ein Ausschlag im Ereignisbereich in Hochrichtung von ca. $16 \frac{m}{s^2}$. Zieht man von diesem Wert die Erdschleunigung ab, so erhält man eine zusätzliche Belastung von ca. $6,2 \frac{m}{s^2}$.

Die Diagramme 51 und 52 zeigen die Messdaten der verwendeten Brustsensoren des Probanden A und B. Die Belastung des Probanden A ist mit einem Wert von etwa $1,7 \frac{m}{s^2}$ in Querrichtung im Diagramm 51 abzulesen (vgl. grüne Hilfslinie). Weiter zeigen sich Beschleunigungen in Längs- und Hochrichtung. Diagramm 52 weist eine identische Belastung in Querrichtung auf. Proband B erfährt in etwa eine Beschleunigung von ebenfalls $1,7 \frac{m}{s^2}$. Vergleicht man Diagramm 51 und 52, so fällt auf, dass der maximale Ausschlag im Diagramm 52 in Hochrichtung einen höheren Wert besitzt. Schlussfolgernd dämpft das hydraulisch gefederte Tragesystem bei diesem Versuch die Belastung des liegenden Probanden.

Fazit dieses Fahrversuches ist eine gleiche Belastung der beiden Probanden in Querrichtung. Lediglich im Kopf- und Brustbereich lassen sich in Hochrichtung kleine Unterschiede feststellen. Demnach wirkt sich das hydraulische Tragesystem positiv auf die Belastung des Probanden A aus. Es dämpft durch das Heben und Senken der Trage die einwirkende Beschleunigung auf den Probanden A. Ersichtlich ist dieser Einfluss an den unterschiedlichen Höhen der Amplituden der Messkurven. Analog können die Messdaten des Probanden B auf den Probanden C übertragen werden.

Versuch A03.1 - Messdaten der IFU-Messboxen

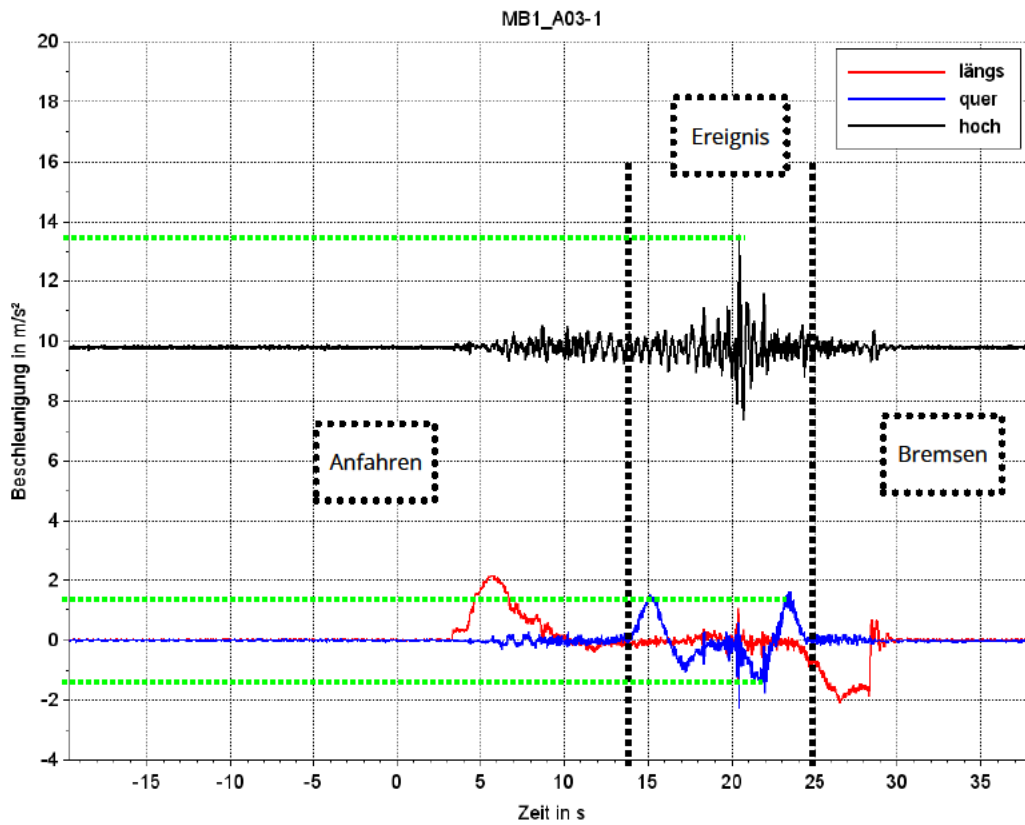


Diagramm 47: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A03.1.

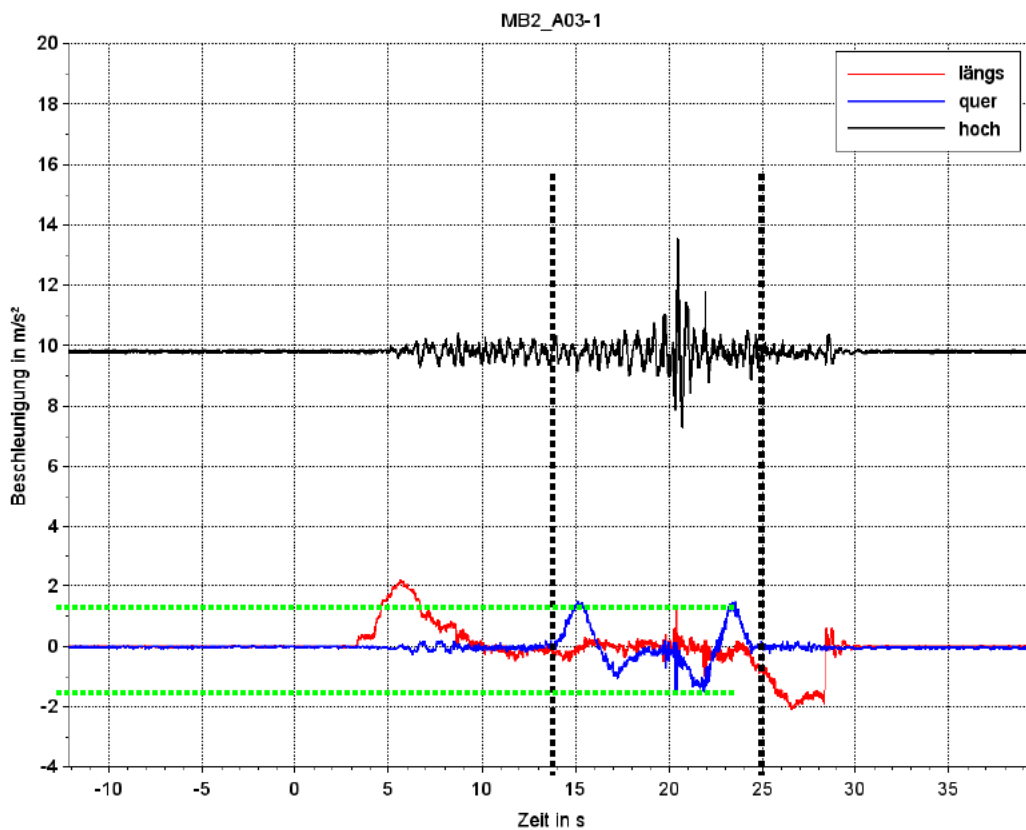


Diagramm 48: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A03.1.

Versuch A03.1 - Messdaten der Kopfsensoren

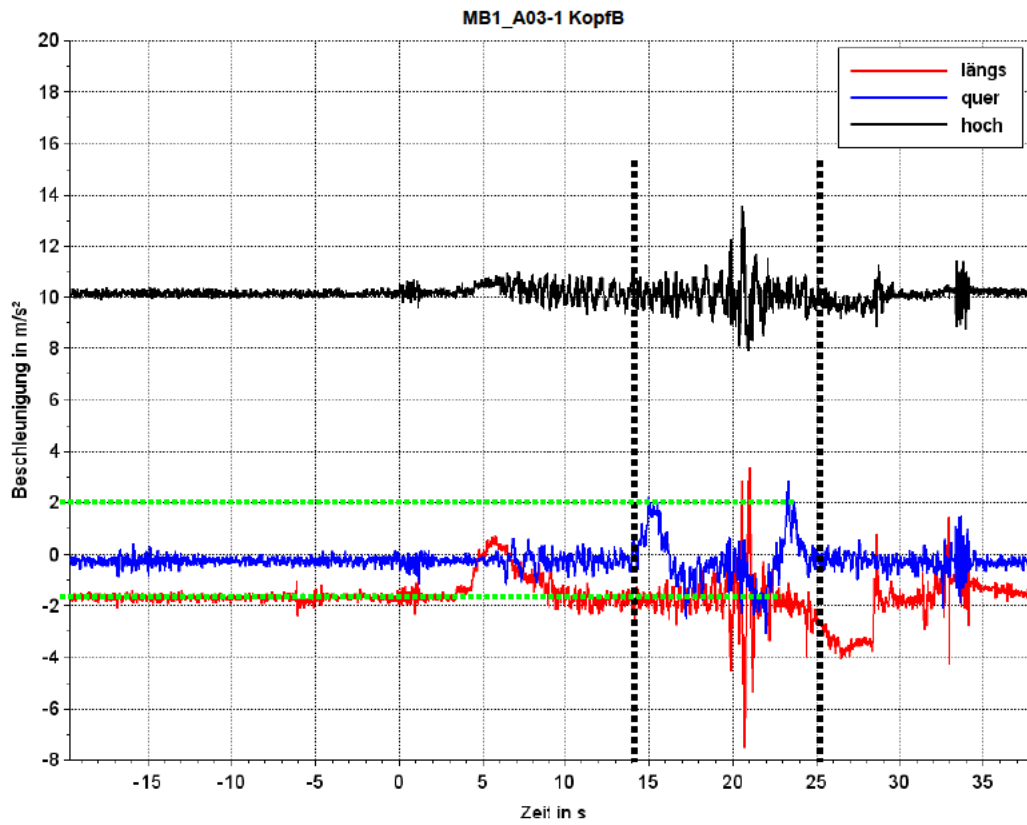


Diagramm 49: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A03.1.

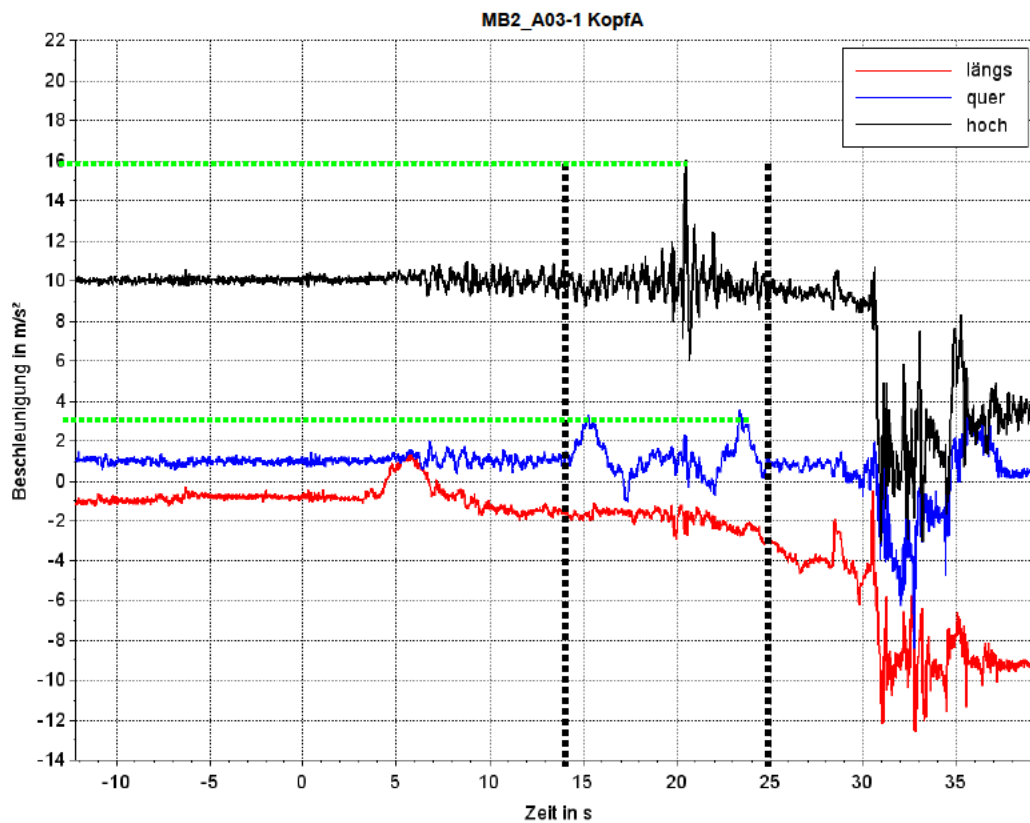


Diagramm 50: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A03.1.

Versuch A03.1 - Messdaten der Brustsensoren

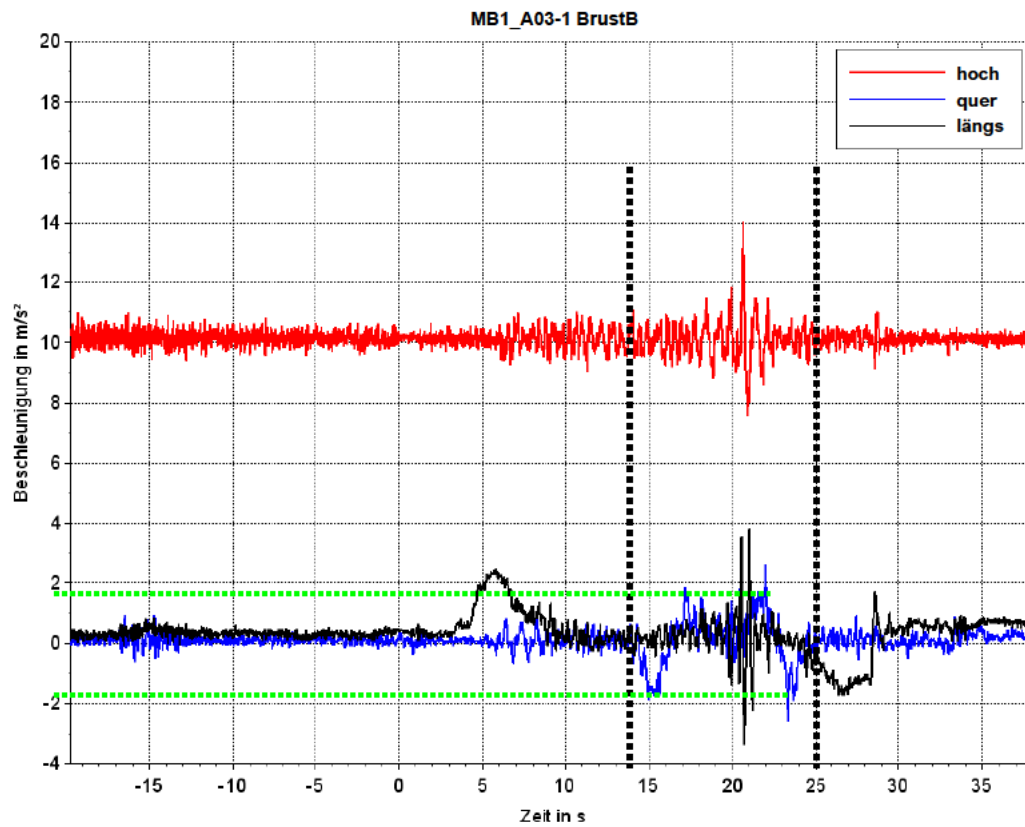


Diagramm 51: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A03.1.

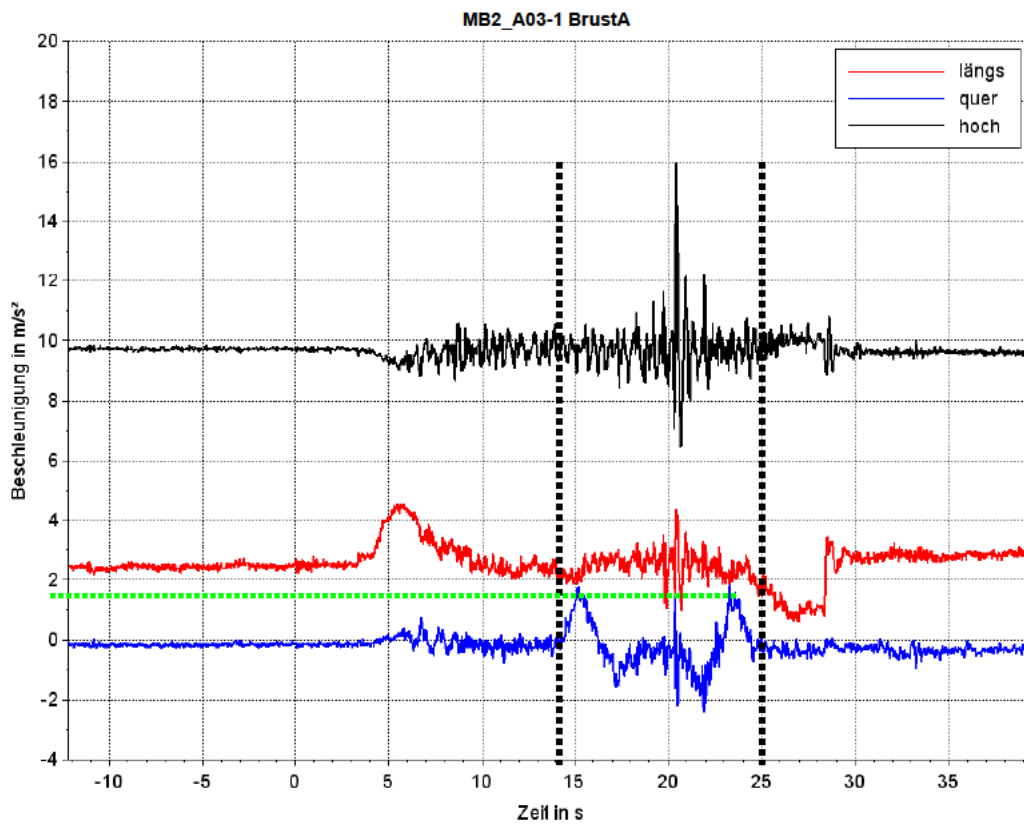


Diagramm 52: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A03.1.

4.3.2. Versuch A03.2 – 30 km/h

Im zweiten Fahrversuch wurde mit dem Rettungswagen ein Lastwechsel mit einer Geschwindigkeit von ca. $30 \frac{km}{h}$ durchgeführt.

Die Aussagen der Probanden zur taktilen Wahrnehmbarkeit sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Alle Probanden bemerken ein Wanken des Fahrzeugs. Diese Aussagen lassen sich auf die Wankbewegungen des Rettungswagens um die Fahrzeuglängsachse während der Kurvenfahrt entlang des Parcours zurückführen. Des Weiteren nahm Proband A ein Rütteln des Rettungswagens wahr. Analog notierte Proband B ein Vibrieren. Diese beiden Aussagen lassen sich durch Unebenheiten auf der Fahrbahn begründen, da beide Probanden im Bereich der Hinterachse positioniert waren.

Tabelle 11: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A03.2.

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A		✓		✓
Proband B	✓	✓		
Proband C		✓		

Die aufgenommenen Belastungen der IFU-Messboxen sind in den Diagrammen 53 und 54 ersichtlich.

Der blaue Kurvenverlauf zu Proband A, der im Diagramm 53 dargestellt ist, weist eine Belastung in positiver Querrichtung von ca. $2,3 \frac{m}{s^2}$ und in negativer Querrichtung von rund $2,9 \frac{m}{s^2}$ auf. Einen analogen Kurvenverlauf zeigt das Diagramm 54, welcher dem Probanden B zu zuordnen ist. Dort zeichnet die IFU-Messbox ebenfalls Werte von ca. $2,3 \frac{m}{s^2}$ in positiver und $2,9 \frac{m}{s^2}$ in negativer Querrichtung auf.

Ein Versatz der Messkurven ist in den Diagrammen 55 und 56 der beiden Kopfsensoren zu erkennen. Diagramm 55 zeigt die Kopfbeschleunigung des Probanden A. Berücksichtigt man den Offset in negativer Richtung von

ca. $0,1 \frac{m}{s^2}$, so ergibt sich eine Beschleunigung in positiver Querrichtung von ca. $3,1 \frac{m}{s^2}$. In negativer Querrichtung beträgt der Wert etwa $3,4 \frac{m}{s^2}$. Diagramm 56 weist ein Offset des Kurvenverlaufs der Beschleunigung in Querrichtung einen ca. $1 \frac{m}{s^2}$ auf. In positiver Koordinatenrichtung ergibt dies einen Beschleunigungswert von etwa $3 \frac{m}{s^2}$. Subtrahiert man den Versatz der Kurve vom Betrag des negativen Maximalwerts, so erhält man die Beschleunigung in negativer Richtung von ca. $4,1 \frac{m}{s^2}$.

Die Messdaten der Brustsensoren der Probanden A und B sind jeweils in den Diagrammen 57 und 58 abgebildet. Auf den Probanden A wirkt während des Fahrvorgangs eine Beschleunigung in positiver Querrichtung von rund $4,2 \frac{m}{s^2}$ ein. Diese errechnet sich aus dem positiven Offset von etwa $0,2 \frac{m}{s^2}$ und der maximalen Amplitude von ca. $4,2 \frac{m}{s^2}$. In negativer Richtung der Querkoordinate wirken rund $3,2 \frac{m}{s^2}$ berechnet ein. Diagramm 58 weist einen Offset der Datenkurve des Probanden B von ca. $1 \frac{m}{s^2}$ auf. Demnach ergibt sich eine Brustbelastung in positiver Querrichtung des Probanden B von etwa $3 \frac{m}{s^2}$ und in negativer Querrichtung von gut $4,5 \frac{m}{s^2}$.

Fasst man diesen zweiten Fahrversuch zusammen, so zeigt sich unter Berücksichtigung von Messunsicherheiten eine äquivalente Belastung der beiden Probanden A und B in Querrichtung. Die Messdaten des Probanden B können zudem analog auf den Probanden C übertragen werden.

Versuch A03.2 - Messdaten der IFU-Messboxen

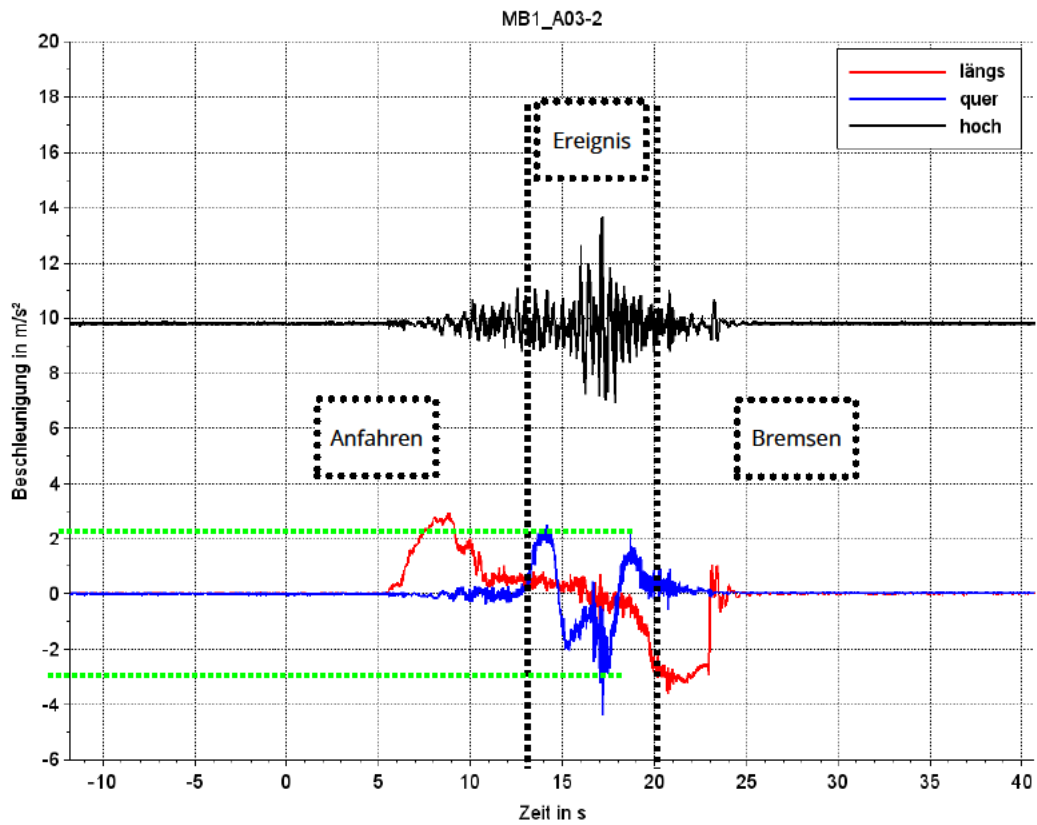


Diagramm 53: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A03.2.

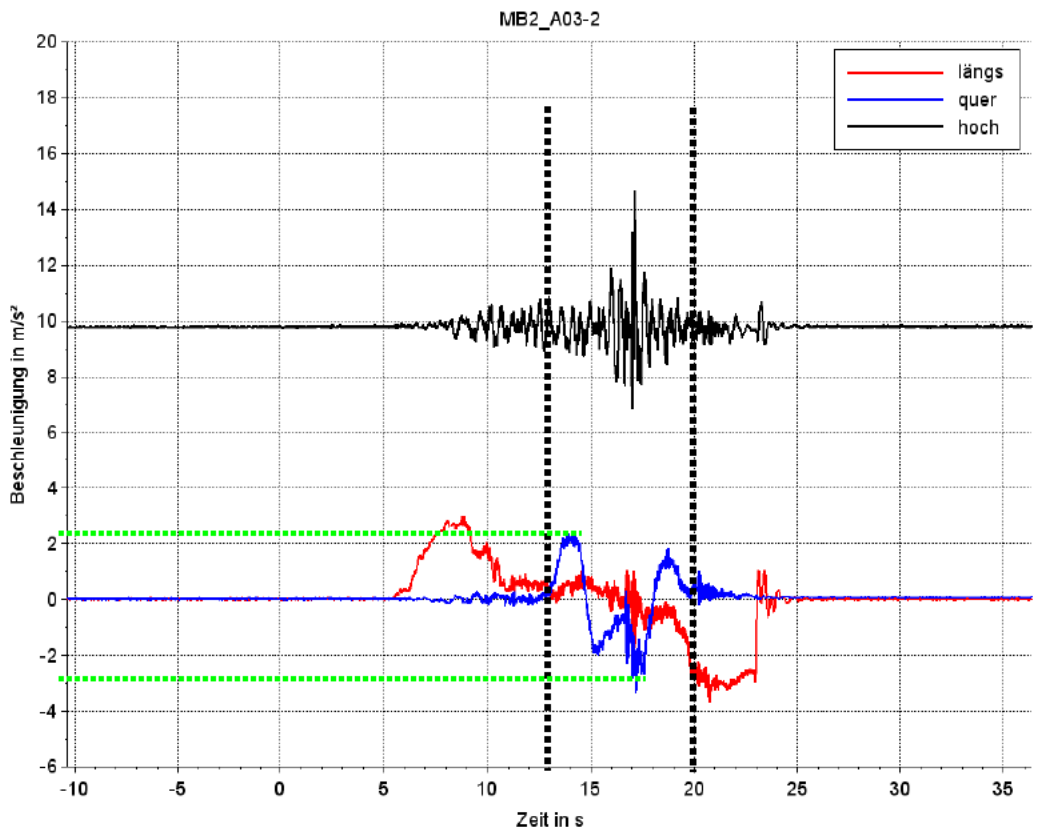


Diagramm 54: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A03.2.

Versuch A03.2 - Messdaten der Kopfsensoren

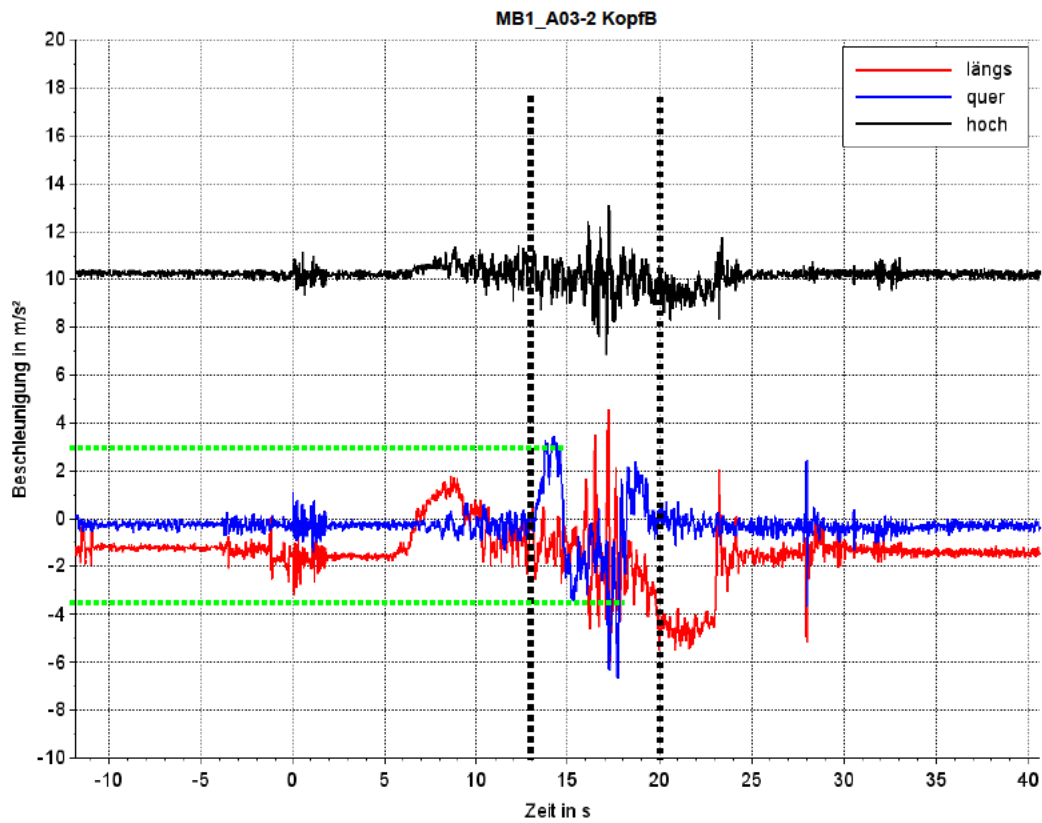


Diagramm 55: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A03.2.

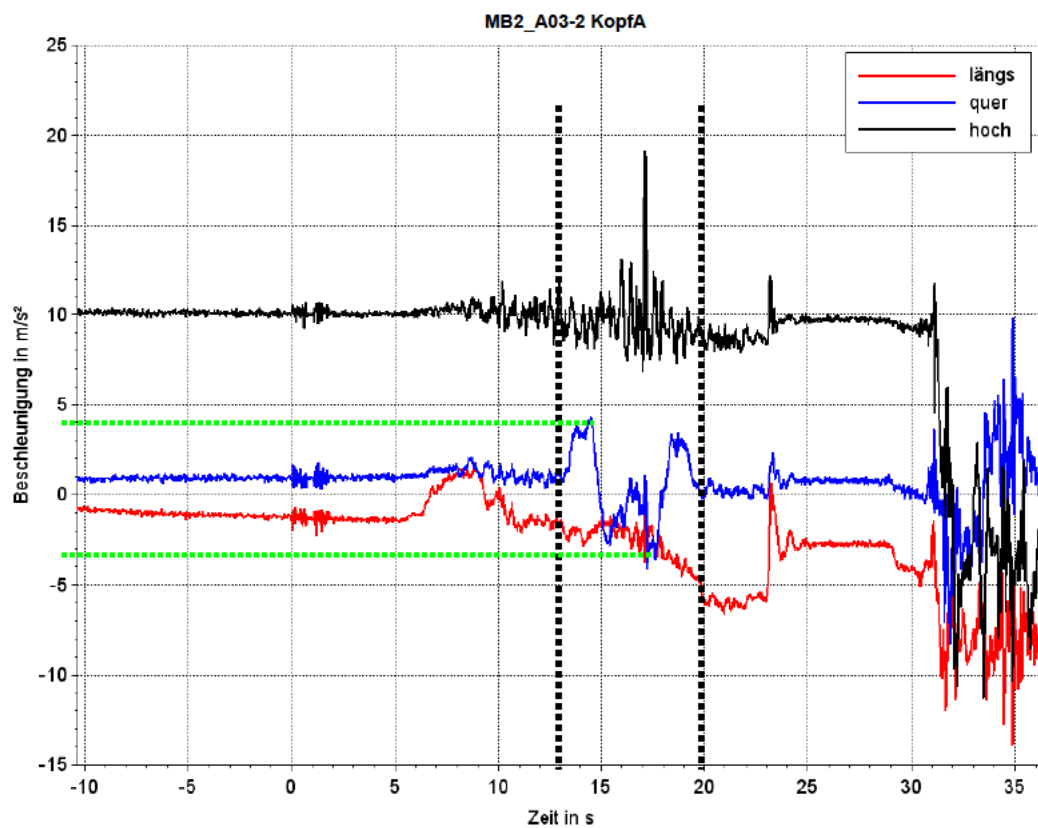


Diagramm 56: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A03.2.

Versuch A03.2 - Messdaten der Brustsensoren

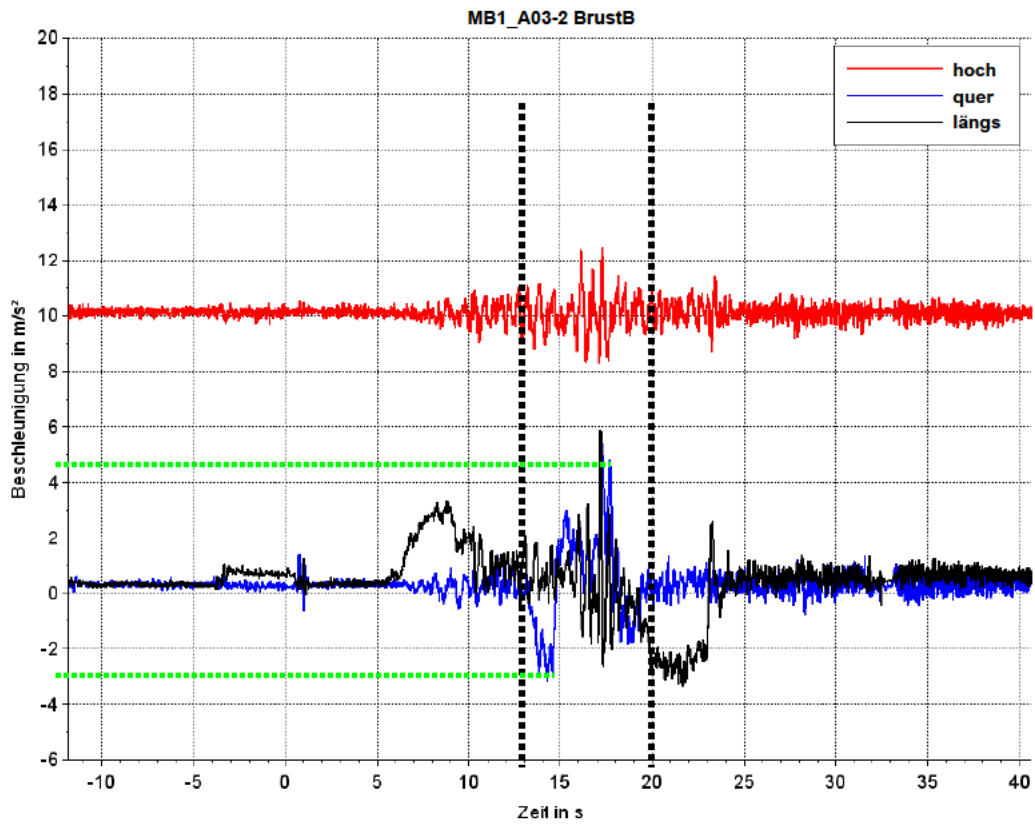


Diagramm 57: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A03.2.

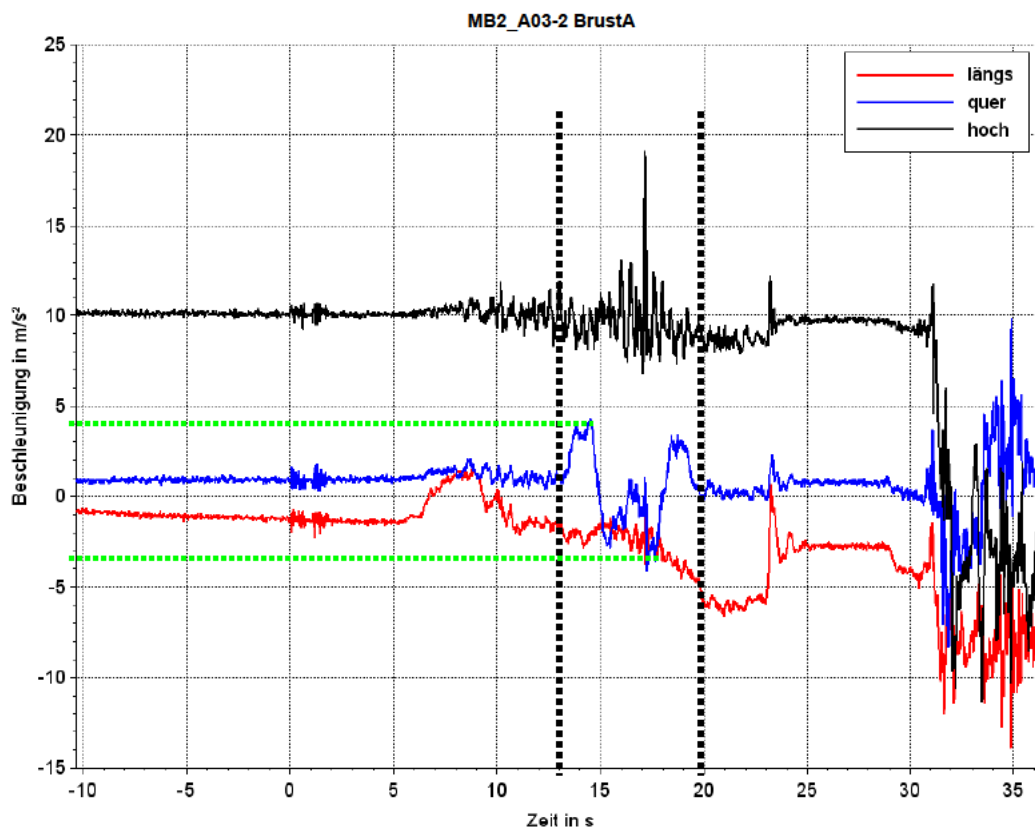


Diagramm 58: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A03.2.

4.3.3. Versuch A03.3 – 45 km/h

Um ein sehr zügiges Ausweichmanöver zu simulieren, wurde der dritte Fahrversuch mit einer Geschwindigkeit mit rund $45 \frac{km}{h}$ durchgeführt.

Die Probanden notieren im Anschluss ihre Aussage der taktilen Wahrnehmbarkeit. Diese sind in der Tabelle 12 ersichtlich. Proband A dokumentierte ein Rütteln des Rettungswagens. Dagegen nahm Proband B ein Vibrieren im Fahrzeug wahr. Alle Probanden notieren ein Wanken des Fahrzeugs. Dies ist durch die Rotation des Rettungswagens während einer Kurvenfahrt in Längsrichtung begründet.

Tabelle 12: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A03.3.

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A		✓		✓
Proband B	✓	✓		
Proband C		✓		

Die Messdaten der IFU-Messbox, welche vor dem Probanden A positioniert wurde, sind im Diagramm 59 dargestellt. Der Maximalwert in positiver Querrichtung beträgt rund $2,5 \frac{m}{s^2}$. Das Minimum des Kurvenverlaufs in Querrichtung liegt bei etwa $2,7 \frac{m}{s^2}$. Weiter zeigt sich eine maximale Auslenkung in Hochrichtung von ca. $4,2 \frac{m}{s^2}$. Ein ähnliches Bild des Kurvenverlaufs und der Messwerte zeigt das Diagramm 60, welche vor dem Probanden B positioniert wurde. Die Auswertungen der Kopfsensoren sind in den Diagrammen 61 und 62 dargestellt. Diagramm 61 zeigt einen negativen Offset von ca. $0,1 \frac{m}{s^2}$. Der errechnete Wert der maximalen Auslenkung in positiver Querrichtung beträgt dadurch ca. $4,6 \frac{m}{s^2}$. Die negative Maximalauslenkung liegt bei ca. $5,7 \frac{m}{s^2}$. Diagramm 62 stellt die Messwerte des Kopfsensors des Probanden B dar. Durch den direkten Vergleich zum Probanden A ist ersichtlich, dass sich die Auslenkung der Kurve in Hochrichtung des Probanden B deutlich erhöht. Der Maxi-

malwert in positiver Hochrichtung liegt in etwa bei $9,1 \frac{m}{s^2}$. Durch den positiven Offset des Kurvenverlaufs in Querrichtung von ca. $1 \frac{m}{s^2}$ ergibt sich als Maximalwert der Beschleunigung ca. $4 \frac{m}{s^2}$. In negativer Querrichtung beträgt der Messwert ca. $4,5 \frac{m}{s^2}$.

Die Brustsensoren der Probanden A und B sind in den Diagrammen 63 und 64 ausgewertet. Proband A erfährt zunächst eine Beschleunigung in negativer Querrichtung von rund $4,2 \frac{m}{s^2}$, wie es im Diagramm 63 ersichtlich ist. Dieser Wert ergibt sich aus dem Offset des Kurvenverlaufs und der maximalen Auslenkung in negativer Koordinatenrichtung. Anschließend wird der Proband A mit etwa $4,9 \frac{m}{s^2}$ in positiver Querrichtung beschleunigt (vgl. grüne Hilfslinie und Offset). Der Versatz der Messkurve im Diagramm 64 beträgt etwa $0,2 \frac{m}{s^2}$ in negativer Richtung. Es ergibt sich dadurch eine Maximalbelastung des Probanden B in positiver Querrichtung von ca. $4,2 \frac{m}{s^2}$. In negativer Koordinatenrichtung der Querbeschleunigung beträgt der maximale Messwert rund $5,8 \frac{m}{s^2}$ mit einer Einbeziehung des Offsets. Deutlich zu erkennen ist ebenfalls eine Auslenkung in Hochrichtung mit einem Maximalwert von ca. $9,2 \frac{m}{s^2}$.

Fazit dieses Fahrversuches ist eine gleichermaßen einwirkende Belastung auf die Probanden A und B in Querrichtung. Es zeigt sich jedoch, dass das hydraulisch gefederte Tragesystem die Beschleunigung des Kopfes und der Brust in Hochrichtung des Probanden A positiv beeinflusst und minimiert. Äquivalent können die Messdaten des Probanden B durch seine sitzende Position auf den Probanden C übertragen werden.

Versuch A03.3 - Messdaten der IFU-Messboxen

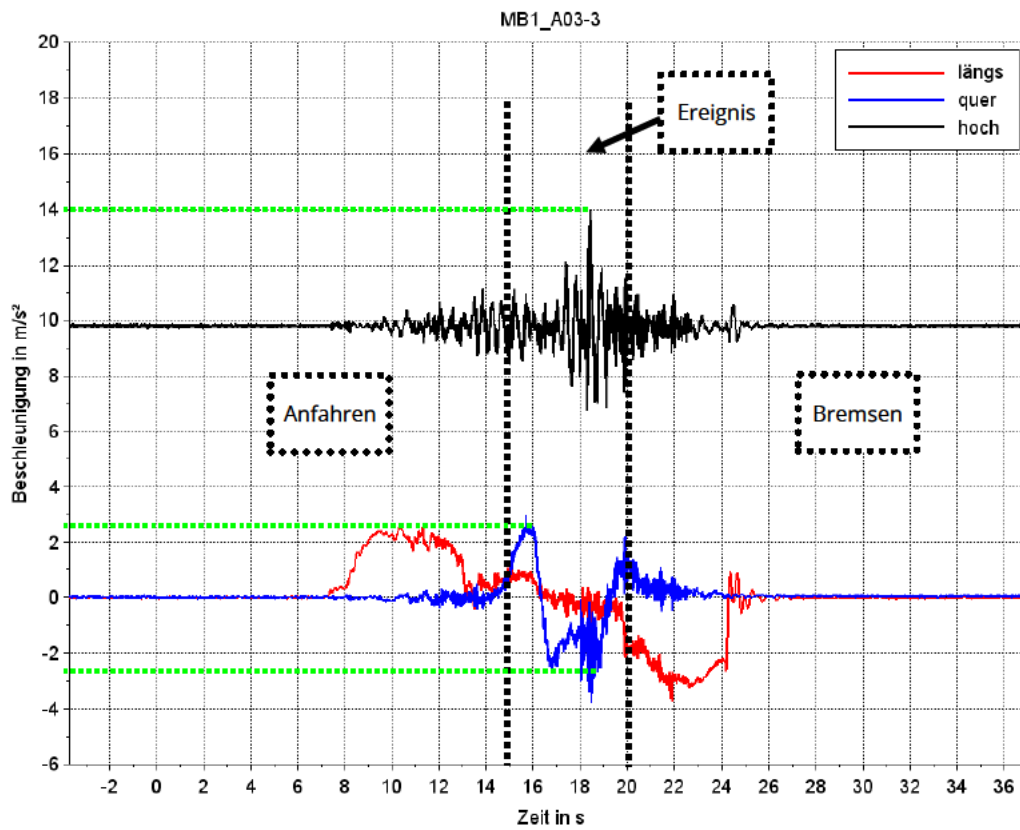


Diagramm 59: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden 1 im Versuch A03.3.

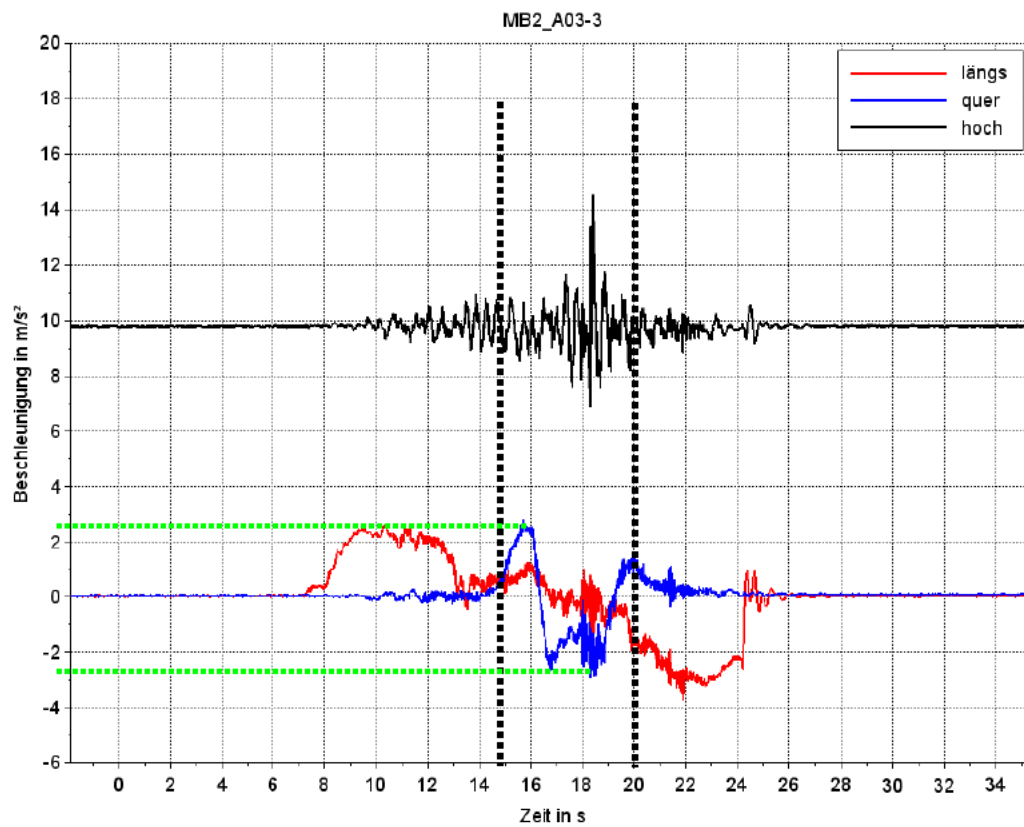


Diagramm 60: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A03.3.

Versuch A03.3 - Messdaten der Kopfsensoren

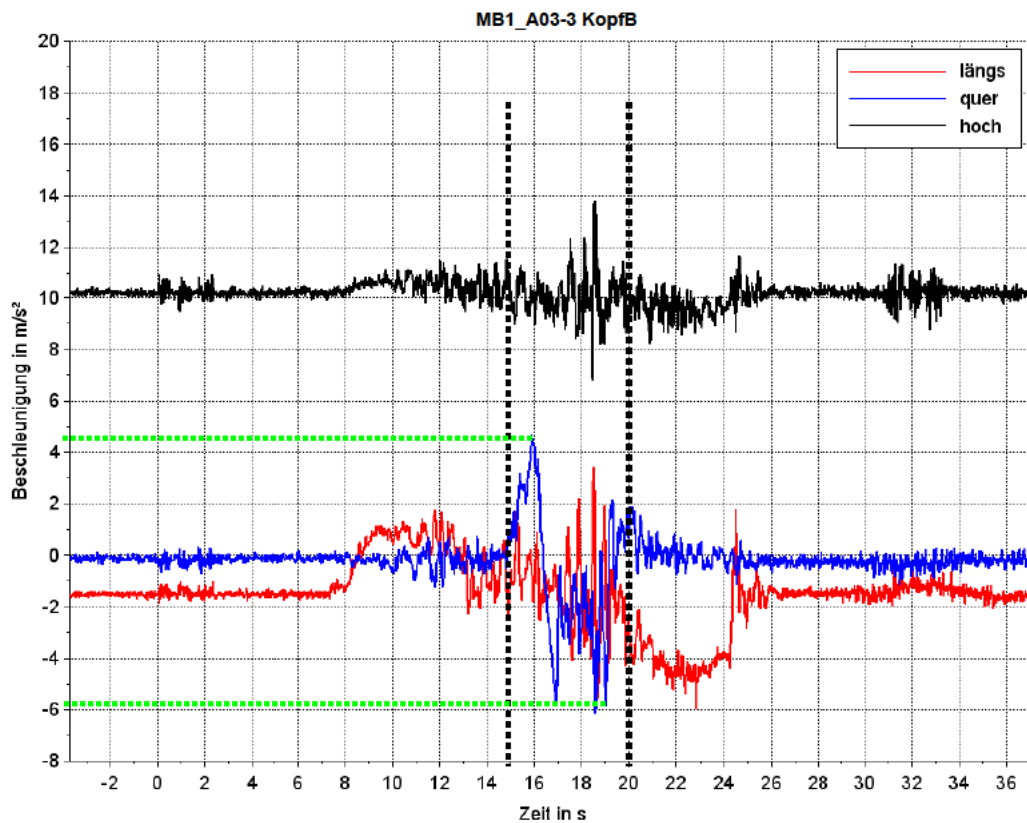


Diagramm 61: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A03.3.

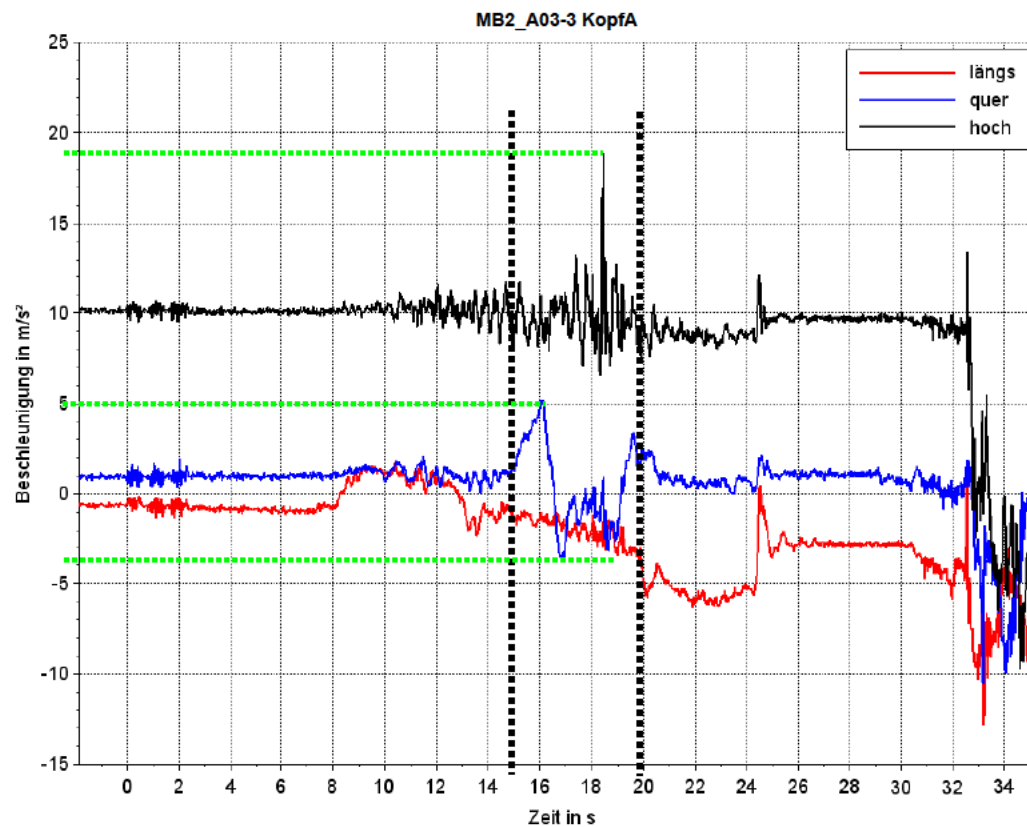


Diagramm 62: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A03.3.

Versuch A03.3 - Messdaten der Brustsensoren

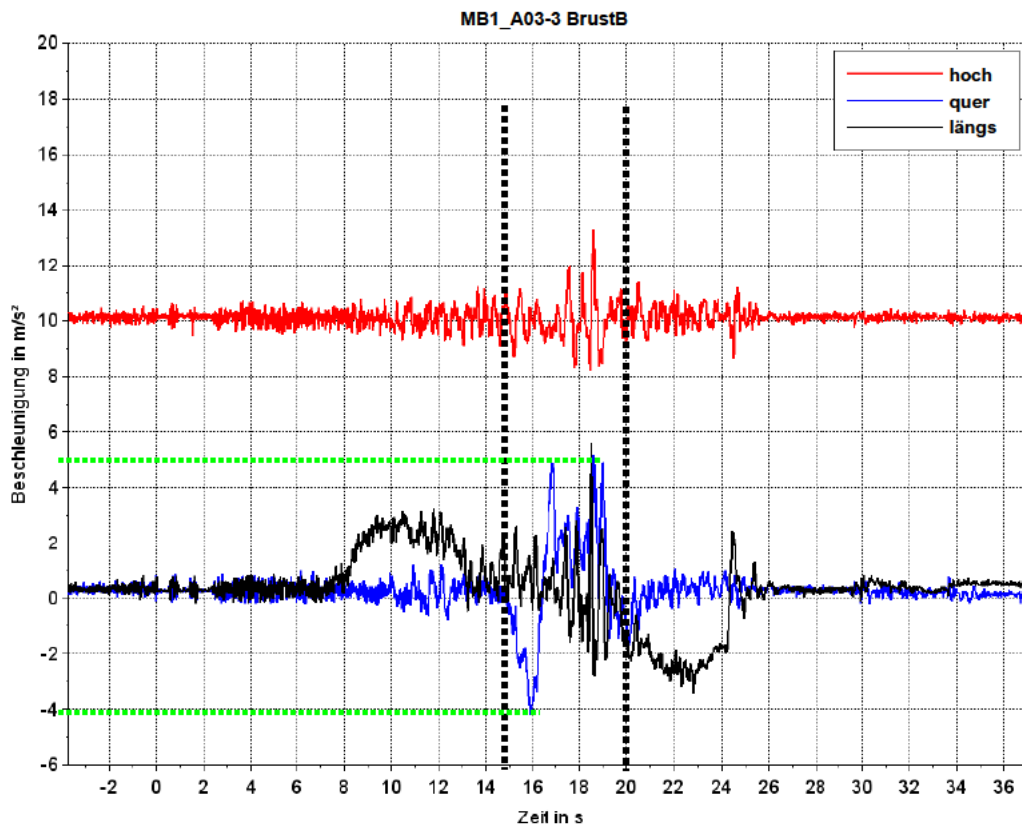


Diagramm 63: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A03.3.

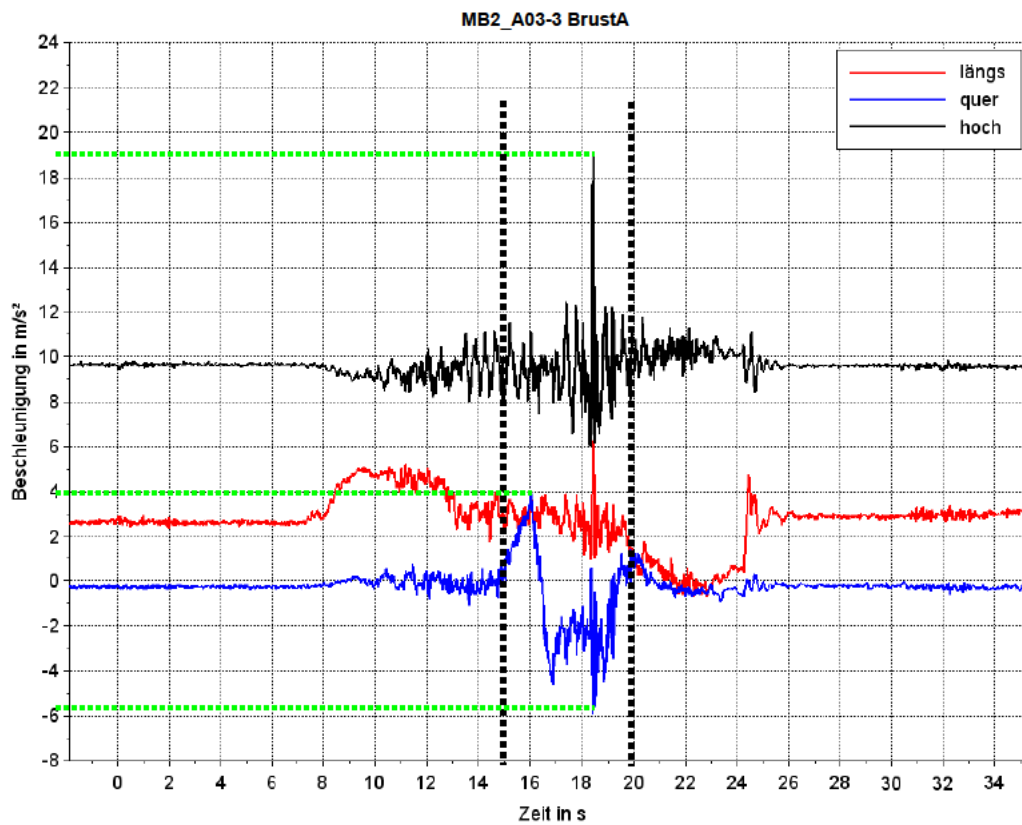


Diagramm 64: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A03.3.

4.4. Ergebnis Versuchsreihe Kurvenfahrt mit Gefahrenbremsung

Im Stadtverkehr kommen Hindernisse meist plötzlich und unvorhergesehen. Beim Durchfahren einer Kurve ist ein vorkommendes Hindernis oft erst spät zu erkennen. Deshalb wird in der folgenden Versuchsreihe eine Kombination von Gefahrenbremsung und Kurvenfahrt des Rettungswagens untersucht. Ziel dieser Versuchsreihe ist es, die Beschleunigung der Insassen infolge der überlagerten Bremsung und Kurvenfahrt zu messen.

Das Fahrzeug beschleunigt hierzu zunächst auf einer geraden Strecke auf die Versuchsgeschwindigkeiten zwischen 15 und $60 \frac{km}{h}$, hält diese konstant und fährt anschließend eine Linkskurve. Etwa im Scheitelpunkt der Kurve wird im Anschluss eine Gefahrenbremsung durchgeführt. Abbildung 31 zeigt die Bildersequenz, indem der Ablauf dieser Versuchsreihe beispielhaft dargestellt ist. Die simulierte Fahrt soll ein unvorhergesehenes Hindernis, wie einen stehenden Verkehrsteilnehmer in einer Kurve, und ein anschließendes Bremsen des Rettungswagens nachstellen. Abbildung 32 zeigt exemplarisch die Synchronisation der Videodateien dieser vierten Versuchsreihe.

Im Anschluss an jeden Versuch wurde zudem die Aussage der Probanden auf einem Fragebogen dokumentiert. Betrachtet man die Aussagen der Probanden zur taktilen Wahrnehmbarkeit, welche im Diagramm 65 dargestellt sind, so fällt auf, dass sich die angegebenen Stärken der Wahrnehmungen deutlich unterscheiden. Die Probanden A und B dokumentieren in den vier Versuchen eine deutliche Wahrnehmung als Proband C. Als Grund kann hierfür die Positionierung der Probanden in Höhe der verschiedenen Fahrzeugachsen genannt werden. Tendenziell ist somit die Wahrnehmung der Belastung in der Fahrerkabine geringer als im Patientenraum.

Vergleicht man die Aussagen der beiden Probanden A und B im Rückraum des Rettungswagens, so notiert der sitzende Proband B bei jedem Einzelversuch

jeweils einen höheren Wert der taktilen Wahrnehmung als der liegende Proband A.

Anhand der Aussagen aller Probanden ist insgesamt ein stetiger Anstieg der Insassenbelastungen zu erwarten. In dieser Versuchsreihe ist eine ausgeprägte Insassenbelastung sowohl in Längs- als auch in Querrichtung entgegenzusehen.

In den Diagrammen der Versuchsreihe grenzen schwarz gepunktete Linien den Bereich des Ereignisses im Fahrversuch ein. Die grünen und orangen Hilfslinien unterstützen bei der Ermittlung der Messwerte.

Proband A ist in dieser Versuchsreihe auf der Trage positioniert. Der Proband B sitzt im Begleitstuhl des Patientenraums neben der Trage. Der dritte Proband C sitzt auf dem Beifahrersitz in der Fahrerkabine des Rettungswagens. Er wurde nicht messtechnisch instrumentiert.

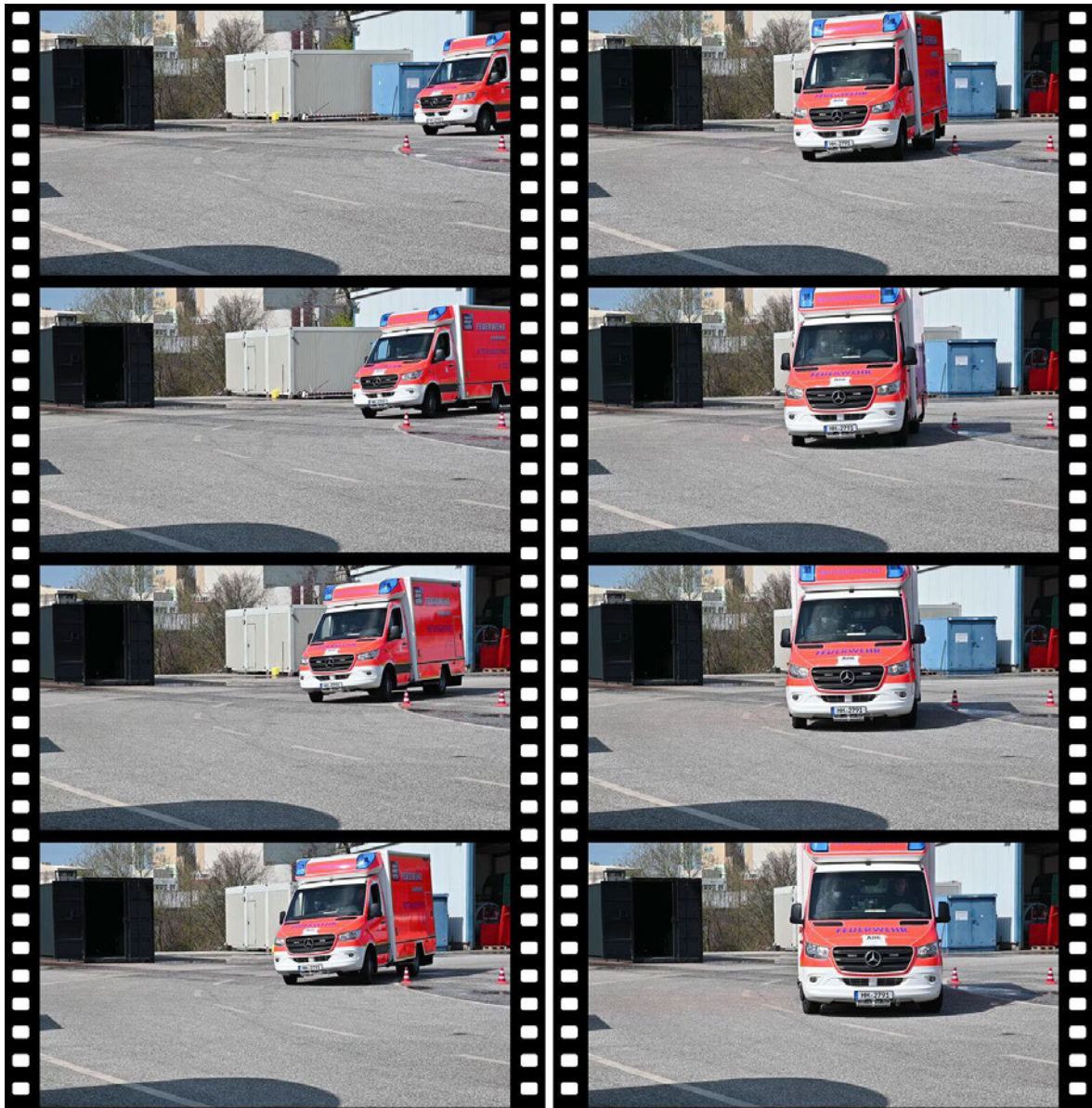


Abbildung 31: Bildersequenz der durchgeführten Versuchsreihe A04.



Abbildung 32: Exemplarische Videosynchronisation der Versuchsreihe A04.

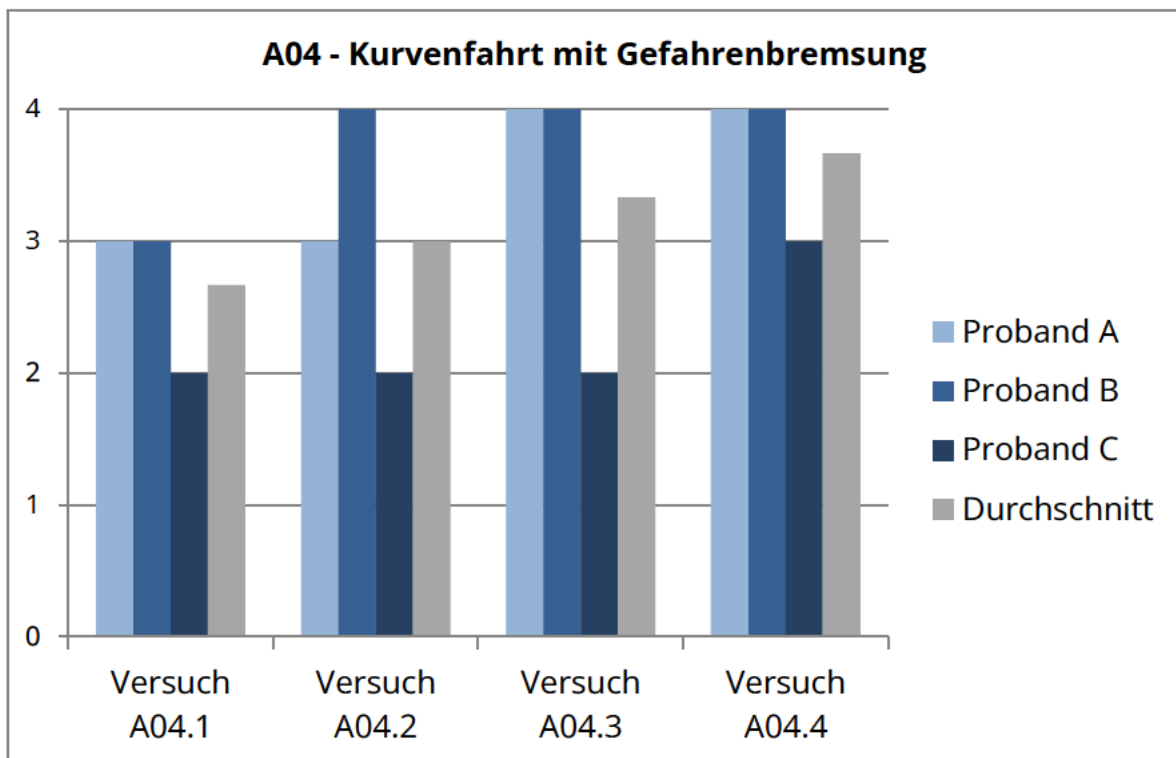


Diagramm 65: Ergebnis des Fragebogens der Bemerkbarkeit zum Versuch A04.

Skala: 0=nicht, 1=kaum, 2=normal, 3=stark, 4=sehr stark

4.4.1. Versuch A04.1 – 15 km/h

Korreliert man die Aussagen der ersten Versuchsfahrt bei $15 \frac{km}{h}$ so zeigt sich, wie in der Tabelle 13 dargestellt, dass alle Probanden das Wanken des Rettungswagens übereinstimmend wahrgenommen haben. Die Probanden A und B im Patientenraum des RTW notierten zudem ein Rütteln des Fahrzeugs, welches auf den Vorgang der Bremsung zurückzuführen ist. Die beiden sitzenden Probanden B und C dokumentierten außerdem einen Ruck. Dies lässt sich durch das Ende eines Bremsvorgangs erklären, wenn der nach vorgeneigte Kopf bei Stillstand des Fahrzeugs zurück in den Sitz gedrückt wird.

Tabelle 13: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A04.1

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A		✓		✓
Proband B		✓	✓	✓
Proband C		✓	✓	

Die Messdaten der IFU-Messboxen sind in den Diagrammen 66 und 67 abgebildet. Es zeigt sich im Diagramm 66 eine einwirkende Belastung von ca. $2 \frac{m}{s^2}$ in Querrichtung und rund $7 \frac{m}{s^2}$ in negativer Längsrichtung. Einen ähnlichen Kurvenverlauf ist im Diagramm 67 dargestellt. Hier beträgt die Belastung in negativer Längsrichtung jedoch ca. $6,3 \frac{m}{s^2}$.

Der Durchschnitt des Rauschens des Kopfsensors im Diagramm 68 des Probanden bildet zusammen mit der Berücksichtigung des Versatzes eine Beschleunigung in Querrichtung von ca. $3 \frac{m}{s^2}$ und in Längsrichtung von etwa $8 \frac{m}{s^2}$. Einen annähernd identischen Kurvenverlauf zeigt Diagramm 69. Der Kopf des Probanden B erfährt eine Beschleunigung in Querrichtung von ca. $2,5 \frac{m}{s^2}$. In Längsrichtung ist der Wert der Beschleunigung im Betrag angegeben. Dieser

liegt bei ca. $9 \frac{m}{s^2}$. In beiden Werten wurde der Versatz des jeweiligen Kurvenverlaufs mitberücksichtigt.

Diagramm 70 und 71 dokumentieren die Messdaten der Brustsensoren der beiden Probanden A und B. Durch den Versatz der Messkurve des Probanden A von ca. $0,2 \frac{m}{s^2}$ in positiver Richtung, erfährt dieser eine Beschleunigung in Längsrichtung von ca. $6,7 \frac{m}{s^2}$ im Betrag. Dieser Wert setzt sich als Differenz zwischen dem Versatz des gesamten Kurvenverlaufs und des Maximalwertes zusammen. In Querrichtung wirken ca. $2,7 \frac{m}{s^2}$ auf den Probanden, wobei der Offset der Messkurve berücksichtigt wurde.

Proband B wird in diesem Fahrversuch mit ca. $6,7 \frac{m}{s^2}$ in Längsrichtung beschleunigt. Diese Beschleunigung errechnet sich aus dem Versatz von ca. $0,5 \frac{m}{s^2}$ in positiver Richtung und des maximalen Werts in negativer Richtung von etwa $6,2 \frac{m}{s^2}$. Die Beschleunigung des sitzenden Probanden in Querrichtung liegt bei ca. $2 \frac{m}{s^2}$.

Zusammenfassend folgt aus diesem Fahrversuch, dass die Probanden A und B in etwa eine äquivalent einwirkende Belastung in Quer- und Längsrichtung erfahren. Die Messdaten des Probanden B können zudem auf den Probanden C übertragen werden.

Versuch A04.1 - Messdaten der IFU-Messboxen

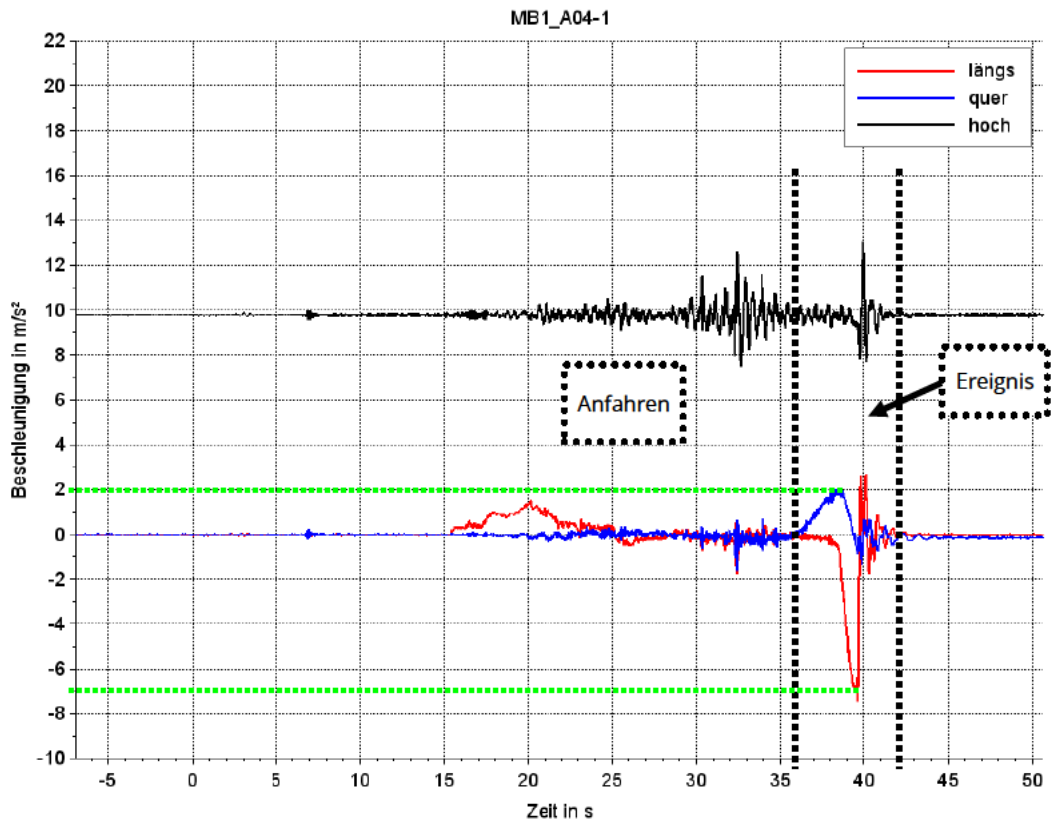


Diagramm 66: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A04.1.

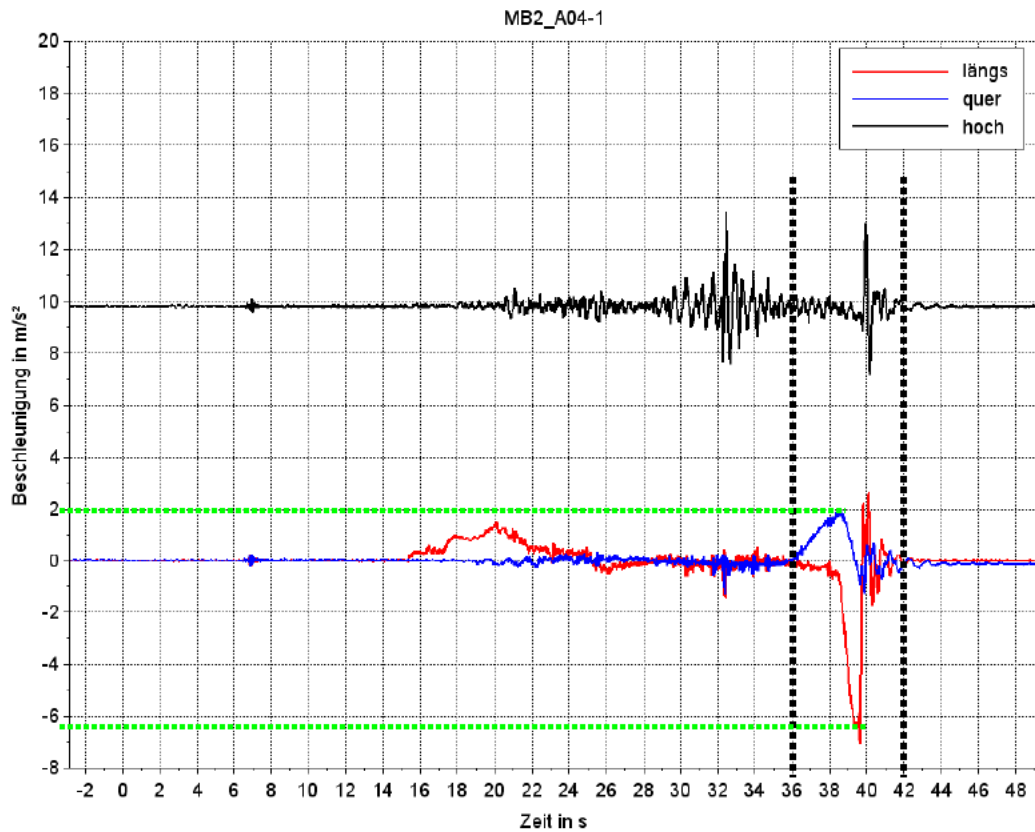


Diagramm 67: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A04.1.

Versuch A04.1 - Messdaten der Kopfsensoren

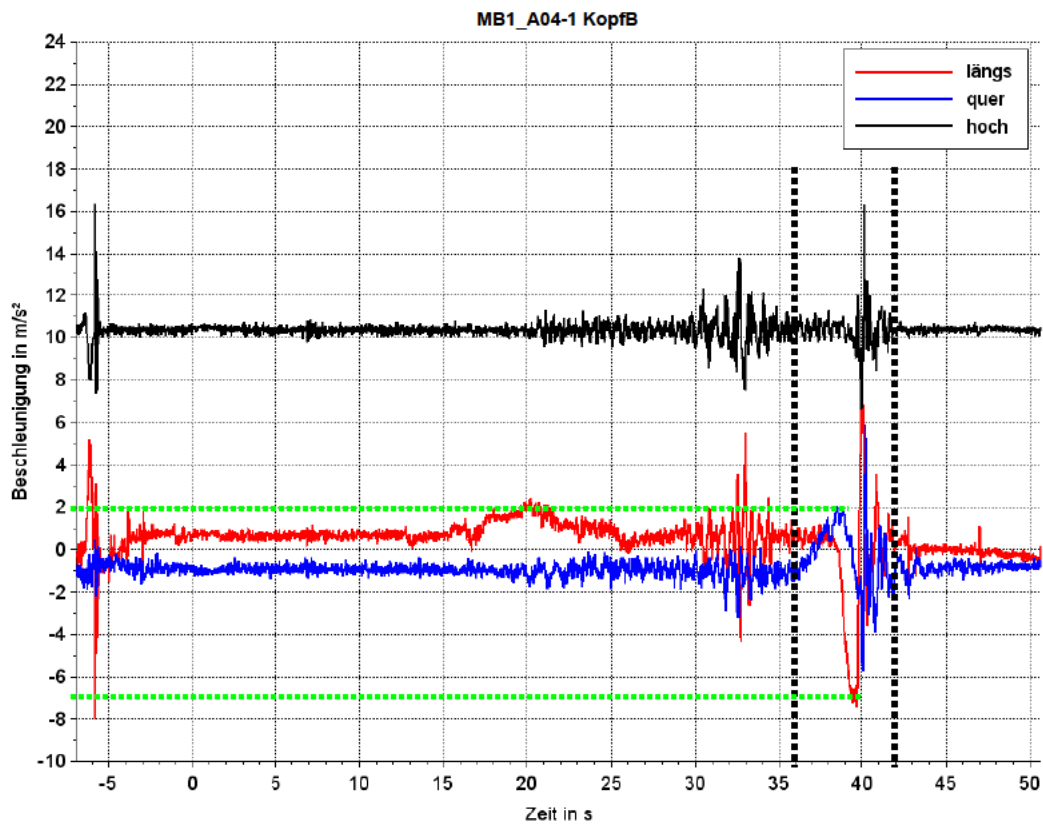


Diagramm 68: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A04.1.

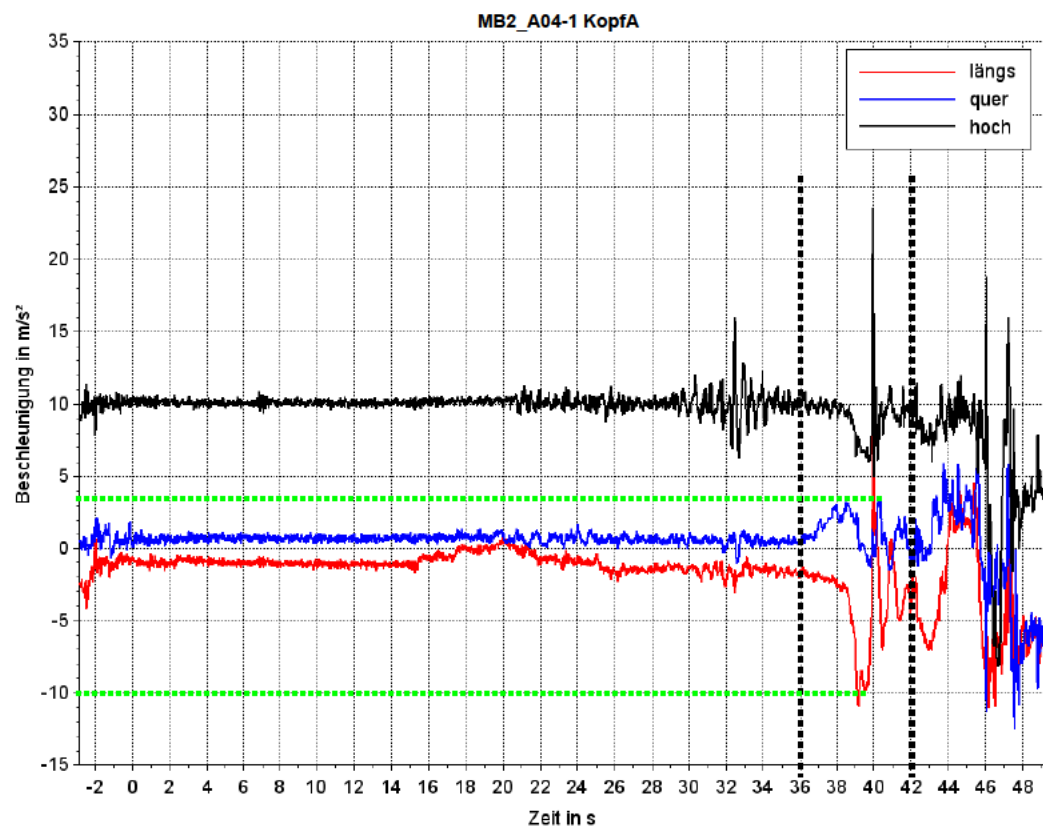


Diagramm 69: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A04.1.

Versuch A04.1 - Messdaten der Brustsensoren

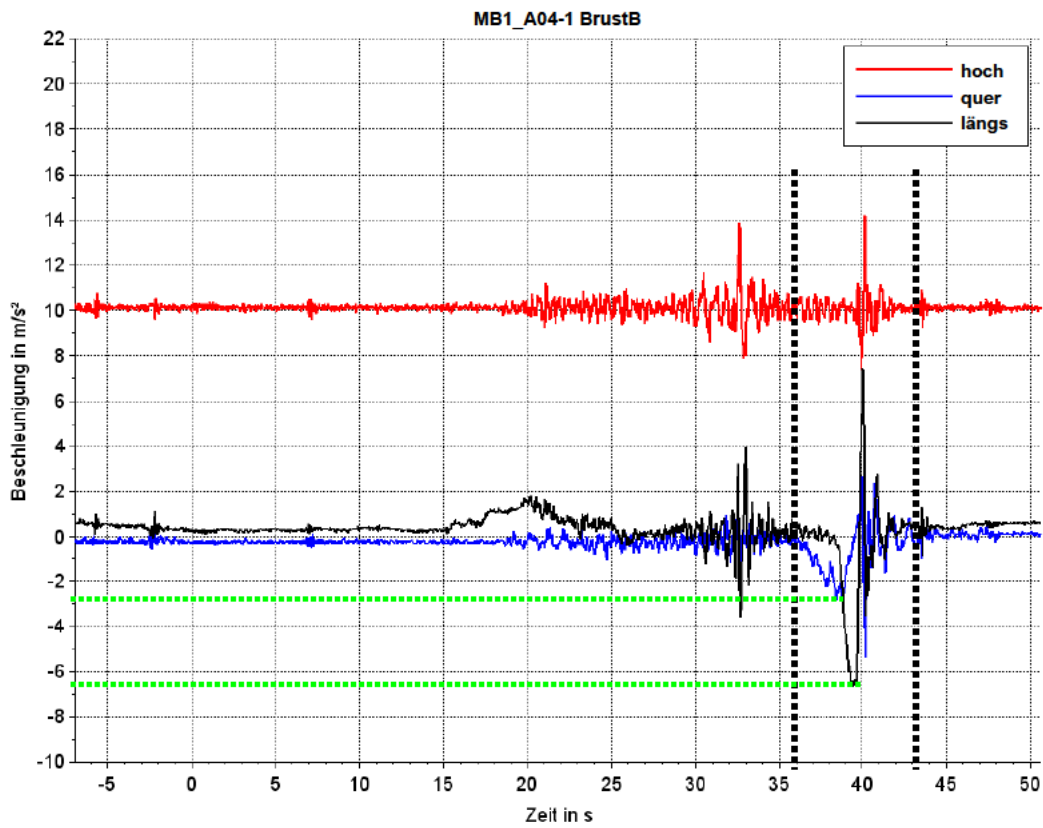


Diagramm 70: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A04.1.

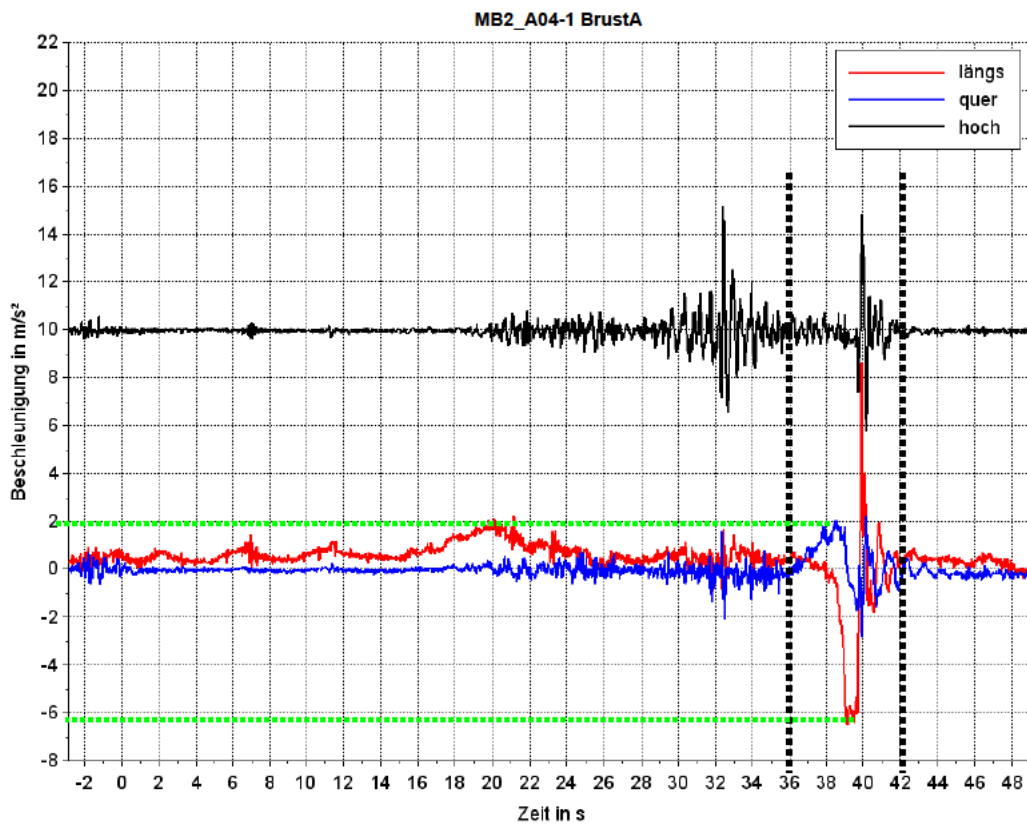


Diagramm 71: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A04.1.

4.4.2. Versuch A04.2 – 30 km/h

Im zweiten Fahrversuch der Versuchsreihe bei rund $30 \frac{km}{h}$ ließen sich ähnliche Aussagen der Probanden feststellen. Diese sind in der Tabelle 14 dargestellt. Alle Probanden dokumentieren ein Wanken des Rettungswagens. Zudem nahmen sie einen Ruck des Fahrzeugs wahr. Die Probanden A und B im Patientenraum des Rettungswagens notierten weiter ein Rütteln des Fahrzeugs, welches auf den Vorgang der Bremsung der Hinterachse zurückzuführen ist.

Tabelle 14: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A04.2

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A		✓	✓	✓
Proband B		✓	✓	✓
Proband C		✓	✓	

Die zugehörigen Messwerte sind in den Diagrammen 72 und 73 dargestellt. Es zeigt sich hierbei in beiden Diagrammen ein äquivalenter Kurvenverlauf. Aus dem Diagramm 72 folgt eine Beschleunigung von ca. $4 \frac{m}{s^2}$ in Querrichtung und etwa $5,7 \frac{m}{s^2}$ in Längsrichtung. Das negative Vorzeichen der Beschleunigung in Längsrichtung lässt sich mit der Verzögerung des Versuchsfahrzeugs vereinbaren. Diagramm 73 zeigt einen analogen Kurvenverlauf.

Mit ca. $7 \frac{m}{s^2}$ wird der Kopf des Probanden A in Querrichtung beschleunigt, wobei der Versatz des Kurvenverlaufs in Diagramm 74 berücksichtigt wird. In Längsrichtung liegt der Wert der Belastung bei ca. $7,1 \frac{m}{s^2}$ (vgl. grüne Hilfslinie und Offset). Diagramm 75 zeigt die Belastung des Kopfes des Probanden B. Durch den Offset der Querbeschleunigungskurve in positiver Richtung von ca. $1 \frac{m}{s^2}$, liegt der tatsächlich einwirkende Wert bei ca. $5 \frac{m}{s^2}$. In Längsrichtung wird Proband B, unter der Berücksichtigung des Offsets der Messkurve, mit ca. $10 \frac{m}{s^2}$ beschleunigt bzw. gebremst.

Die Messdaten der Brustsensoren der Probanden A und B ist in den Diagrammen 76 und 77 dargestellt. Diagramm 76 stellt eine Belastung des Oberkörpers des Probanden A von ca. $6,5 \frac{m}{s^2}$ in Längsrichtung dar. Dieser Wert setzt sich aus dem Versatz des Kurvenverlaufs und der Amplitude zusammen. In Querrichtung erfährt der Proband eine Beschleunigung von ca. $5,4 \frac{m}{s^2}$. Auf Proband B wirkt eine Belastung in Querrichtung von ca. $6 \frac{m}{s^2}$. Durch den Offset in positiver Richtung von ca. $1 \frac{m}{s^2}$ ergibt sich ein Gesamtwert der Längsbeschleunigung im Betrag von ca. $8 \frac{m}{s^2}$.

Als Fazit kann über diesen Einzelversuch festgehalten werden, dass beide Probanden eine identische Belastung in Quer- als auch in Längsrichtung erfahren. Analog sind die Messdaten des Probanden B in guter Näherung auf den Probanden C übertragbar.

Versuch A04.2 - Messdaten der IFU-Messboxen

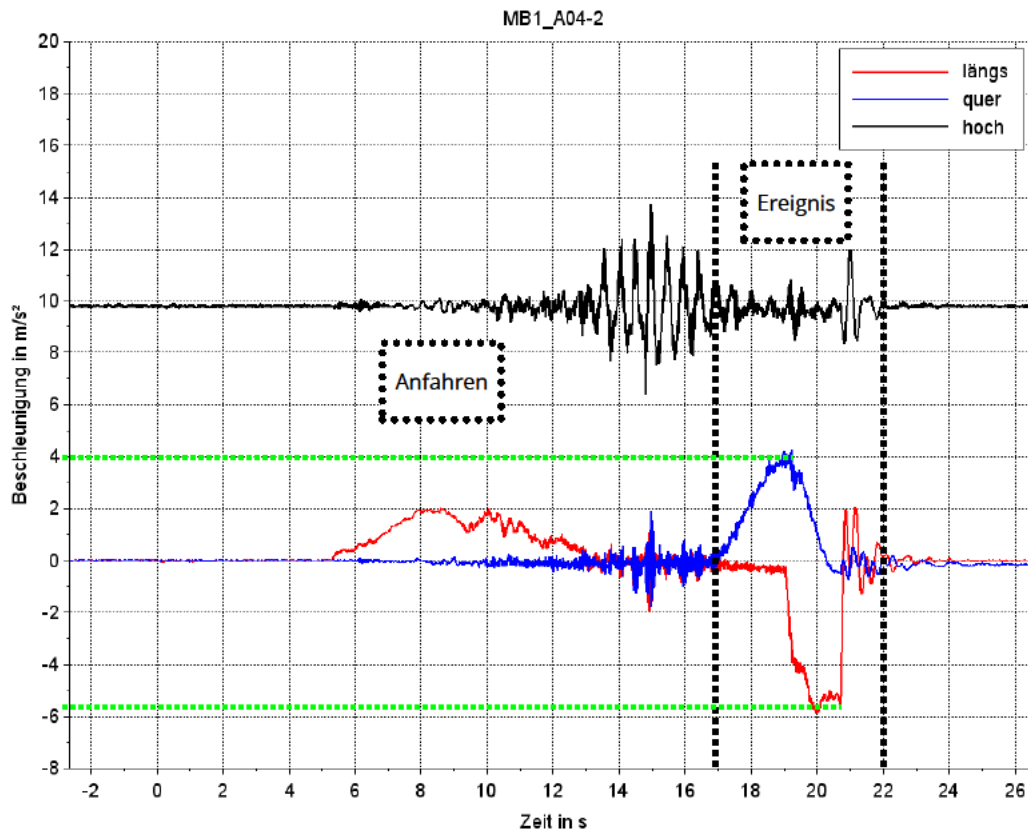


Diagramm 72: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A04.2.

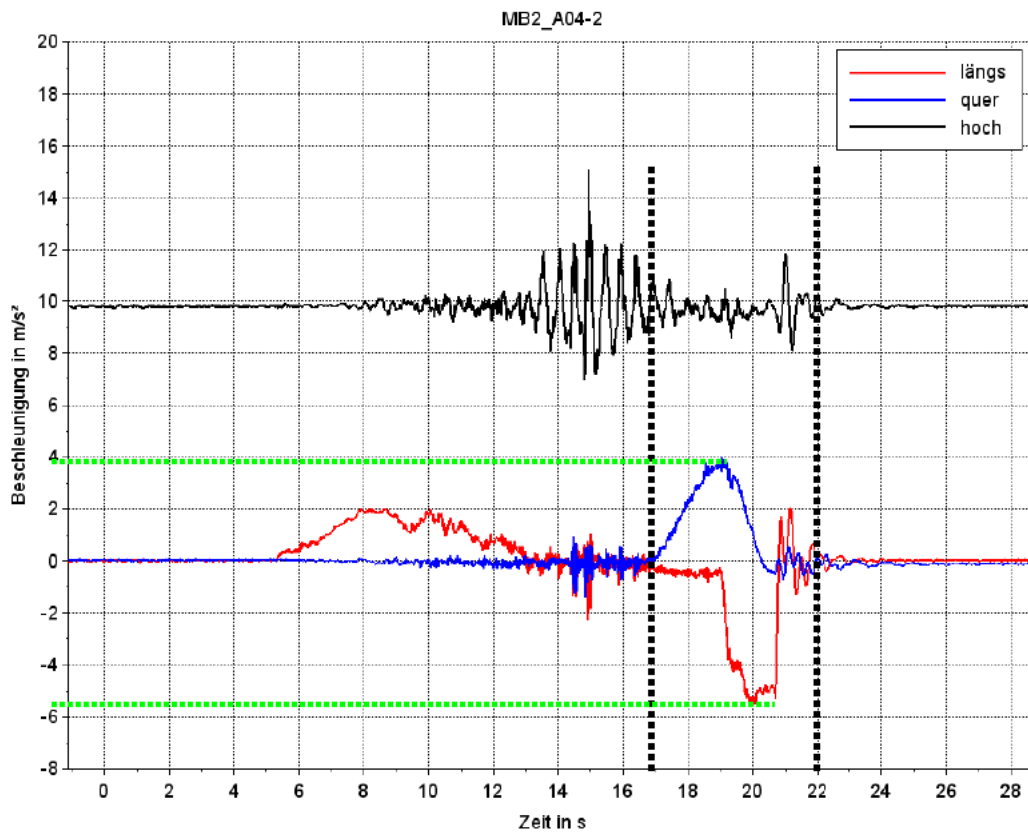


Diagramm 73: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A04.2.

Versuch A04.2 - Messdaten der Kopfsensoren

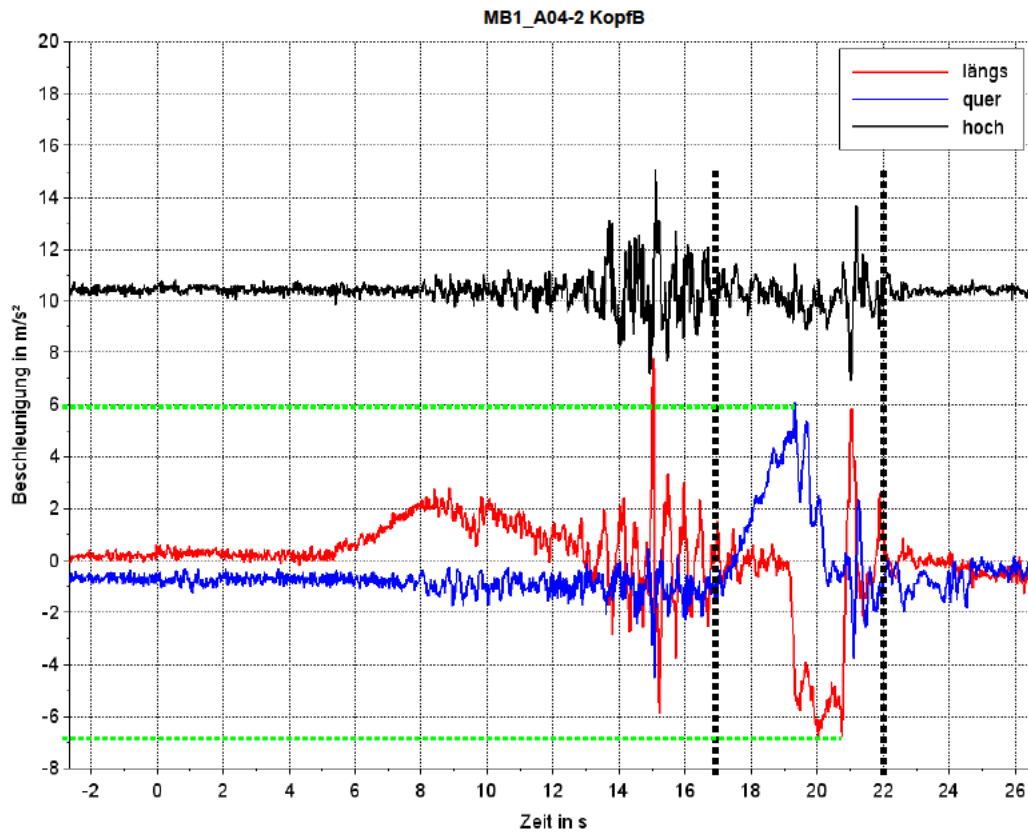


Diagramm 74: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A04.2.

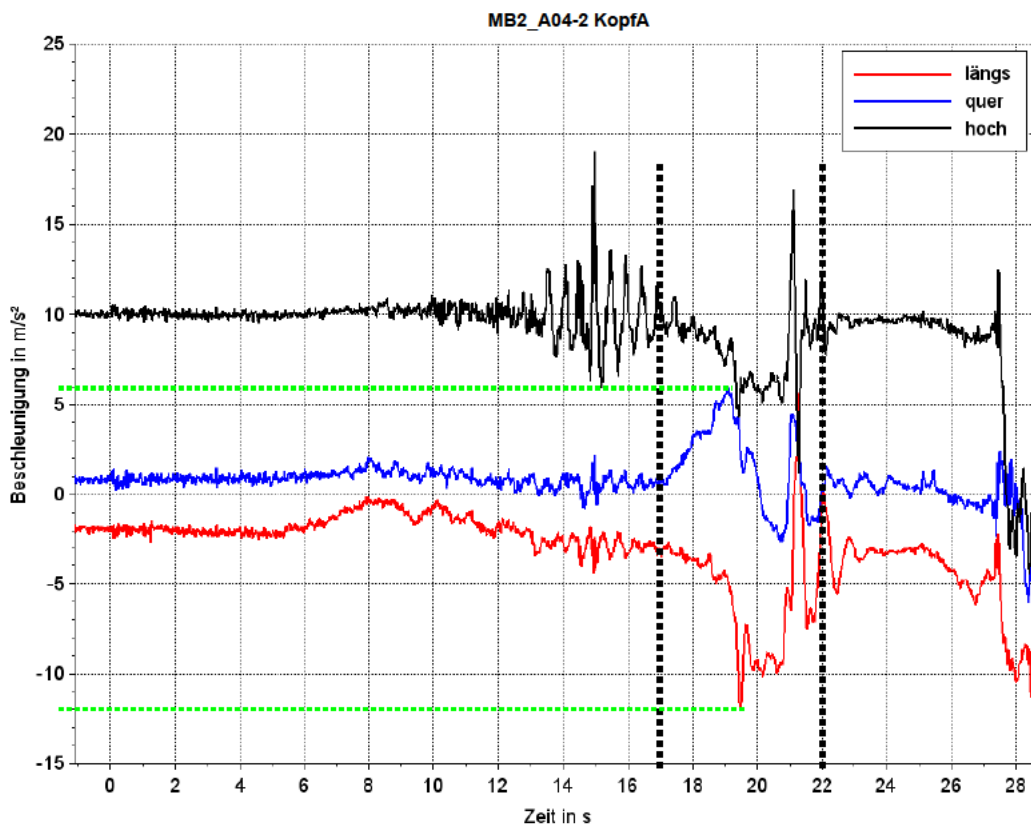


Diagramm 75: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A04.2.

Versuch A04.2 - Messdaten der Brustsensoren

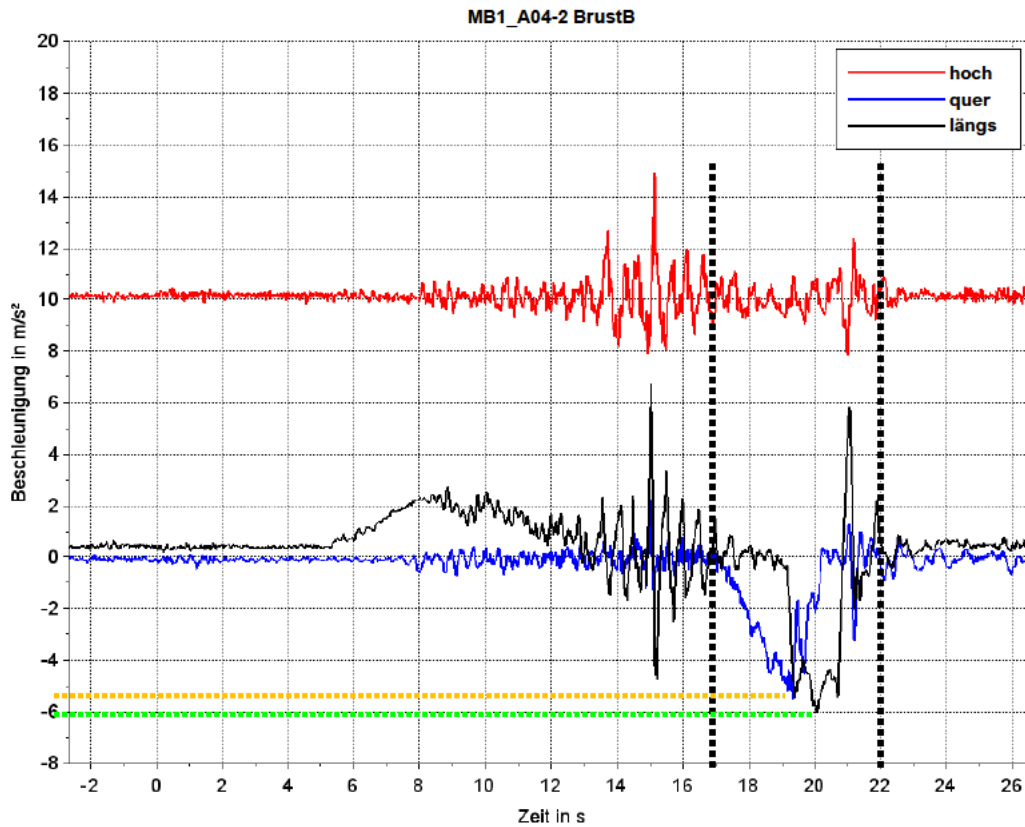


Diagramm 76: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A04.2.

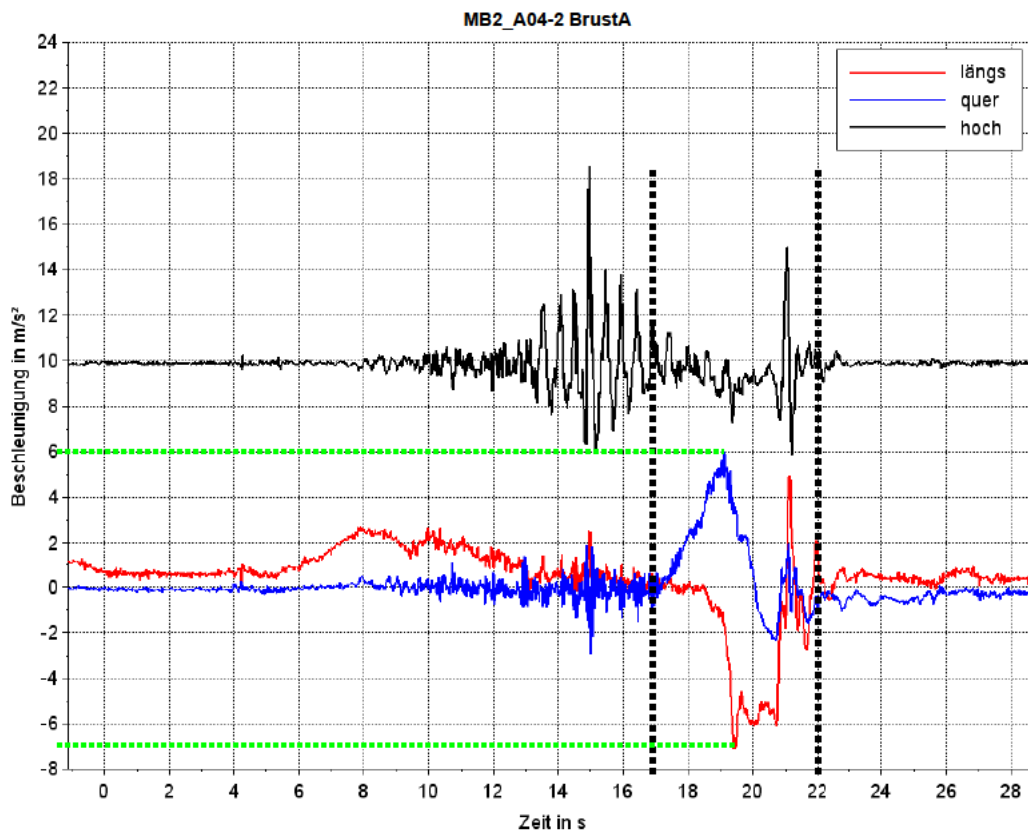


Diagramm 77: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A04.2.

4.4.3. Versuch A04.3 – 45 km/h

Die dritte Versuchsfahrt wurde mit einer Geschwindigkeit von ca. $45 \frac{km}{h}$ durchgeführt. Aus Tabelle 15 folgen hinsichtlich der taktilen Wahrnehmbarkeit erwartungsgemäss ähnliche Aussagen wie beim vorherigen Versuch. Alle drei Probanden dokumentieren ein Wanken und einen Ruck des Rettungswagens. Proband A und B im Patientenraum des Rettungswagens notierten ebenfalls ein Rütteln des Fahrzeugs.

Tabelle 15: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A04.3

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A		✓	✓	✓
Proband B		✓	✓	✓
Proband C		✓	✓	

In den Diagrammen 78 und 79 sind die Messdaten der IFU-Messboxen dargestellt. Diagramm 78 zeigt eine Beschleunigung von ca. $5 \frac{m}{s^2}$ in Querrichtung und ca. $6,9 \frac{m}{s^2}$ in Längsrichtung. Aufgrund der ähnlichen Positionierung der beiden Messboxen am Boden des Patientenraumes zeigt Diagramm 79 ein identisches Bild des Kurvenverlaufs und der Messwerte zu Diagramm 78.

Unter Berücksichtigung des Offsets in negativer Richtung von $0,5 \frac{m}{s^2}$ der Messkurve im Diagramm 80 ergibt sich ein Beschleunigungswert von ca. $6,5 \frac{m}{s^2}$ des Kopfsensors des Probanden A in Querrichtung. Überlagert wird zudem eine negative Beschleunigung in Längsrichtung von ca. $7,5 \frac{m}{s^2}$ (vgl. grüne Hilfslinie und Offset). Diagramm 81 stellt die Messwerte des Kopfsensors des Probanden B dar. Es zeigt sich eine Belastung in Querrichtung von ca. $5 \frac{m}{s^2}$. Dieser Wert errechnet sich aus dem positiven Offset der Messkurve von etwa $1 \frac{m}{s^2}$ und des Maximalwertes von ca. $6 \frac{m}{s^2}$. Der negative Offset des Kurvenverlaufs in

Längsrichtung beträgt rund $1,5 \frac{m}{s^2}$. Es ergibt sich dadurch eine einwirkende Belastung von etwa $9,5 \frac{m}{s^2}$.

Die Messdaten der beiden Brustsensoren sind in den Diagrammen 82 und 83 dargestellt. Diagramm 82 zeigt einen Versatz der Messkurve in positiver Richtung der Längsrichtung von ca. $0,2 \frac{m}{s^2}$ und ein Offset in negativer Richtung der Kurve in Querrichtung von ebenfalls ca. $0,2 \frac{m}{s^2}$. Es ergeben sich dadurch Belastungswerte auf den Probanden A von rund $6,8 \frac{m}{s^2}$ in Längsrichtung und von circa $6,7 \frac{m}{s^2}$ in Querrichtung. Diagramm 83 weist eine Beschleunigung des Oberkörpers des Probanden in Querrichtung von rund $6 \frac{m}{s^2}$. Durch den Offset in positiver Richtung von ca. $1 \frac{m}{s^2}$ ergibt sich eine Belastung in Längsrichtung von ca. $7,5 \frac{m}{s^2}$.

Zusammenfassend folgt aus diesem Fahrversuch, dass auf den sitzenden Proband B eine höhere Belastung als auf den liegenden Probanden A einwirkte. Es stellt sich dadurch ein positives Einwirken des Tragesystems auf die Belastung dar. Erklärt kann dies über das synchrone Heben und Senken der Trage des hydraulischen Tragesystems. Die Messdaten des Probanden B sind zudem auf den Probanden C übertragbar.

Versuch A04.3 - Messdaten der IFU-Messboxen

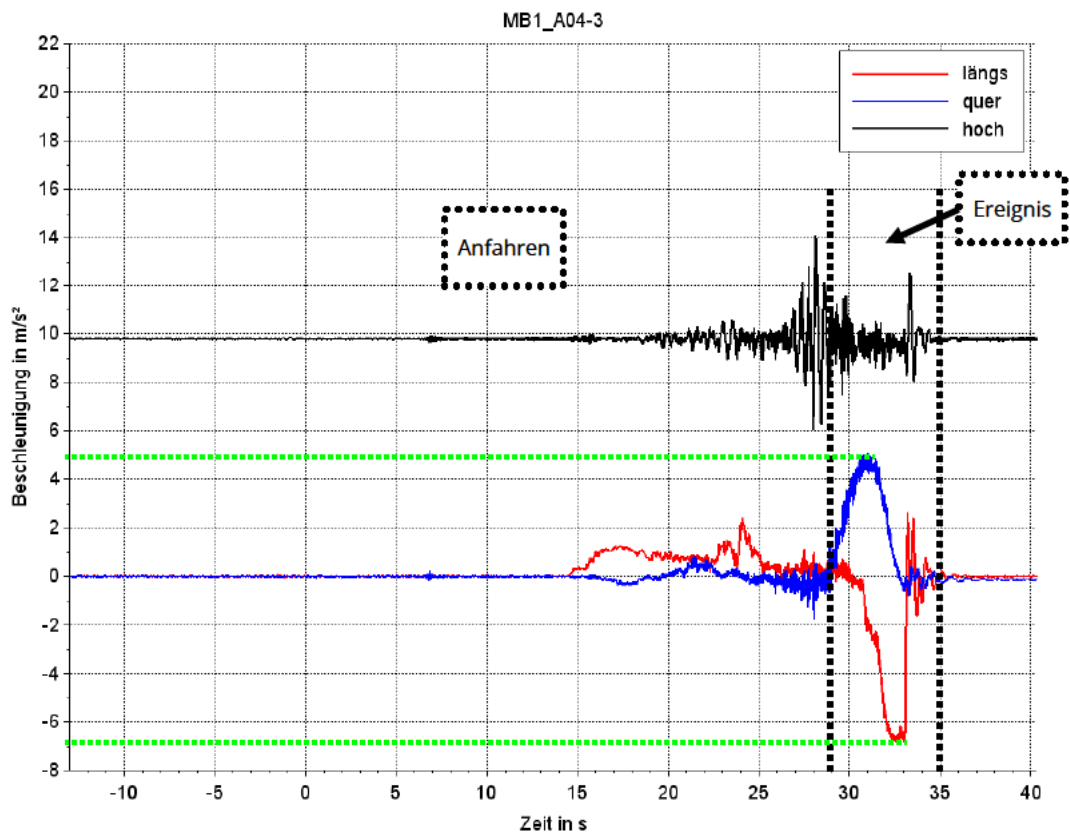


Diagramm 78: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A04.3.

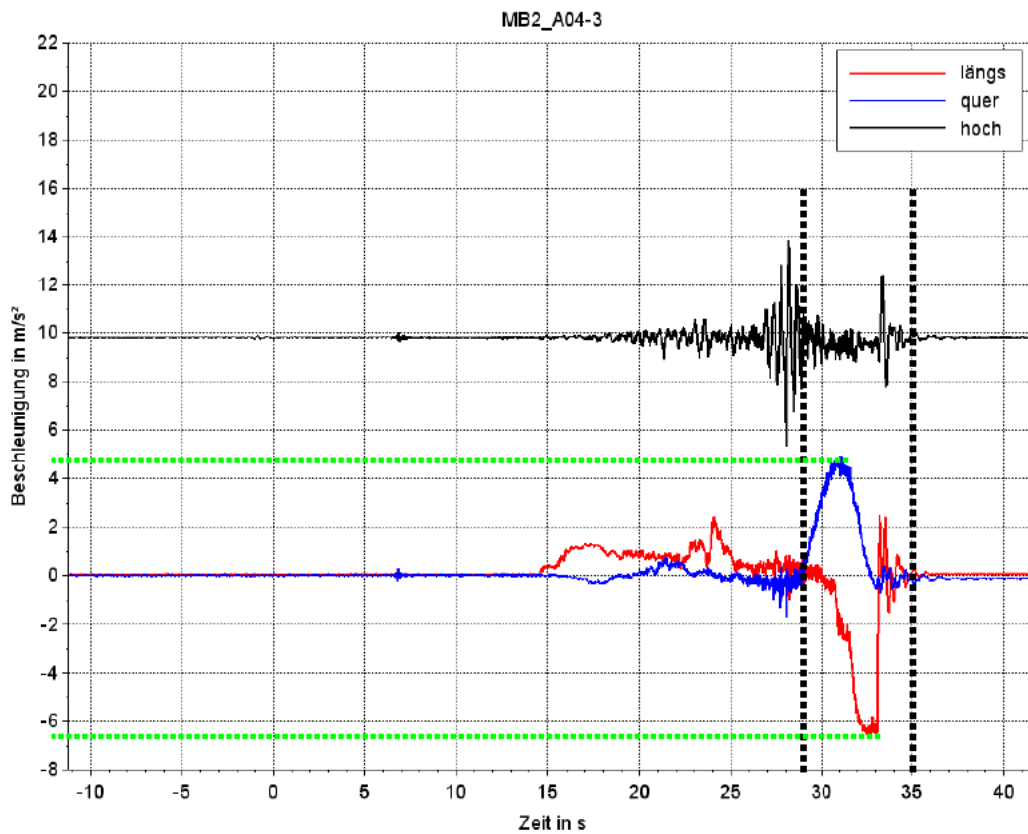


Diagramm 79: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A04.3.

Versuch A04.3 - Messdaten der Kopfsensoren

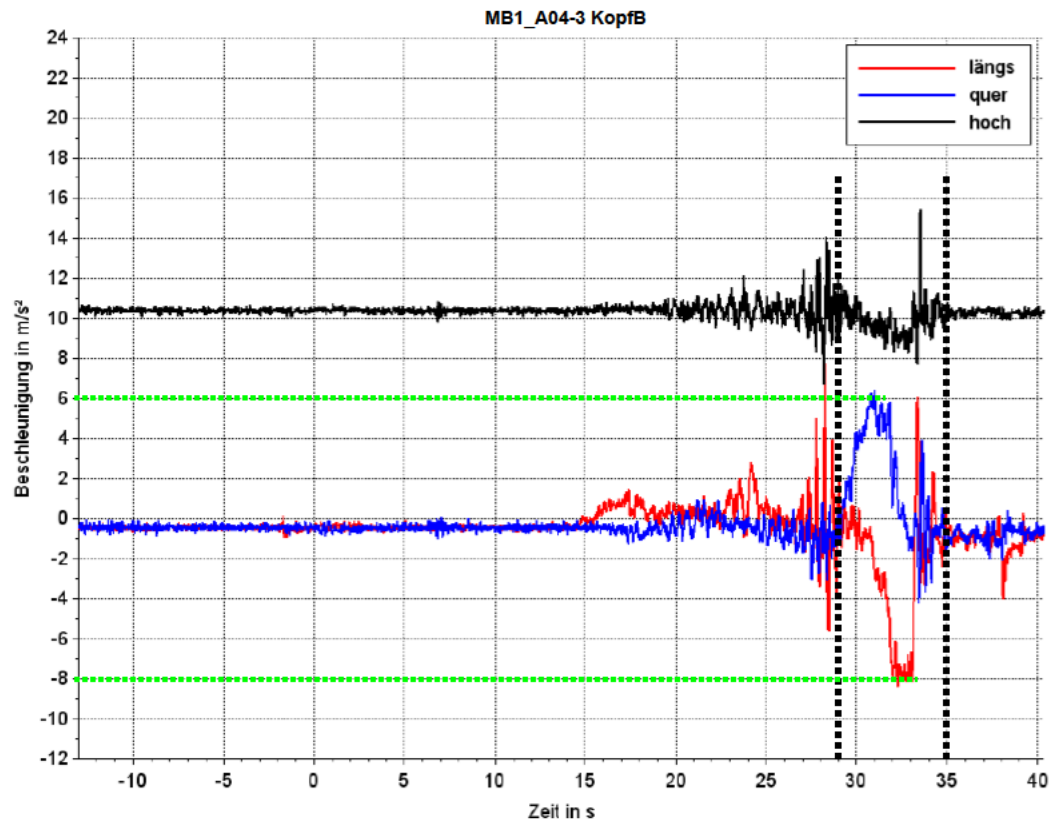


Diagramm 80: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A04.3.

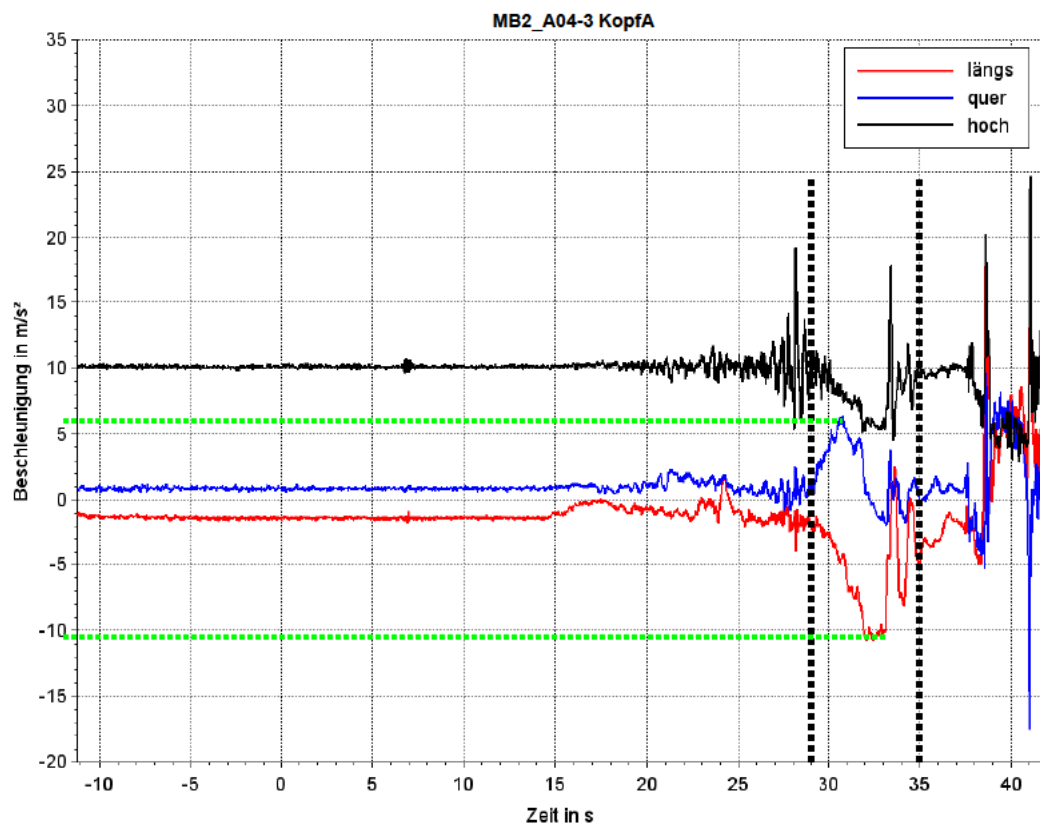


Diagramm 81: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A04.3.

Versuch A04.3 - Messdaten der Brustsensoren

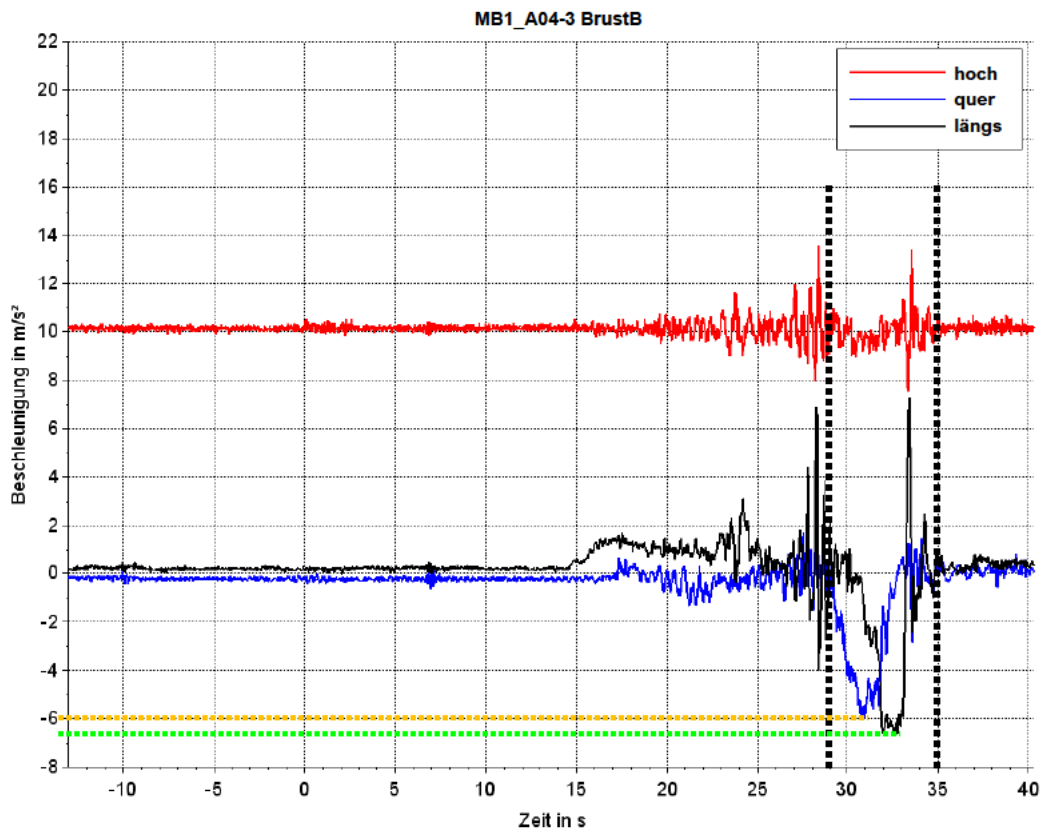


Diagramm 82: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A04.3.

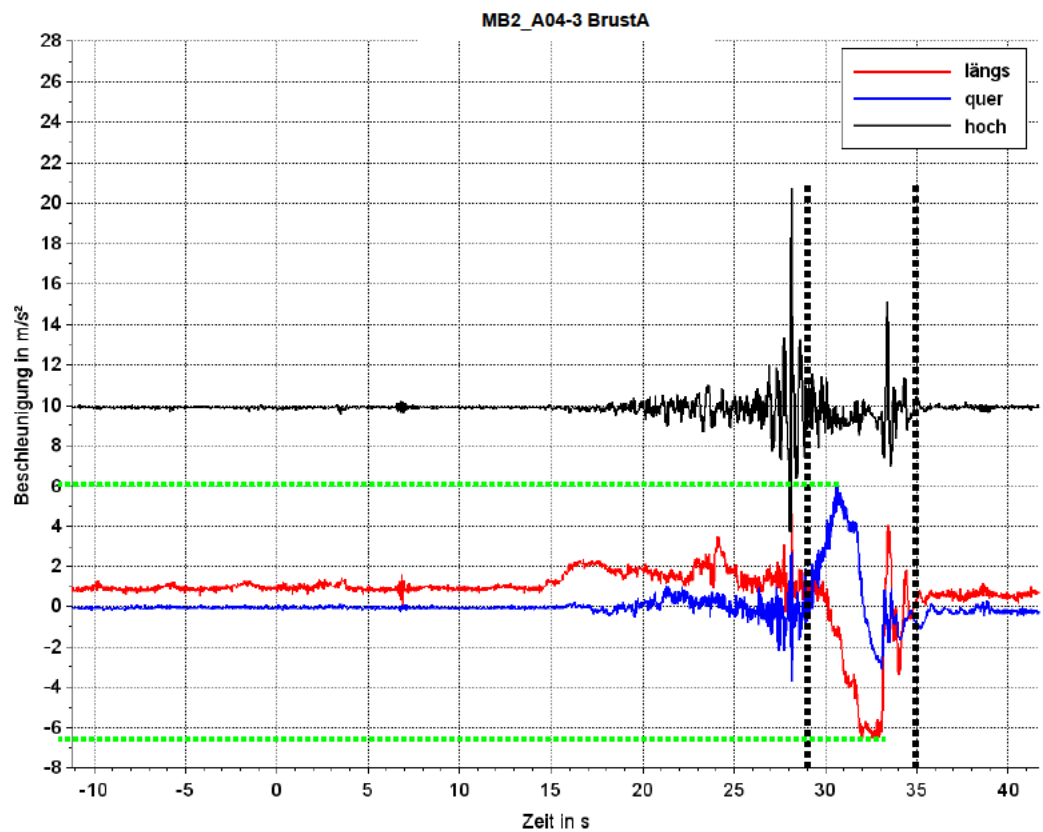


Diagramm 83: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A04.3.

4.4.4. Versuch A04.4 – 60 km/h

Im letzten Fahrversuch wurde eine Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs von rund $60 \frac{km}{h}$ gewählt, um eine zügige Einsatzfahrt zu simulieren. Tabelle 16 zeigt die dokumentierten Aussagen der Probanden. Es lassen sich identische Aussagepunkte aller drei Probanden zu den vorherigen Versuchen feststellen. Alle Probanden nahmen ein Wanken und einen Ruck des Rettungswagens wahr. Die im Patientenraum positionierten Proband A und B notierten zudem ein Rütteln des Fahrzeugs.

Tabelle 16: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A04.4

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A		✓	✓	✓
Proband B		✓	✓	✓
Proband C		✓	✓	

Diagramm 84 und 85 zeigen die Messdaten der IFU-Messboxen zu den Probanden A und B. Wie im Diagramm 84 ersichtlich, stellt sich eine negative Belastung von ca. $7,3 \frac{m}{s^2}$ in Längsrichtung dar. Die Beschleunigung in Querrichtung liegt bei ca. $5 \frac{m}{s^2}$. Ein äquivalenter Kurvenverlauf ist im Diagramm 85 erkennlich. Die Werte dieser Messkurve gleichen den Werten des Diagramms 84. In Längsrichtung ist eine Beschleunigung von ca. $7,1 \frac{m}{s^2}$ und in Querrichtung von ca. $5 \frac{m}{s^2}$ abzulesen.

In den Diagrammen 86 und 87 sind die Daten der beiden Kopfsensoren dargestellt. Diagramm 86 zeigt sowohl in Längs- als auch in Querrichtung eine Belastung des Kopfes von rund $8 \frac{m}{s^2}$ des Probanden A. Durch den Offset in positiver Richtung von ca. $1 \frac{m}{s^2}$ liegt die Beschleunigung des Kopfes des Probanden B bei rund $5 \frac{m}{s^2}$ in Querrichtung (vgl. grüne Linie Diagramm 87). Durch den schräg gerichteten Verlauf der Messkurve in Längsrichtung im Diagramm 87 kann nur eine Annahme über den Belastungswert getroffen werden. Der Offset in ne-

gativer Richtung beträgt ca. $1,5 \frac{m}{s^2}$. Subtrahiert man diesen Versatz vom Maximalwert von ca. $11,5 \frac{m}{s^2}$, so erhält man einen Gesamtwert der Belastung in Längsrichtung von etwa $10 \frac{m}{s^2}$.

Diagramm 88 stellt die Messdaten des Brustsensors des Probanden A dar. Es zeigt sich ein minimaler Unterschied zwischen der Längs- und Quereschleunigung dar. Beide Kurvenverläufe besitzen einen positiven Versatz von etwa $0,2 \frac{m}{s^2}$. Daraus ergibt sich im Betrag eine Längsbeschleunigung von rund $7,1 \frac{m}{s^2}$ und eine Quereschleunigung von etwa $6,8 \frac{m}{s^2}$. Der Oberkörper des Probanden B erfährt, wie im Diagramm 89 dargestellt, eine Belastung in Längsrichtung von circa $7,5 \frac{m}{s^2}$. Dieser Wert setzt sich aus dem Versatz des Kurvenverlaufs und dem maximalen Wert der Amplitude zusammen. In Querrichtung beträgt die Belastung circa $5,6 \frac{m}{s^2}$, wobei ein Offset in negativer Richtung von ca. $0,1 \frac{m}{s^2}$ berücksichtigt wurde.

Zusammenfassend lässt sich über diesen Einzelversuch festhalten, dass die Probanden A und B in etwa eine gleiche Belastung in Quer- und in Längsrichtung erfahren. Lediglich die Quereschleunigung des liegenden Probanden liegt in den einzelnen Bereichen minimal höher als des sitzenden Probanden im Patientenraum. Die Messdaten des Probanden B sind tendenziell mit denen des Probanden C vergleichbar.

Versuch A04.4 - Messdaten der IFU-Messboxen

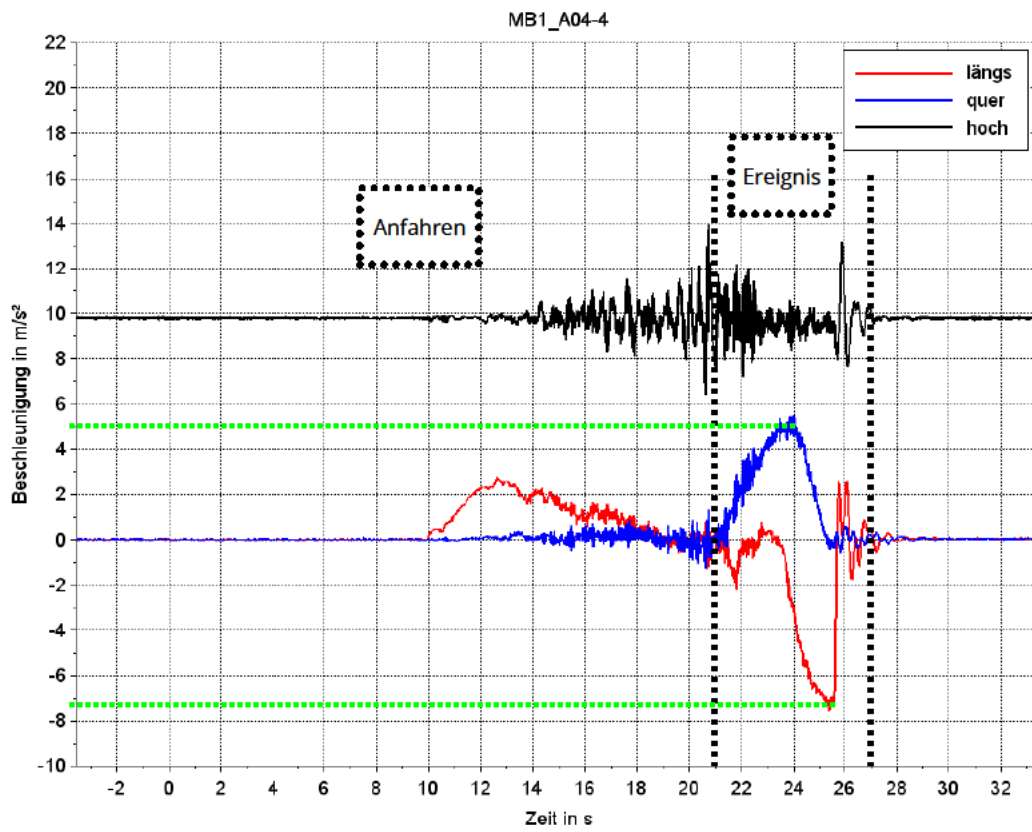


Diagramm 84: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A04.4.

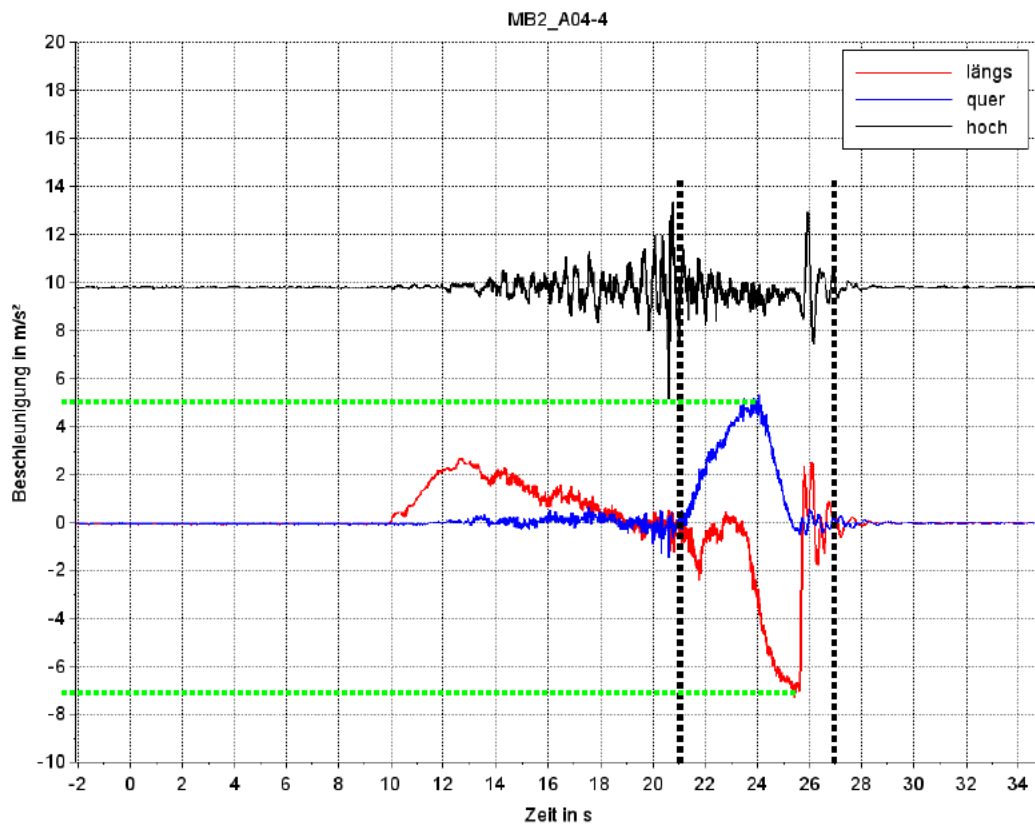


Diagramm 85: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A04.4.

Versuch A04.4 - Messdaten der Kopfsensoren

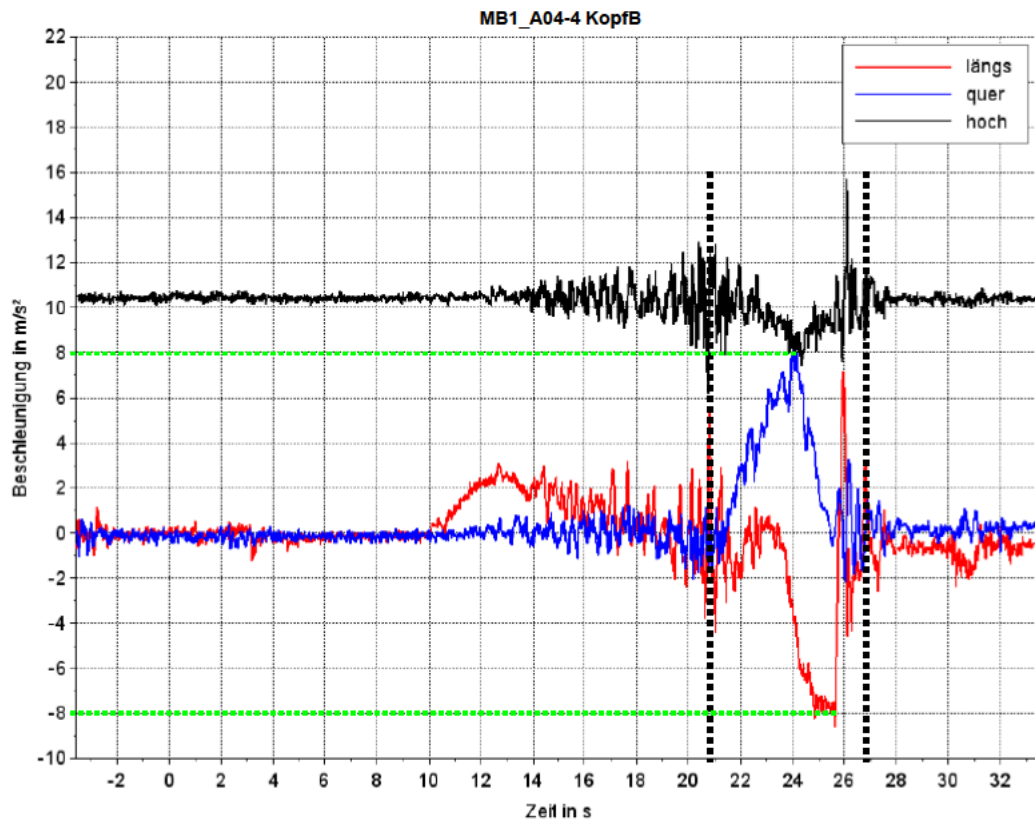


Diagramm 86: Messdaten des Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A04.4.

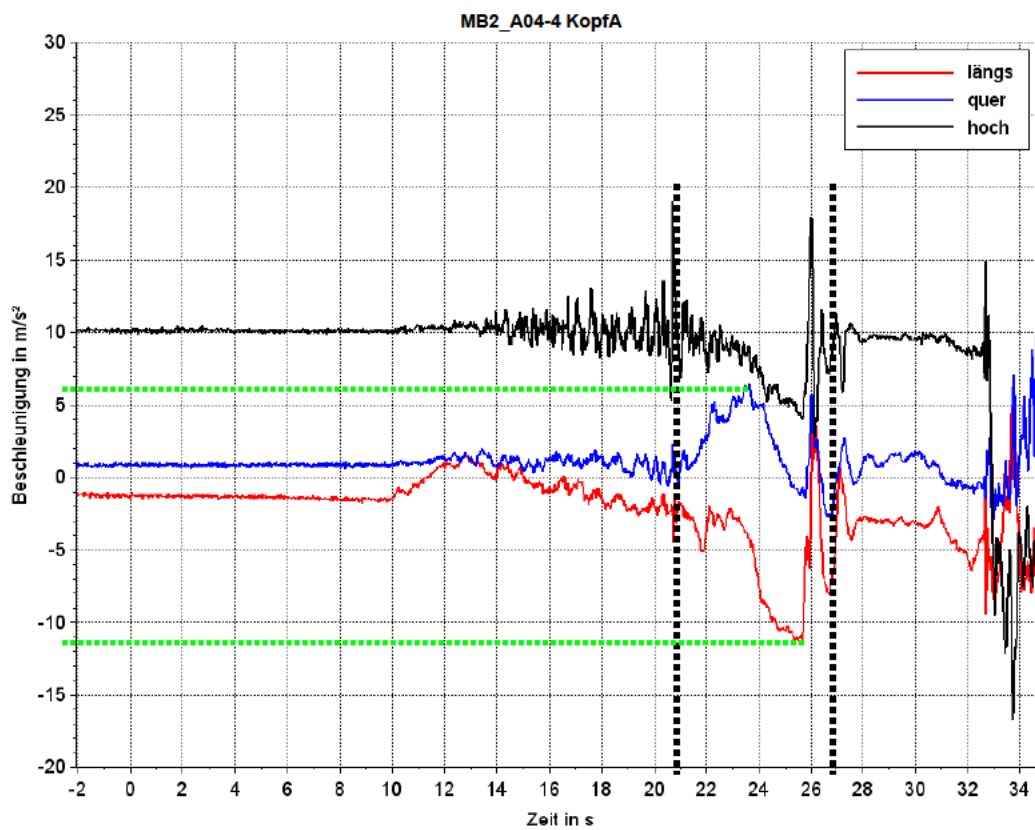


Diagramm 87: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A04.4.

Versuch A04.4 - Messdaten der Brustsensoren

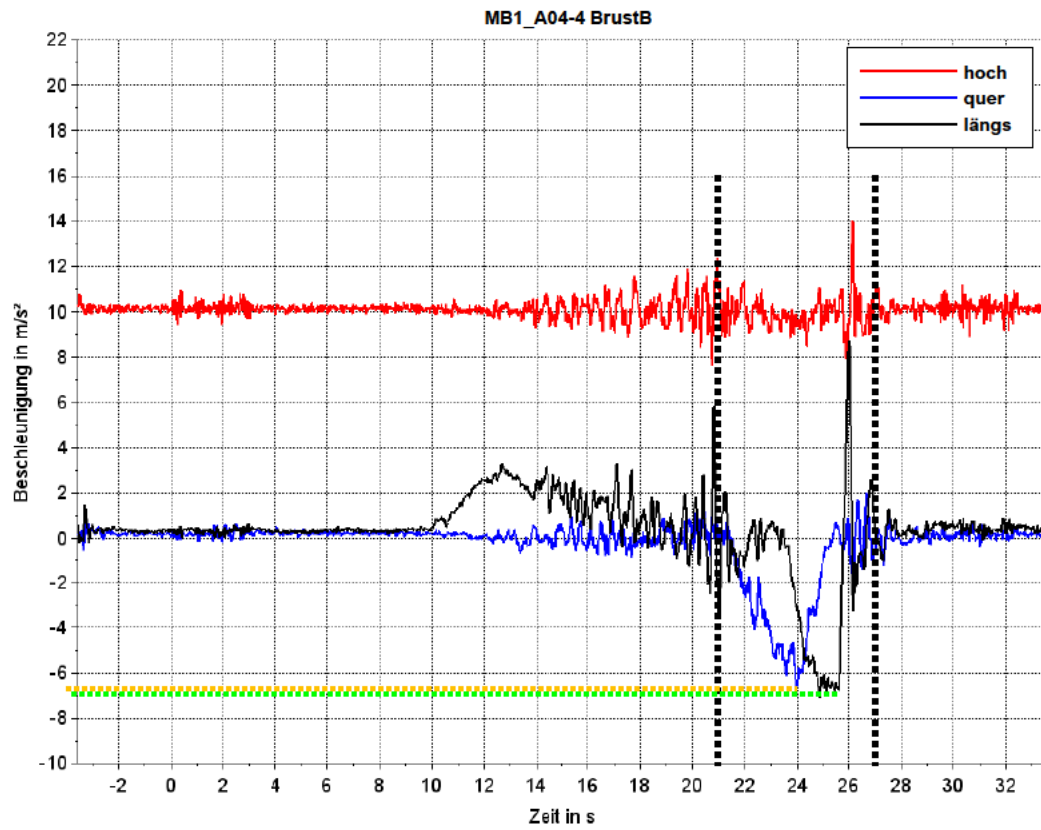


Diagramm 88: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A04.4.

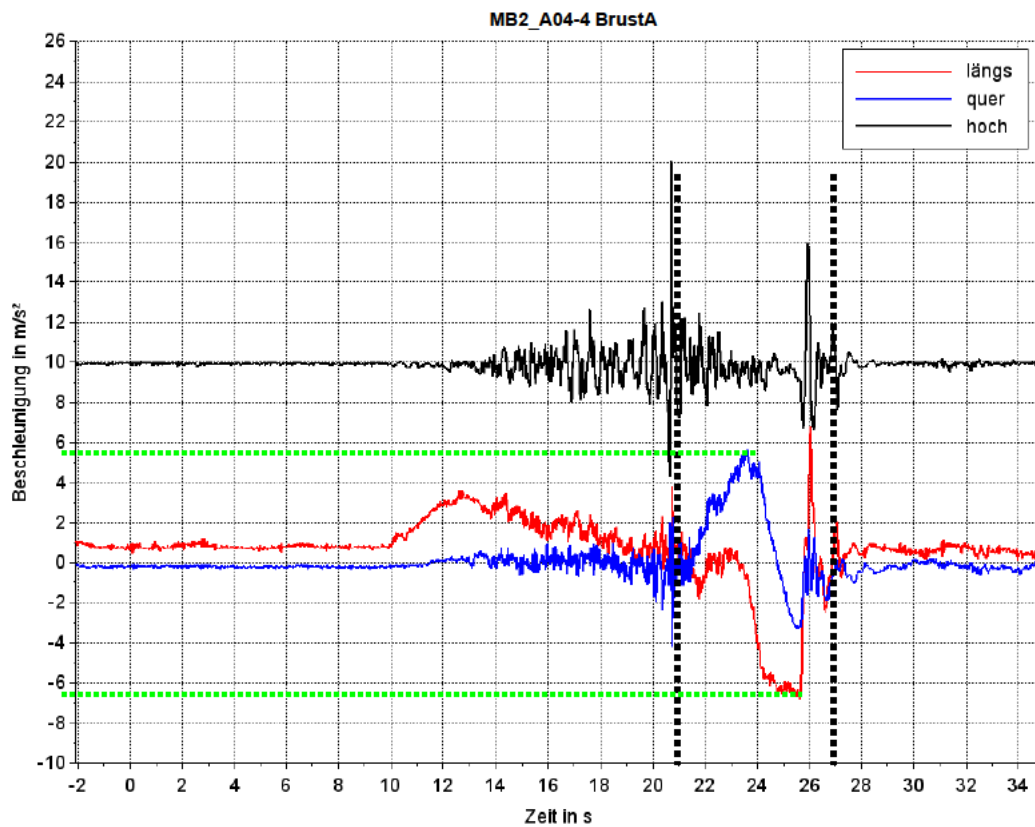


Diagramm 89: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A04.4.

4.5. Ergebnis Versuchsreihe Bremsschwelle

Zur Verkehrsberuhigung werden oftmals sogenannte Bremsschwellen auf der Straße angebracht, um die Geschwindigkeit der Fahrzeuge zu reduzieren. Diese Bremsschwellen, die auch bauliche Erhebung genannt werden, besitzen meist eine Höhe von rund zehn Zentimetern. Die letzte Versuchsreihe untersucht das Überfahren einer solchen Bremsschwelle mit einem Rettungswagen. Ziel der Versuchsreihe ist es, die Insassenbelastung der Probanden im Rettungswagen während der Überfahrt einer Bremsschwelle zu messen. Als Versuchsgeschwindigkeiten wurde lediglich $5 \frac{km}{h}$, $8 \frac{km}{h}$ und ca. $12 \frac{km}{h}$ gewählt, wodurch berücksichtigt wurde, dass zum Schutz der transportierten Patienten Bremsschwellen in der Regel langsam überfahren werden. Es wurde daher auf höhere Geschwindigkeit verzichtet.

Das Versuchsfahrzeug wird zunächst auf einer geraden Strecke auf die Versuchsgeschwindigkeit beschleunigt, hält diese konstant und fährt anschließend über eine Bremsschwelle mit einer Höhe von rund 10 cm.

Abbildung 33 zeigt die Bildersequenz, in dem der Ablauf dieser Versuchsreihe dargestellt ist. Abbildung 34 zeigt exemplarisch die Synchronisation der Videodateien dieser fünften und letzten Versuchsreihe.

Im Anschluss an jeden Einzelversuch wurden die Aussagen zur taktilen Wahrnehmung der Probanden auf einem Fragebogen dokumentiert. Betrachtet man diese Aussagen der Probanden, welche im Diagramm 90 dargestellt sind, so zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Positionen in den Bereichen von Vorder- und Hinterachse. Proband C, welcher auf dem Beifahrersitz und somit in Höhe der Vorderachse positioniert ist, stuft seine Wahrnehmung stets zwei Wertungspunkte unter der Wahrnehmung der Probanden im Patientenraum ein. Begründen lässt sich dies durch das Nickenverhalten und Aufschaukeln des Rettungswagens und der unterschiedlich verbauten Fahrzeugdämpfersysteme. Zu Beginn des Überfahrens einer Bodenwelle dämpfen die

Fahrzeugfedern der Vorderachse diese Bewegung ab, die Front federt ein, das Heck federt aus. Mit dem Überfahren der Hinterachse der Bremsschwelle schwingt das Fahrzeug nach und steigert dadurch die Wahrnehmung der Probanden A und B. Beim letzten Versuch mit der höchsten Fahrgeschwindigkeit des Rettungswagens dokumentieren Proband C eine normale Wahrnehmung und die Probanden A und B übereinstimmend eine starke Wahrnehmung des Ereignisses.

Über die gesamte Versuchsreihe ist anhand der Aussagen der Probanden ein stetiger Anstieg der Insassenbelastungen zu erwarten. Bei diesen Versuchen ist infolge des Überfahrens je nach gewählter Geschwindigkeit mit einer deutlichen Insassenbelastung in Hochrichtung zu rechnen.

In allen Diagrammen der Versuchsreihe grenzen die schwarz gepunkteten Linien den Bereich des Ereignisses im Fahrversuch ein. Die grünen und orangen Hilfslinien unterstützen bei der Ermittlung der Messwerte.

In dieser Versuchsreihe ist Proband A auf der Trage positioniert. Proband B sitzt im Begleitstuhl des Patientenraums neben der Trage. Auf dem Beifahrersitz der Fahrerkabine des Rettungswagens sitzt der dritte Proband C. Proband C wurde durch seine Position auf dem Beifahrersitz mit keiner Messtechnik instrumentiert.



Abbildung 33: Bildersequenz der durchgeführten Versuchsreihe A05.



Abbildung 34: Exemplarische Videosynchronisation der Versuchsreihe A05.

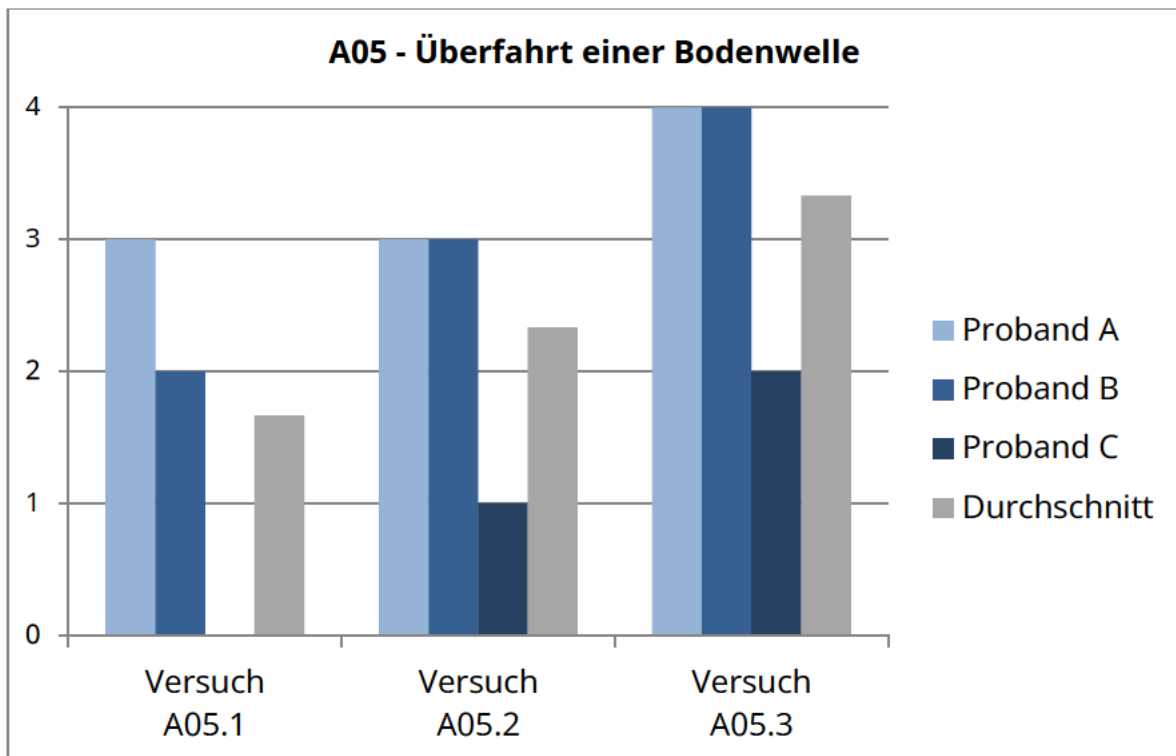


Diagramm 90: Ergebnis des Fragebogens der Bemerkbarkeit zum Versuch A05.

Skala: 0=nicht, 1=kaum, 2=normal, 3=stark, 4=sehr stark

4.5.1. Versuch A05.1 – 5 km/h

Im ersten Fahrversuch der Versuchsreihe beträgt die Geschwindigkeit ca. $5 \frac{km}{h}$. Es zeigen sich Analogien bei den Aussagen der Probanden, welche in Tabelle 17 dargestellt sind. Die Probanden B und C nehmen sowohl ein Neigen und Wanken als auch einen Ruck des Fahrzeugs wahr. Aus der Tatsache, dass dies von den beiden sitzenden Probanden dokumentiert wurde, ist zu erwarten, dass das hydraulische Tragesystem des liegenden Probanden A diese Bewegung dämpft. Die beiden Probanden im Patientenraum des Versuchsfahrzeugs nahmen zudem noch ein Rütteln des Fahrzeugs wahr.

Tabelle 17: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A05.1

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A				✓
Proband B		✓	✓	✓
Proband C		✓	✓	

Diagramm 91 und 92 stellen die Messwerte der IFU-Messboxen dar. Es zeigen sich vor allem Ausschläge in Hochrichtung. Die Maximalwerte in Längsrichtung variieren je nach gewählter Fahrgeschwindigkeit. Diagramm 91 zeigt eine Belastung von rund $4,9 \frac{m}{s^2}$ in Hochrichtung nach Abzug der Erdbeschleunigung. Einen ähnlichen Kurvenverlauf lässt das Diagramm 92 erkennen. Hier beträgt der Wert der hoch gerichteten Belastung rund $4,7 \frac{m}{s^2}$. Die Kurven der Quer- und Längsrichtung der beiden Diagramme sind zu vernachlässigen.

Diagramm 93 präsentiert die Messwerte des Kopfsensors des Probanden A. Nach Abzug des Versatzes der Messkurve und der Erdbeschleunigung lässt sich ein Wert der Beschleunigung in Hochrichtung von rund $12 \frac{m}{s^2}$ festhalten. Proband B erfährt hingegen, wie Diagramm zeigt, eine Beschleunigung in Hochrichtung von ca. $6 \frac{m}{s^2}$, wobei die Erdbeschleunigung und der Offset der Messkurve berücksichtigt wurde. Auch in diesen beiden Diagrammen zeigt

sich die jeweilige Bewegung des Kopfes der Probanden A und B durch die Verzögerung des Rettungswagens im Überfahren der Bremsschwelle.

In den letzten beiden Diagrammen dieses Fahrversuchs sind die Messwerte der Brustsensoren des Probanden A und B abgelichtet. Diagramm 95 zeigt eine Beschleunigung des Oberkörpers des Probanden A in Hochrichtung von etwa $9,7 \frac{m}{s^2}$. Bei diesem Wert wurde der minimale Versatz und das Einwirken der Erdbeschleunigung vom Maximalwert der Kurve subtrahiert. Mit rund $7,2 \frac{m}{s^2}$ wird Proband B in seiner sitzenden Position in Hochrichtung beschleunigt. Dies ist unter Berücksichtigung der Erdbeschleunigung im Diagramm 96 ersichtlich.

Zusammenfassend wird aus diesem Versuch deutlich, dass der liegende Proband A, trotz des hydraulisch gefederten Tragesystems, eine höhere Belastung erfährt als der sitzende Proband B. Erklärt kann dies über das ungleiche Heben und Senken des hydraulische Tragesystems zur Bewegung des Rettungswagens in Hochrichtung. Der Kontakt des Kopfes zur Trage wird hierbei durch Heben und Senken verringert und vergrößert, was sich auf die Kopfbeschleunigung in Hochrichtung auswirkt. Eine weitere wichtige Beobachtung besteht darin, dass die vergleichsweise langsame Reaktionszeit die Belastung des liegenden Probanden A in Hochrichtung verstärkt. Dies gilt insbesondere für die Kopfbeschleunigung des Probanden A.

Analog können die Messdaten des Probanden B auf den Probanden C übertragen werden.

Versuch A05.1 - Messdaten der IFU-Messboxen

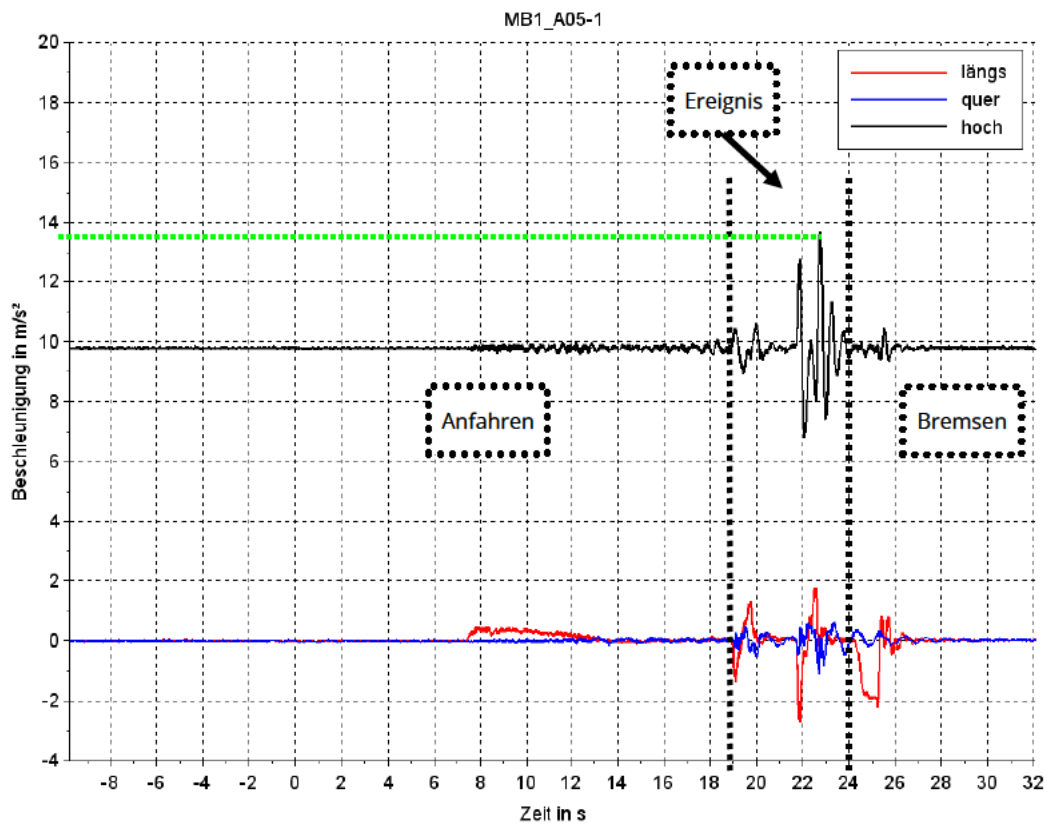


Diagramm 91: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A05.1.

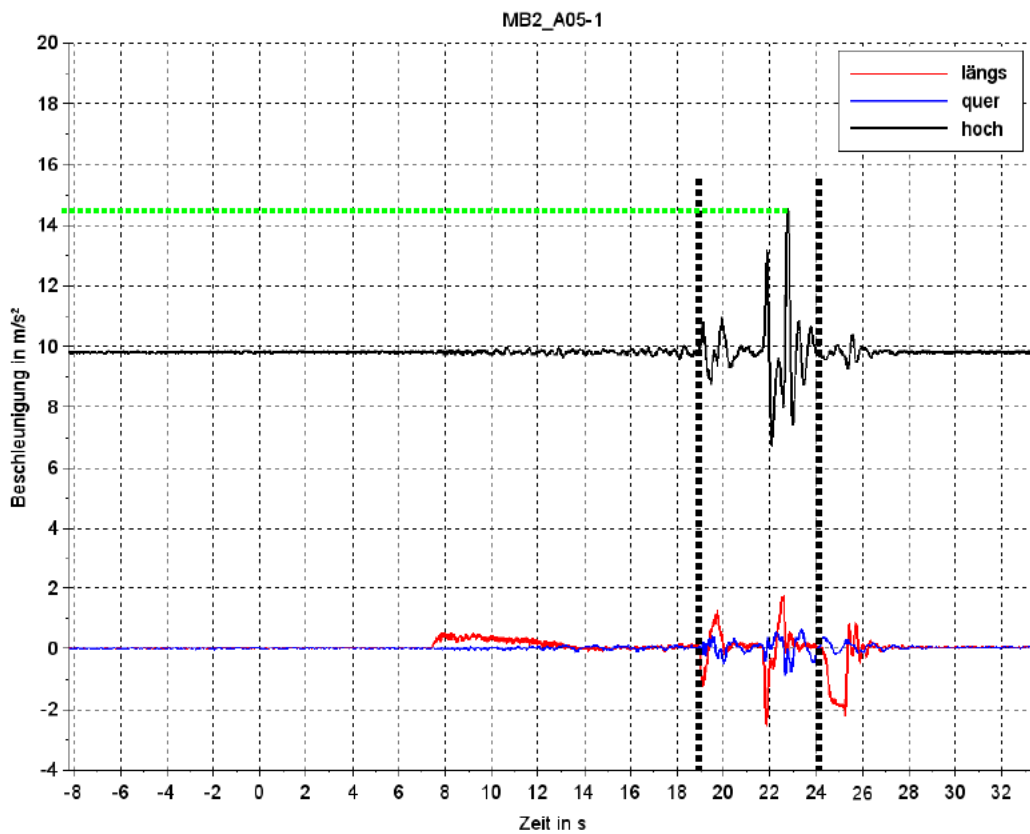


Diagramm 92: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A05.1.

Versuch A05.1 - Messdaten der Kopfsensoren

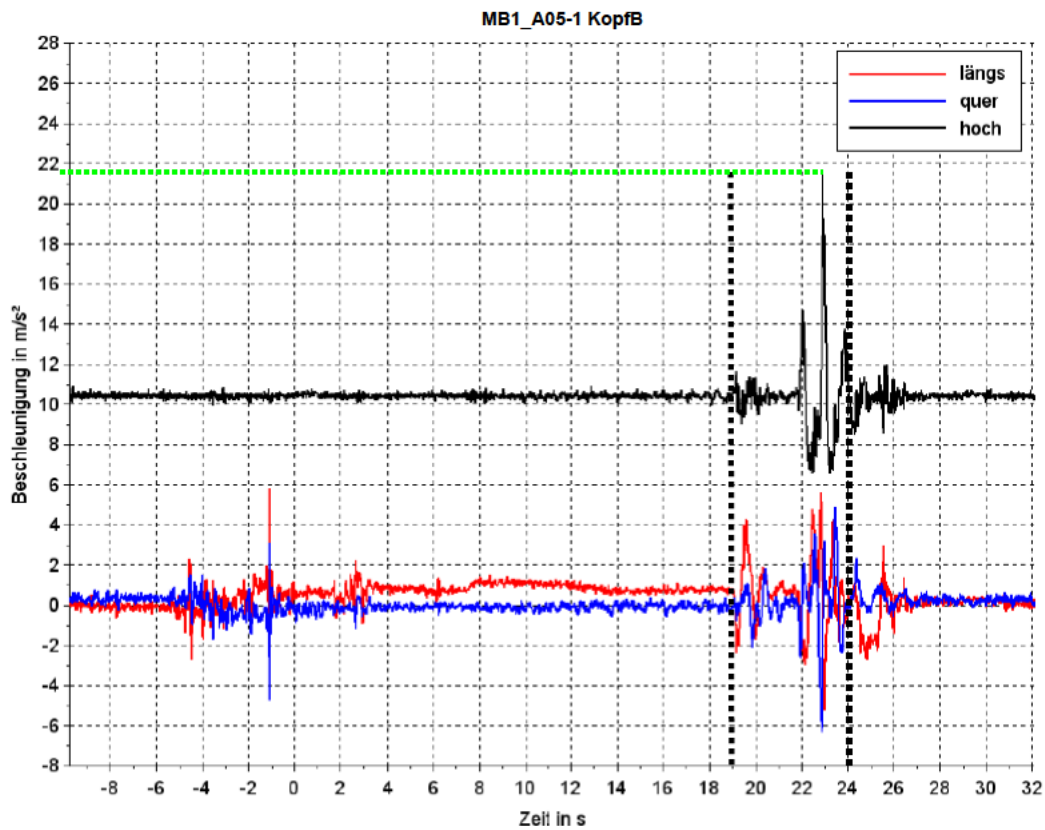


Diagramm 93: Messdaten der Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A05.1.

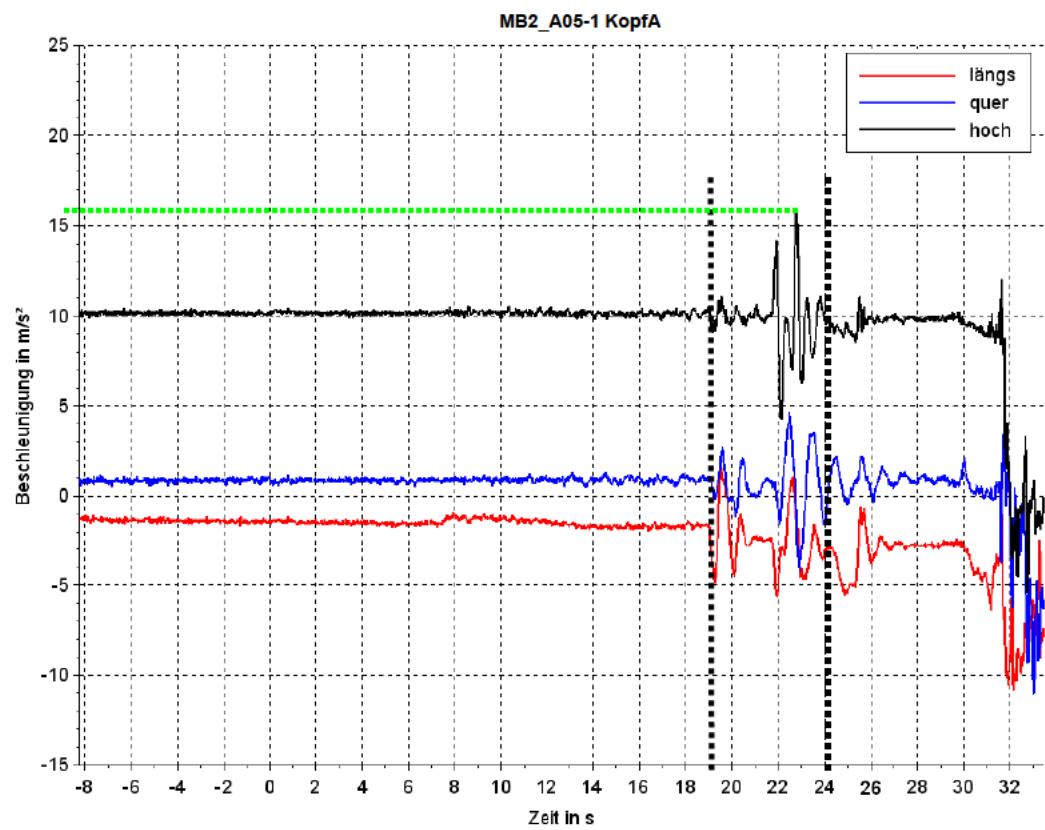


Diagramm 94: Messdaten der Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A05.1.

Versuch A05.1 - Messdaten der Brustsensoren

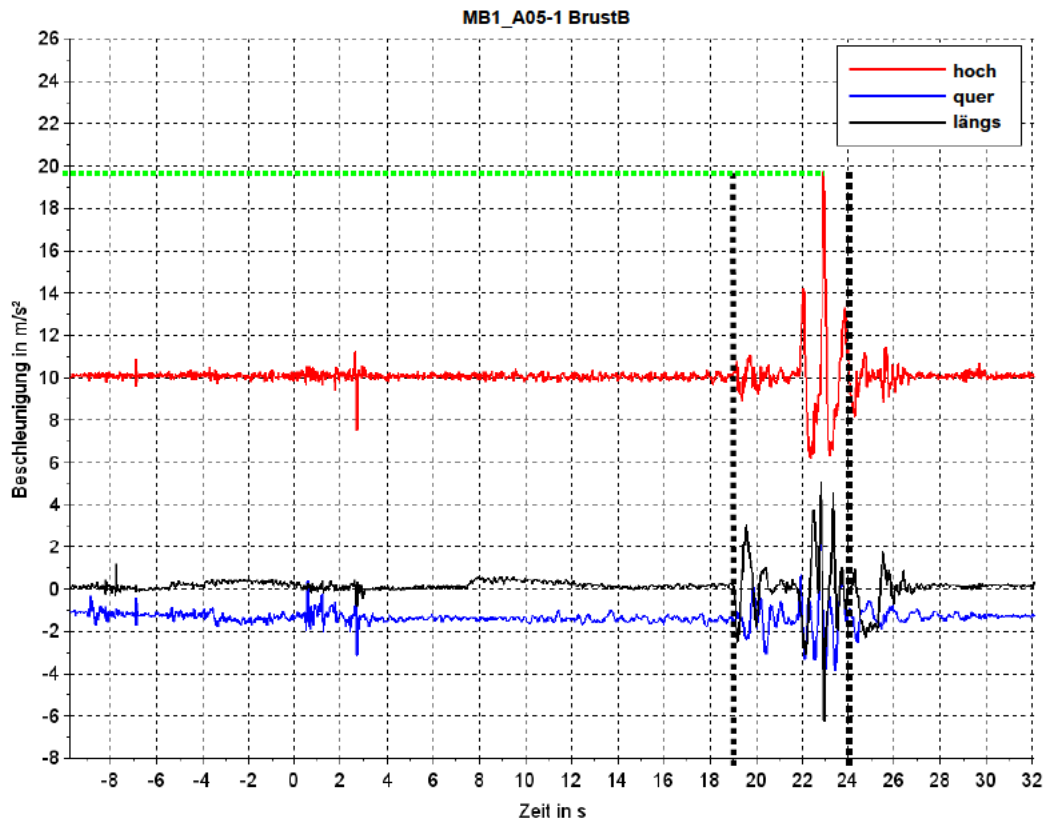


Diagramm 95: Messdaten der Brustsensoren B des Probanden A im Versuch A05.1.

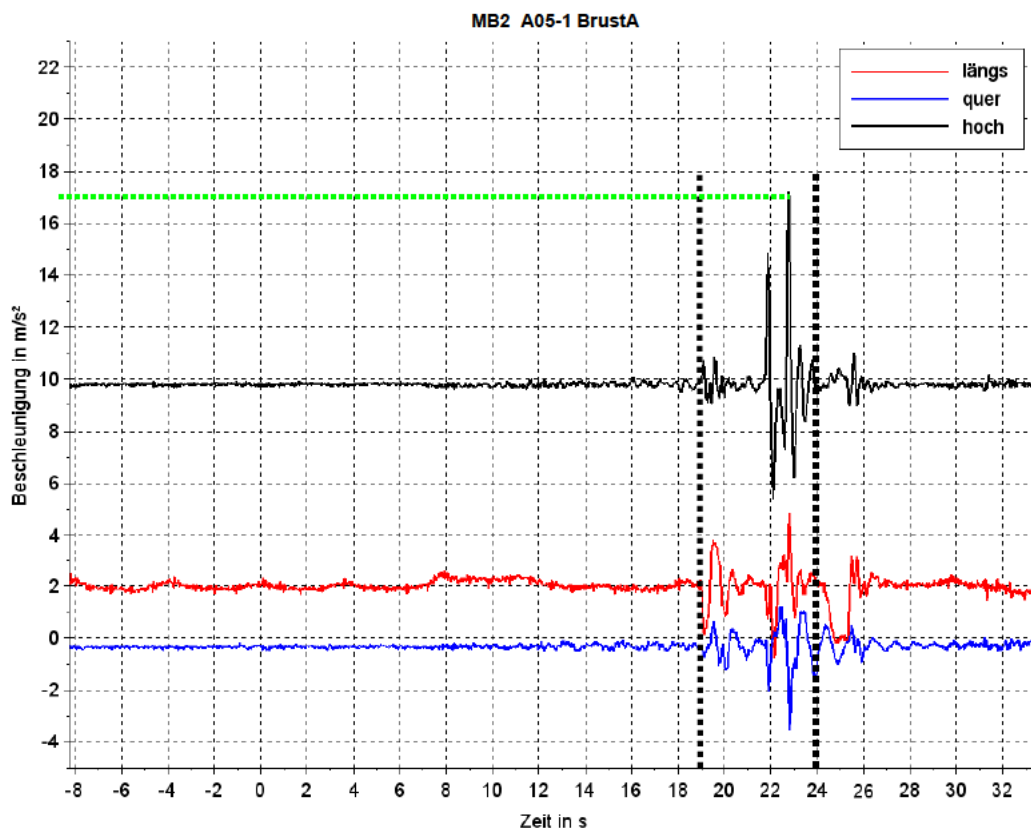


Diagramm 96: Messdaten der Brustsensoren A des Probanden B im Versuch A05.1.

4.5.2. Versuch A05.2 – 8 km/h

Die Geschwindigkeit des Rettungswagens beträgt im zweiten Fahrversuch ca. $8 \frac{km}{h}$. Betrachtet man die dokumentierten Aussagen der Probanden zu diesem Fahrversuch, so fällt auf, dass diese identisch zu den Aussagen des ersten Fahrversuchs dieser Versuchsreihe sind. In Tabelle 18 sind die Aussagen der Probanden dargestellt. Proband B und C nehmen sowohl ein Neigen und Wanken als auch einen Ruck des Fahrzeugs wahr. Die Probanden A und B im Patientenraum des RTW nehmen zudem ein Rütteln des Fahrzeugs wahr.

Tabelle 18: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A05.2

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A				✓
Proband B		✓	✓	✓
Proband C		✓	✓	

Die Diagramme 97 und 98 zeigen die Messdaten der beiden IFU-Messboxen. In Hochrichtung dokumentiert die erste Messbox, welche vor dem Proband A positioniert ist, einen Beschleunigungswert von ca. $4,9 \frac{m}{s^2}$. Dies ist im Diagramm 97 nach Abzug der Erdbeschleunigung ersichtlich. Ähnlich zeigt sich dies auch im Diagramm 98. Hier zeichnet die zweite Messbox vor dem Probanden B eine Belastung von etwa $5,7 \frac{m}{s^2}$ in Hochrichtung auf, wobei die Erdbeschleunigung berücksichtigt wurde.

Die resultierende Beschleunigung auf den Kopf des Probanden A ist im Diagramm 99 ersichtlich. Es zeigt sich nach erneuter Berücksichtigung der Erdbeschleunigung und des Kurvenversatzes eine Beschleunigung in Hochrichtung von ca. $15,5 \frac{m}{s^2}$ (vgl. grüne Hilfslinie). Auf den Kopf des Probanden B, wie im Diagramm 100 ersichtlich, eine Belastung von ca. $6,5 \frac{m}{s^2}$ in Hochrichtung ein. Hierbei wurde das Offset des Kurvenverlaufs und die allgegenwärtige Erdbeschleunigung ebenfalls berücksichtigt.

In den Diagrammen 101 und 102 sind die Messwerte der externen Brustsensoren beschrieben. Im Diagramm 101 ist eine Brustbeschleunigung in Hochrichtung des Probanden A, nach Abzug der Erdbeschleunigung und des Offsets, von ca. $10 \frac{m}{s^2}$ abzulesen. Eine äquivalente Beschleunigung erfährt der Oberkörper des Probanden B, welche im Diagramm 102 dargestellt ist. Die Beschleunigung in Hochrichtung kann hier mit gut $9 \frac{m}{s^2}$ angegeben werden.

Es bestätigt sich auch in der zweiten Versuchsfahrt, dass der liegende Proband A, trotz des hydraulisch gefederten Tragesystems, eine höhere Belastung erfährt als der sitzende Proband B. Insbesondere die Kopfbeschleunigung in Hochrichtung ist fast doppelt so groß. Begründet und erklärt werden kann dies über den Bewegungsausgleich des hydraulisch gefederten Tragesystems. Die langsame Reaktionszeit des Tragesystems führt zu einem asynchronen Heben und Senken der Trage zur Bewegungsrichtung des RTW in Hochrichtung. Beim liegenden Probanden A erfolgt die Bewegungsänderung ebenfalls in Hochrichtung. Hierbei wird der Kontakt des Kopfes zur Trage durch Heben und Senken verringert und vergrößert, was sich auf die Kopfbeschleunigung in Hochrichtung auswirkt.

Die Messdaten des sitzenden Probanden B im Patientenraum können äquivalent auf den sitzenden Probanden C in der Fahrerkabine übertragen werden.

Versuch A05.2 - Messdaten der IFU-Messboxen

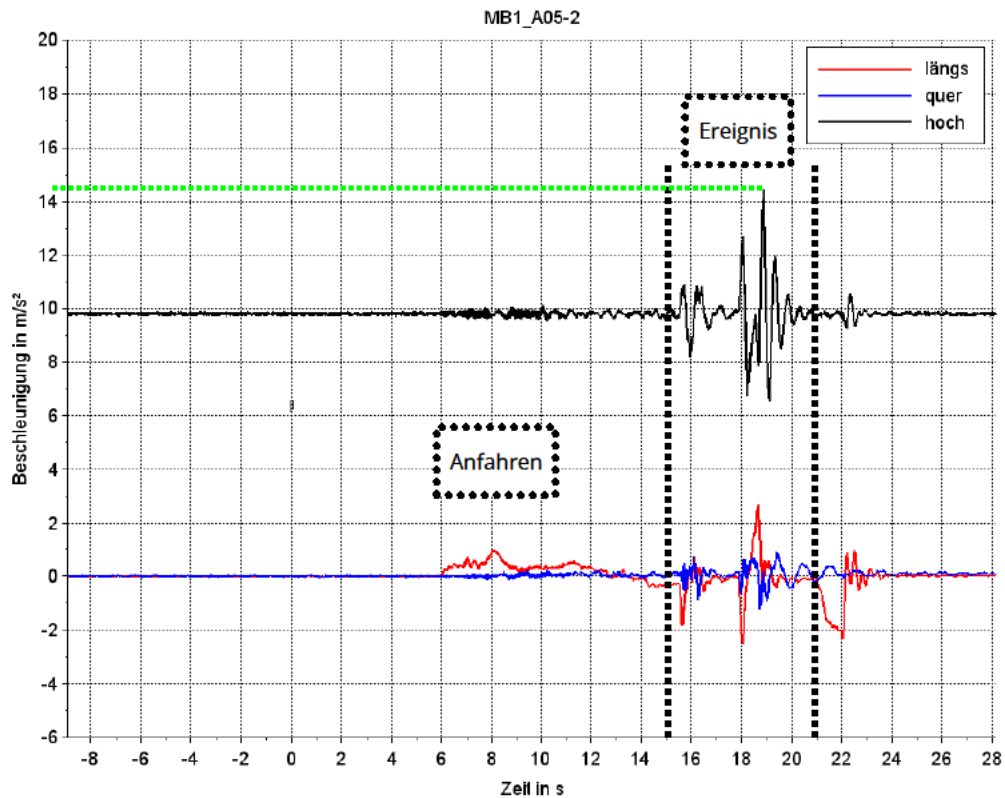


Diagramm 97: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A05.2.

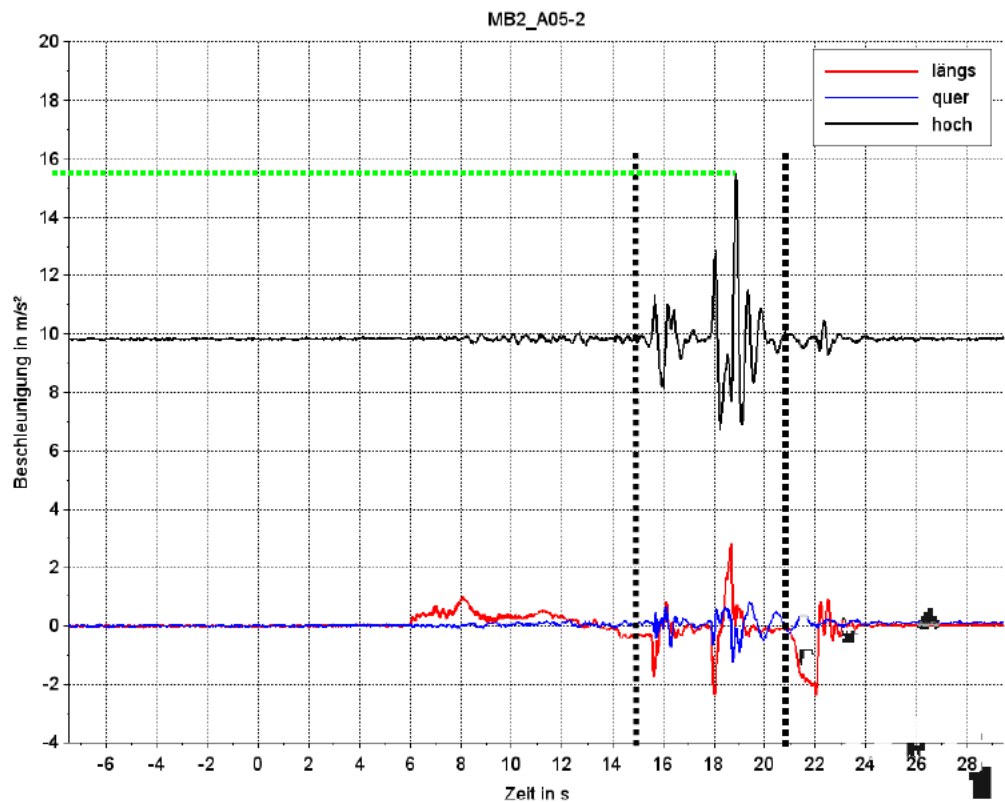


Diagramm 98: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A05.2.

Versuch A05.2 - Messdaten der Kopfsensoren

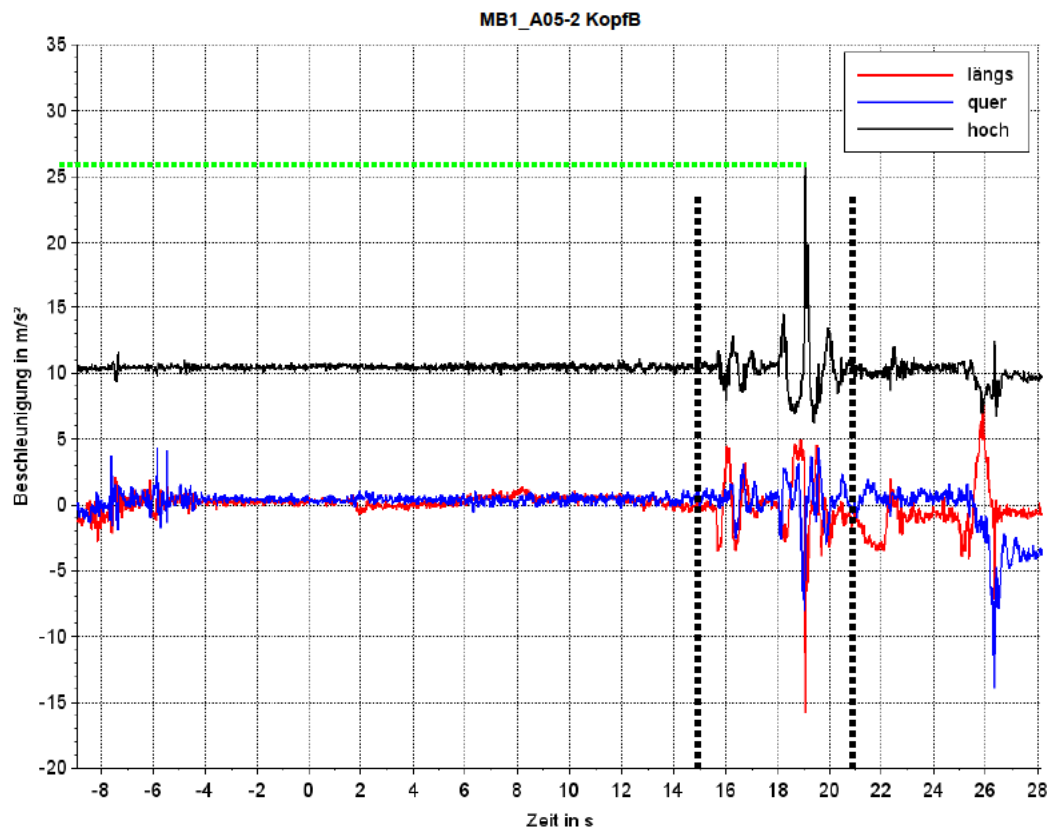


Diagramm 99: Messdaten der Kopfsensors B des Probanden A im Versuch A05.2.

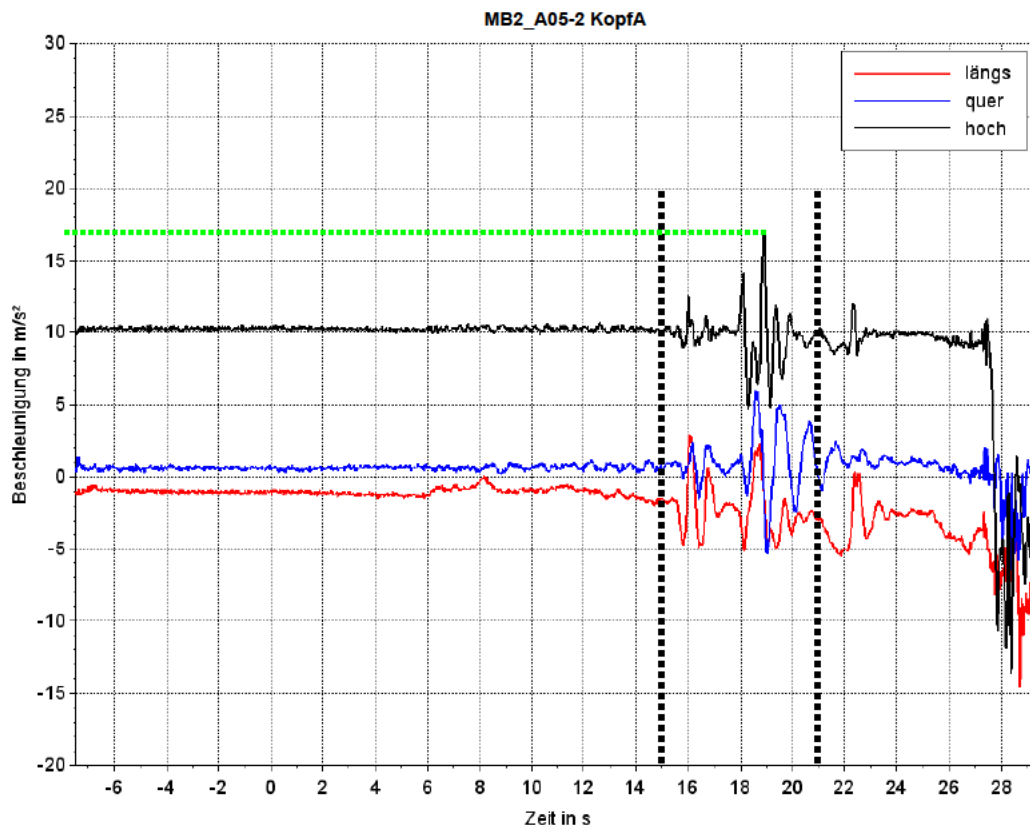


Diagramm 100: Messdaten der Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A05.2.

Versuch A05.2 - Messdaten der Brustsensoren

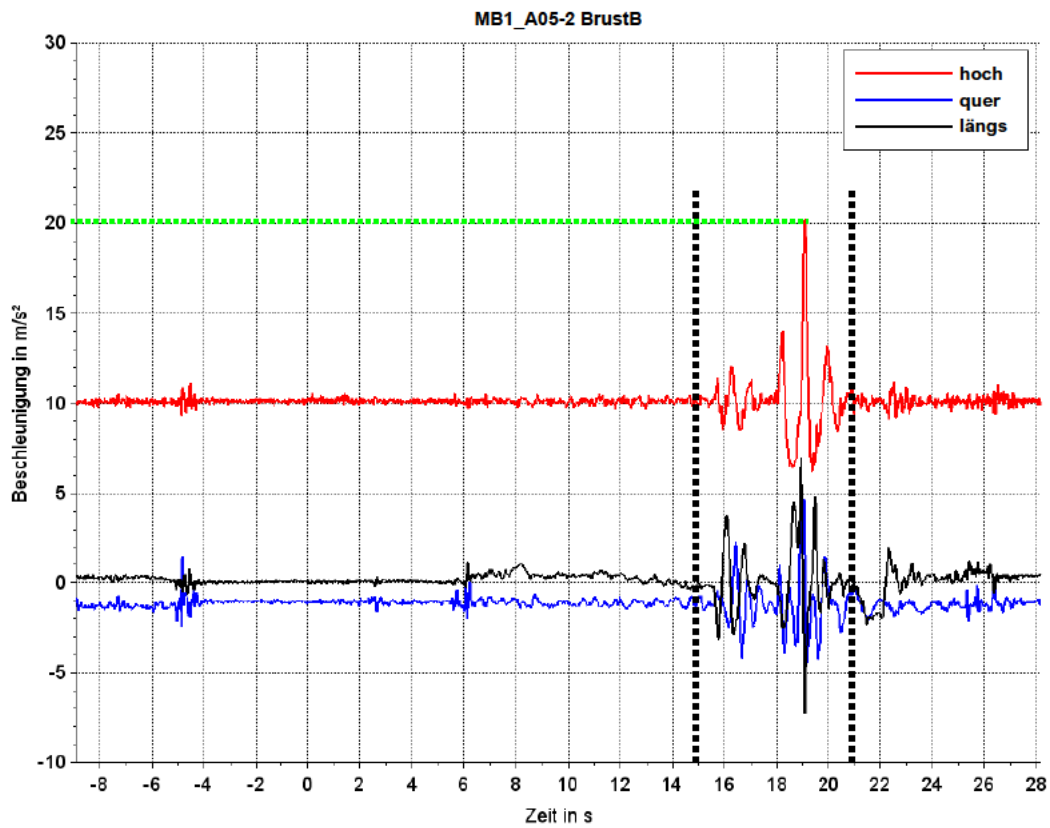


Diagramm 101: Messdaten der Brustsensoren B des Probanden A im Versuch A05.2.

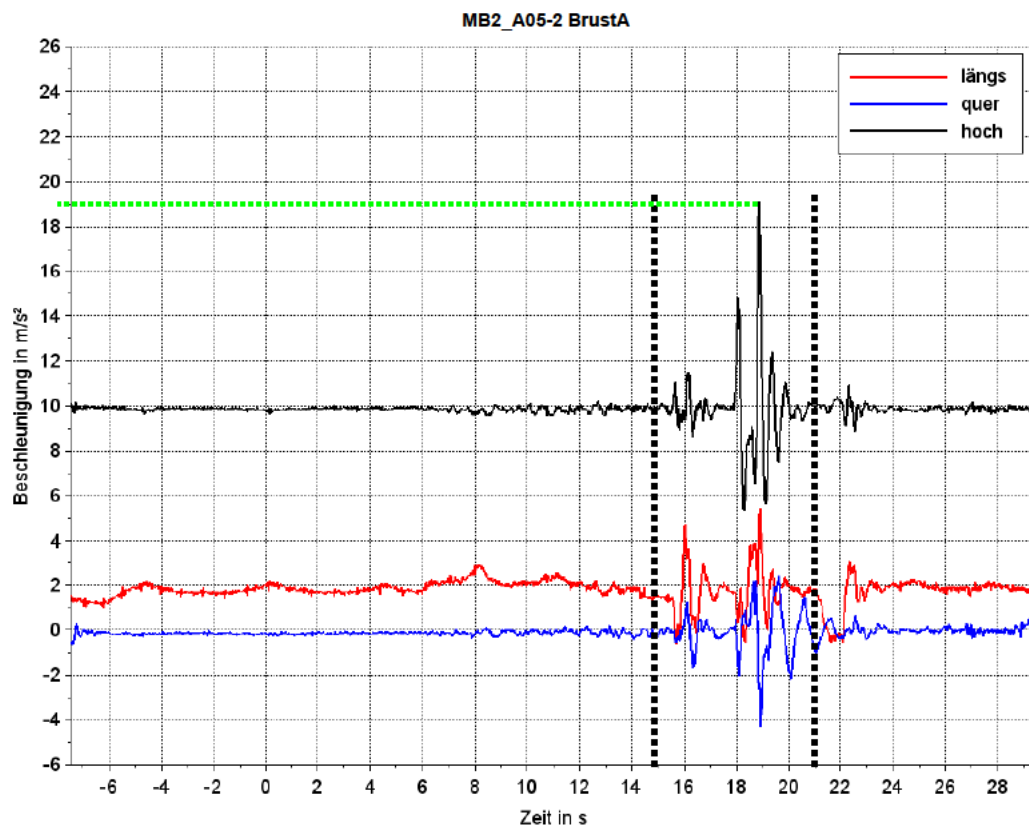


Diagramm 102: Messdaten der Brustsensoren A des Probanden B im Versuch A05.2.

4.5.3. Versuch A05.3 – 12 km/h

Bei der letzten Versuchsfahrt, die mit ca. $12 \frac{km}{h}$ durchgeführt wurde, registrieren alle Probanden übereinstimmend ein Rütteln und ein Ruck des Rettungswagens. Der sitzende Proband B im Patientenraum und der sitzende Proband C auf dem Beifahrersitz des Rettungswagens notierten, wie in Tabelle 19 gezeigt, zudem ein Neigen des Fahrzeugs. Dies kann auf das Überfahren der Bodenwelle zurückgeführt werden. Der wahrgenommene Ruck von den Probanden kann durch das plötzliche Anheben des Rettungswagens beim Überfahren einer Bremsschwelle erklärt werden.

Tabelle 19: Beurteilung der Art der Bemerkbarkeit für den Versuch A05.3

	Vibrieren	Neigen/Wanken	Ruck/Schlag	Rütteln
Proband A			✓	✓
Proband B		✓	✓	✓
Proband C		✓	✓	✓

Die Diagramme 103 und 105 zeigen die Messdaten der beiden IFU-Messboxen. In Hochrichtung zeigt sich, wie im Diagramm 103 ersichtlich, eine Belastung von ca. $11,7 \frac{m}{s^2}$. Einen identischen Kurvenverlauf zeigt Diagramm 104. Hier beträgt die Beschleunigung in Hochrichtung ebenfalls rund $11,7 \frac{m}{s^2}$. Die auffällig hohe Beschleunigung des Kopfes des Probanden A ist in Diagramm 105 dargestellt. Es zeigen sich zwei massive Ausschläge des Kurvenverlaufs in Längs- und Hochrichtung. In Längsrichtung beträgt die Beschleunigung ca. $87 \frac{m}{s^2}$ (vgl. orange Hilfslinie). Umgerechnet entspricht dies einer Belastung von ca. 8,9 g, also rund dem Neunfachen der Erdbeschleunigung. Begründet ist dieser deutlich ausgeprägte Wert durch das ruckartige Beschleunigen des Kopfes des Probanden durch die Bewegung des Tragesystems. Zudem erfährt Proband A in Hochrichtung eine Beschleunigung von ca. $18 \frac{m}{s^2}$, unter Berücksichtigung der Erdbeschleunigung und des Versatzes der Messkurve. Der Kopf

des Probanden B ist, wie in Diagramm 106 abgebildet, einer Belastung in Hochrichtung von rund $19 \frac{m}{s^2}$ ausgesetzt. Auch dieser Wert wurde unter Berücksichtigung des Offsets des Kurvenverlaufs und der Erdbeschleunigung ermittelt.

In den Diagrammen 107 und 108 sind die ebenfalls deutlich erhöhten Messdaten der beiden Brustsensoren aufgezeigt. Äquivalent zur Belastung des Kopfes erfährt auch der Oberkörper des Probanden A eine überlagerte Beschleunigung in Längs- und Hochrichtung. In Längsrichtung liegt der Wert der Beschleunigung bei ca. $91 \frac{m}{s^2}$ (vgl. orange Hilfslinie). Dies entspricht dies umgerechnet einer Belastung von ca. 9,2 g. Mit etwa $35 \frac{m}{s^2}$ wird der Oberkörper des Probanden A, unter Berücksichtigung des Offsets und der Erdbeschleunigung, zudem in Hochrichtung bewegt (vgl. grüne Hilfslinie). Diagramm 108 weist einen gleichen Wert der Belastung des Oberkörpers des Probanden B in Hochrichtung auf. Dieser liegt unter Berücksichtigung des Versatzes und der Erdbeschleunigung bei ca. $36 \frac{m}{s^2}$.

Die ausgeprägten Beschleunigungswerte des liegenden Probanden bei diesem Fahrversuch zeigen, dass der liegende Proband A, trotz des hydraulisch gefederten Tragesystems, eine massive Belastung des Kopf- und Brustbereichs erfährt. Durch das Tragesystem erfährt der liegende Proband eine überlagerte Beschleunigung in Längs- und Hochrichtung. Erklärt werden kann dies über den Bewegungsausgleich des hydraulisch gefederten Tragesystems. Die im Vergleich stark verlangsamte Reaktionszeit des Tragesystems führt zu einem ausgeprägten und asynchronen Heben und Senken der Trage zur Bewegungshochrichtung des Rettungswagens. Zugleich spielt der einzig mögliche Bewegungsweg in z-Richtung des liegenden Probanden A eine tragende Rolle. In diese Richtung fließt die maximal kinetische Energie. Insbesondere die langsame Reaktionszeit des Tragesystems führt zu diesen massiven Insassenbals-

tungen des liegenden Probanden A. Des Weiteren kann ein Aufschaukeln der schwingenden Bewegung der Trage in den Videoaufnahmen nachvollzogen werden. Die Kopfbelastung des Probanden A beträgt das 4,5-fache des Probanden B.

Proband B erfährt zudem die ähnliche Brustbelastung wie Proband A. Die Messdaten des Probanden B können analog auf den Probanden C in der Fahrerkabine übertragen werden.

Versuch A05.3 - Messdaten der IFU-Messboxen

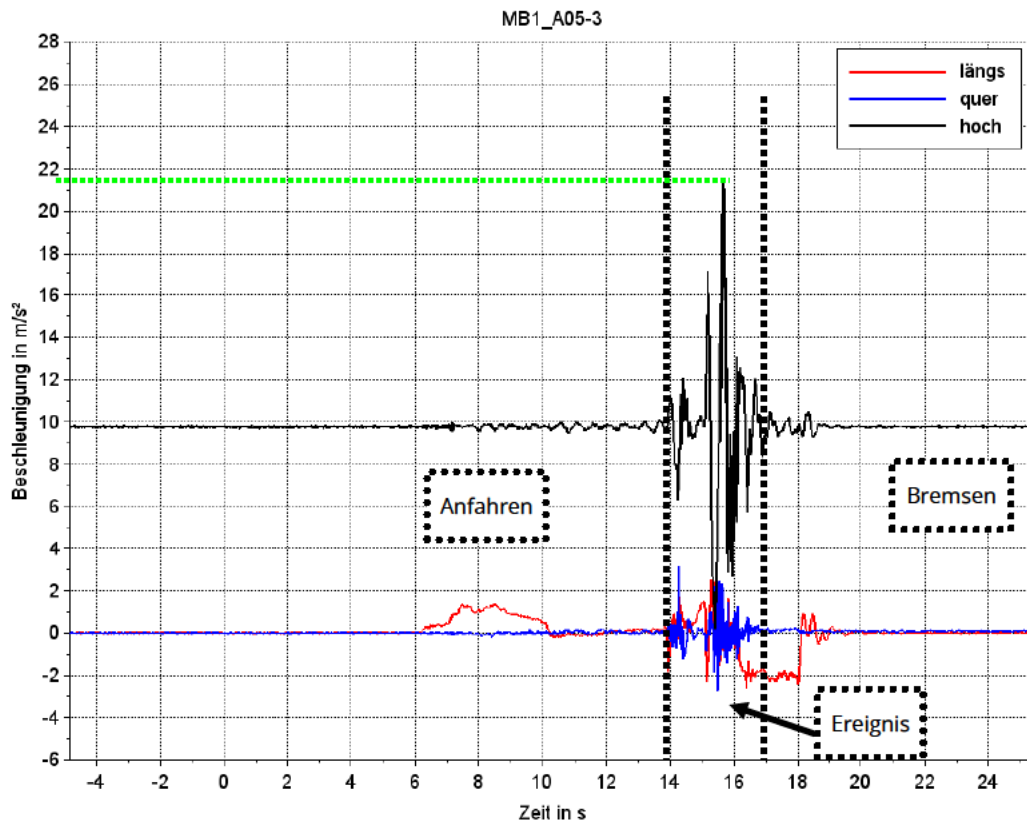


Diagramm 103: Messdaten der IFU-Messbox 1 des Probanden A im Versuch A05.3.

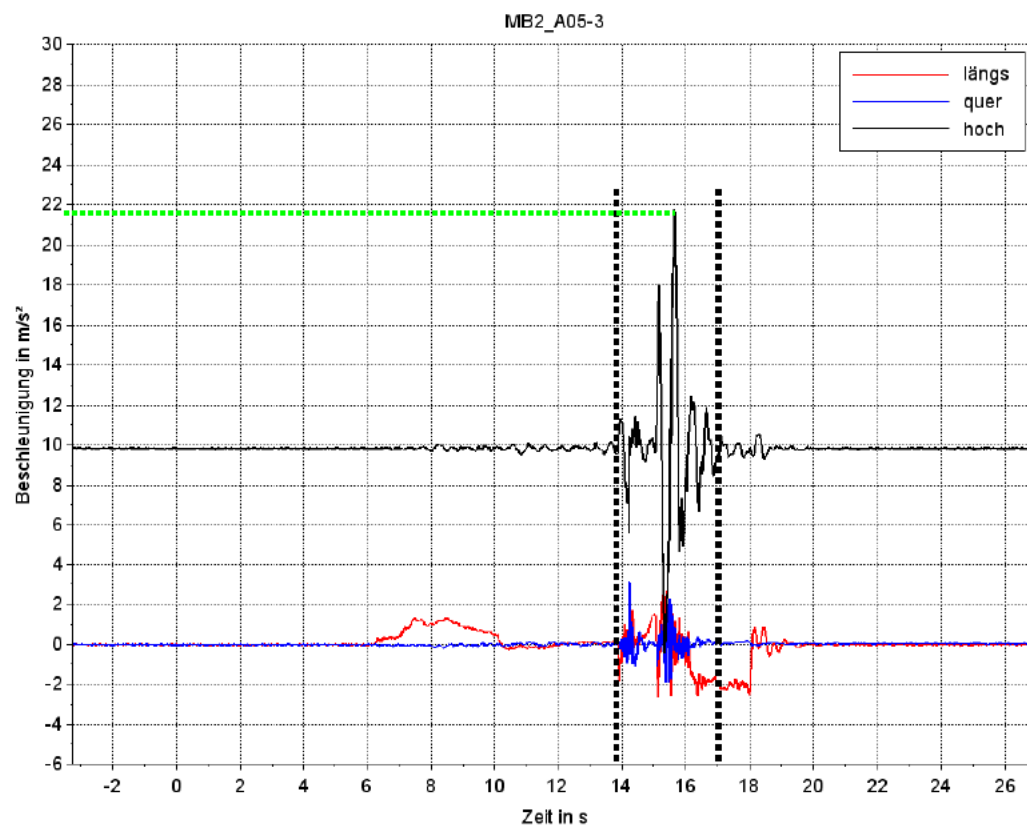


Diagramm 104: Messdaten der IFU-Messbox 2 des Probanden B im Versuch A05.3.

Versuch A05.3 - Messdaten der Kopfsensoren

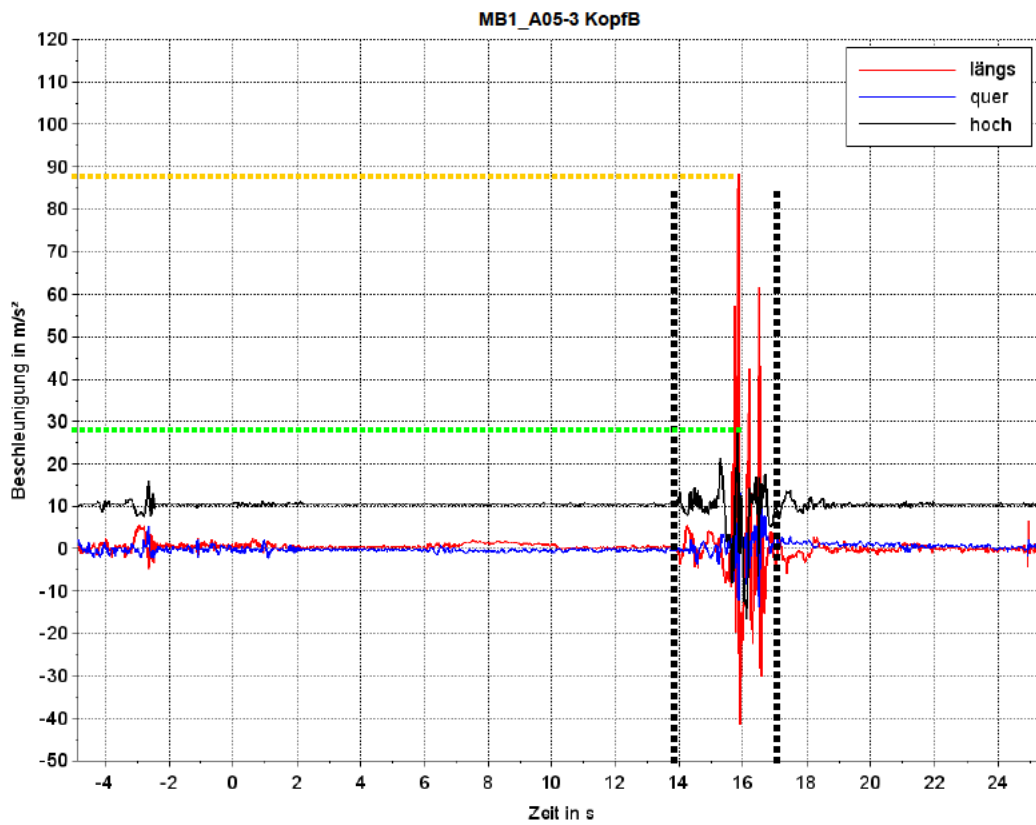


Diagramm 105: Messdaten des Kopfsensors Bdes Probanden A im Versuch A05.3.

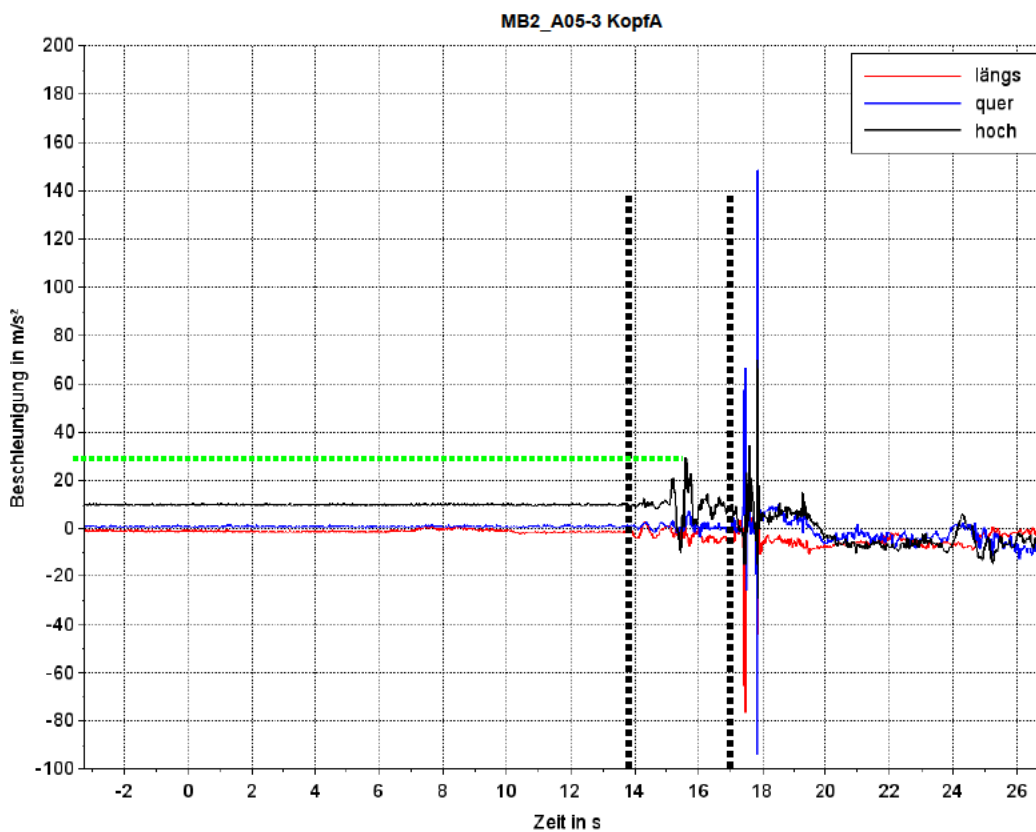


Diagramm 106: Messdaten des Kopfsensors A des Probanden B im Versuch A05.3.

Versuch A05.3 - Messdaten der Brustsensoren

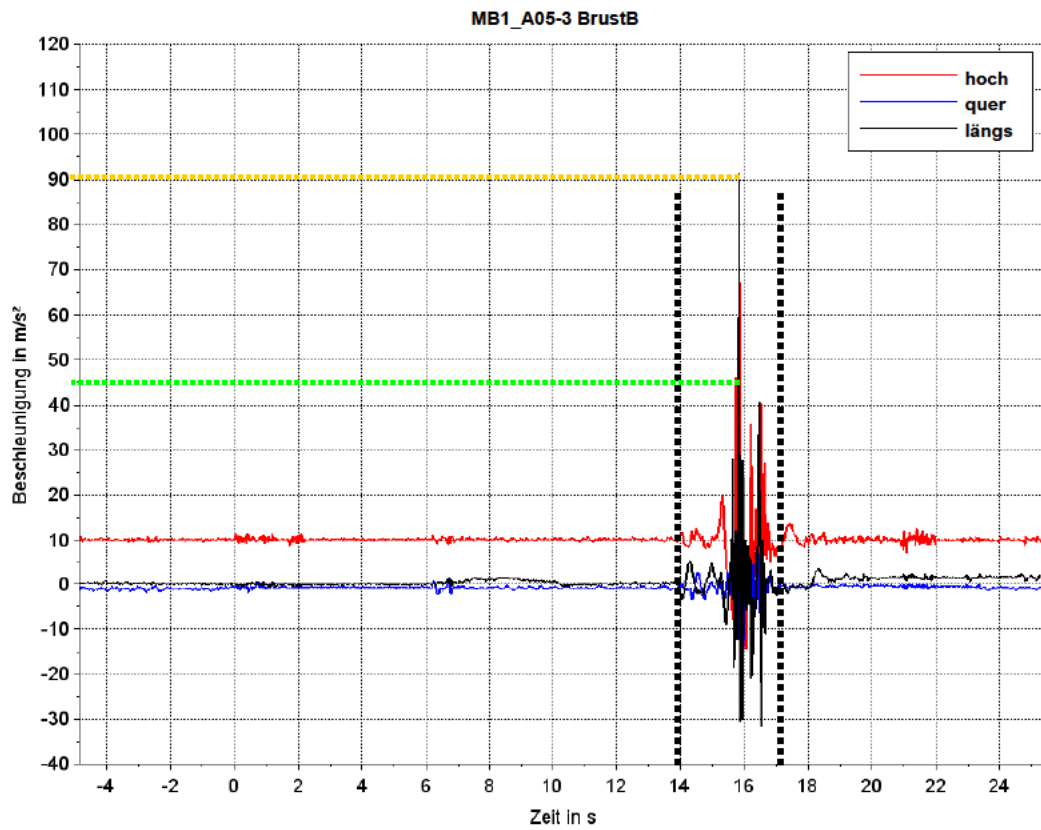


Diagramm 107: Messdaten des Brustsensors B des Probanden A im Versuch A05.3.

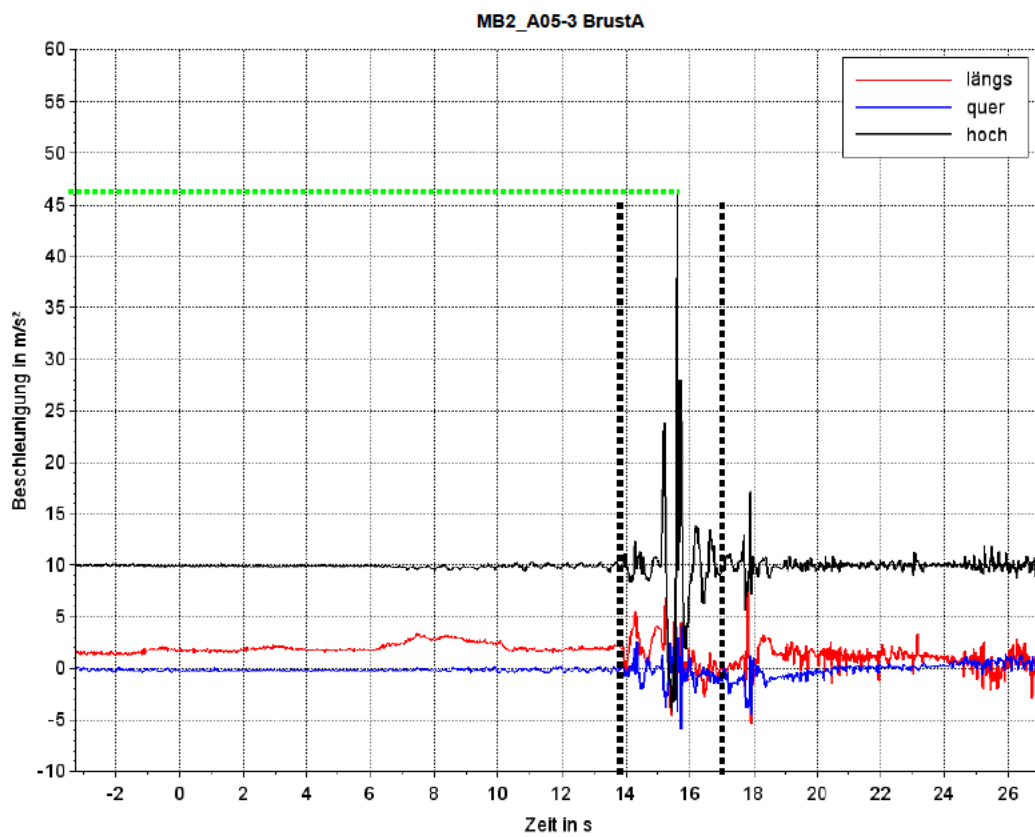


Diagramm 108: Messdaten des Brustsensors A des Probanden B im Versuch A05.3.

5. Diskussion

Nachdem nun die Ergebnisse der Versuchsreihen vorgestellt wurden, werden in diesem Abschnitt auffallende Ergebnisse aus den Versuchsreihen diskutiert. Bei einzelnen Versuchen zeigt sich eine besonders starke Belastung der Probanden. Die auffallenden Versuche mit einer besonders ausgeprägten körperlichen Insassenbelastung im Rettungswagen sind:

- Gefahrenbremsung
- Kurvenfahrt mit Gefahrenbremsung
- Überfahrt einer Bremsschwelle

Die Insassenbewegung aus diesen drei Versuchsreihen wird in diesen Abschnitt noch einmal gesondert betrachtet und die aus den zugehörigen Videos erzeugten Einzelbilder analysiert. Durch diese Videoanalyse kann die Bewegung der Probanden A und B und deren Verletzungsmöglichkeiten besser nachvollzogen werden.

Es werden Einzelbilder der Versuche mit der höchst gefahrenen Geschwindigkeit verwendet, da die Bewegung der Probanden hierbei am stärksten ausgeprägt war.

Im Folgenden werden die aufgezählten Versuche per Videoanalyse näher erläutert.

Gefahrenbremsung

Bei einer Gefahrenbremsung fällt auf, dass zunächst das Fahrzeug abgebremst wird, bevor der Körper des Probanden folgt. Dies ist durch die Trägheit eines beschleunigten Körpers nachzuvollziehen. Der Körper des Probanden wird durch den Rückhaltegurt in seiner Vorwärtsbewegung gebremst. Abbildung 35 zeigt die Bewegung des Probanden B während des Bremsvorgangs. Der Bremsvorgang ist an der schräg hängenden Leitung des Funkgeräts ersichtlich (vgl. gelber Pfeil). Es zeigt sich durch den angelegten Rückhaltegurt, dass der Oberkörper des Probanden in seiner Position gehalten wird. Lediglich der Kopf wird durch seine Trägheit weiter in Längsrichtung bewegt. Er erfährt eine Flexionsbewegung nach vorne (vgl. blauer Pfeil). Durch das Einwirken der Belastung des Bremsvorgangs zeigt sich auch eine Krümmung des Oberkörpers im Übergang zum Kopf des Probanden. Abbildung 36 stellt die Bewegung des Probanden nach Beendigung des Bremsvorgangs dar. Der Kopf des Probanden B wird zurück in den Sitz gedrückt. Diese Bewegung nennt man auch Rebounding. Dabei wird der Kopf des Probanden nach hinten überstreckt und erzeugt eine Stauchung des Nackens.

Aus verschiedenen Crashversuchen in der Vergangenheit wurde die Bewegung des Insassens messtechnisch dokumentiert (vgl. Burg & Moser 2017: 564). Abbildung 37 zeigt exemplarisch die Bewegung des Insassens bei einer Geschwindigkeitsänderung (vgl. Burg & Moser 2017: 564). Es zeigt sich, dass der Kopf des Insassens zunächst an der Kopfstütze anliegt und anschließend eine Rotation um die Querachse erfährt. In diesem Beispiel ist die Höhe der Kopfstütze zudem zu niedrig eingestellt, sodass eine Streckung des Nackens die Folge ist. Analog zu den Versuchen dieser Arbeit erfährt Proband B in seiner sitzenden Position die gleiche Bewegung.

Die Geometriebewertung der Position der Kopfstütze nach IIWPG ist in Abbildung 38 aufgezeigt. Die Einstufung der Kopfstützenhöhe erfolgt in den Kate-

gorien: gut, akzeptabel, grenzwertig und schlecht. Des Weiteren erfolgt eine farbliche Markierung der Bereiche. Die Geometriebewertung der Kopfstütze ist im Anhang VIII b in Gesamtheit abgebildet.

Betrachtet man die Kopfbewegung des Probanden B in der Abbildung 36, so ist diese in den Bereich akzeptabel bis grenzwertig einzustufen. Der liegende Proband A wird hingegen in den Abbildungen 35 und 36 vom Rückhaltegurt der Trage zurückgehalten und erfährt keinerlei Bewegungen.

Tabelle 20 listet in der Vergangenheit dokumentierte Belastungen des IFU-Hamburgs auf. In den verschiedenen Kategorien sind Beschleunigungen zu finden, welche in alltäglichen Situationen und durchgeführten Versuchen erfasst worden sind. Gelb markiert ist die einwirkende Belastung beim Fahren des Fahrgeschäfts Autoskooter. Es zeigt die Beschleunigung während einer Auffahrenkollision auf einen weiteren Autoskooter. Die Bewegung des Probanden B in dieser Versuchsreihe kann dem Versuch des Autoskooters nachempfunden werden. Die Belastung des Kopfes beim Auffahrenkollision des Autoskooters liegt bei 5,5 g oder umgerechnet bei ca. $54 \frac{m}{s^2}$. Diese Belastung ist ohne den Eintritt von irreversiblen Verletzungen für einen gesunden Menschen erträglich.

Reversible Folgen einer solchen ruckartigen Bewegung des Sitzenden können die Verletzung der Nackenmuskulatur und der oberen Wirbelsäule sein. Solche Verletzungen können beim Transportieren nicht nur auf einen Patienten, sondern ebenfalls beim mitfahrenden Personal auftreten.

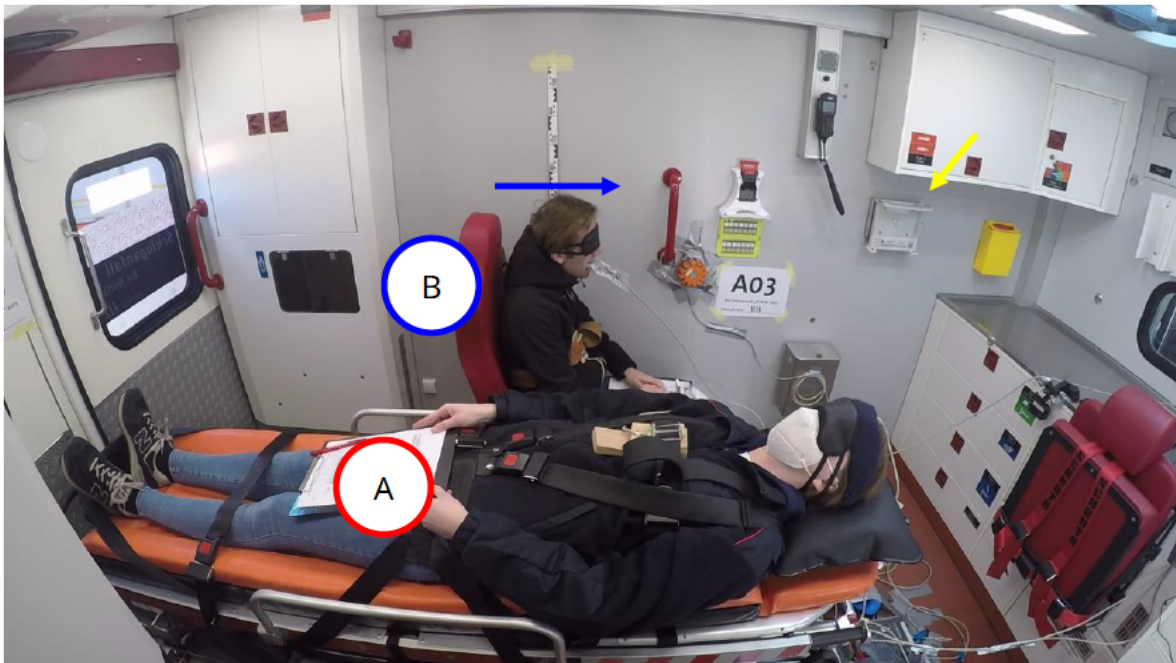


Abbildung 35: Kopfbewegung des Probanden B während des Bremsvorgangs.

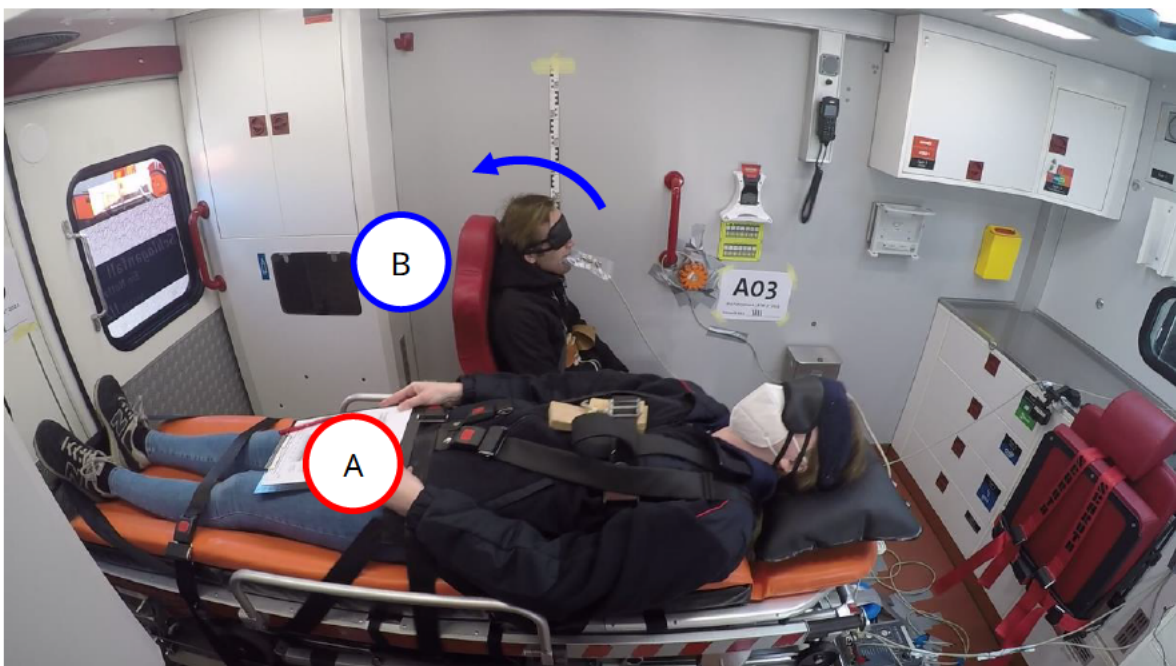


Abbildung 36: Kopfbewegung des Probanden B nach dem Bremsvorgang.

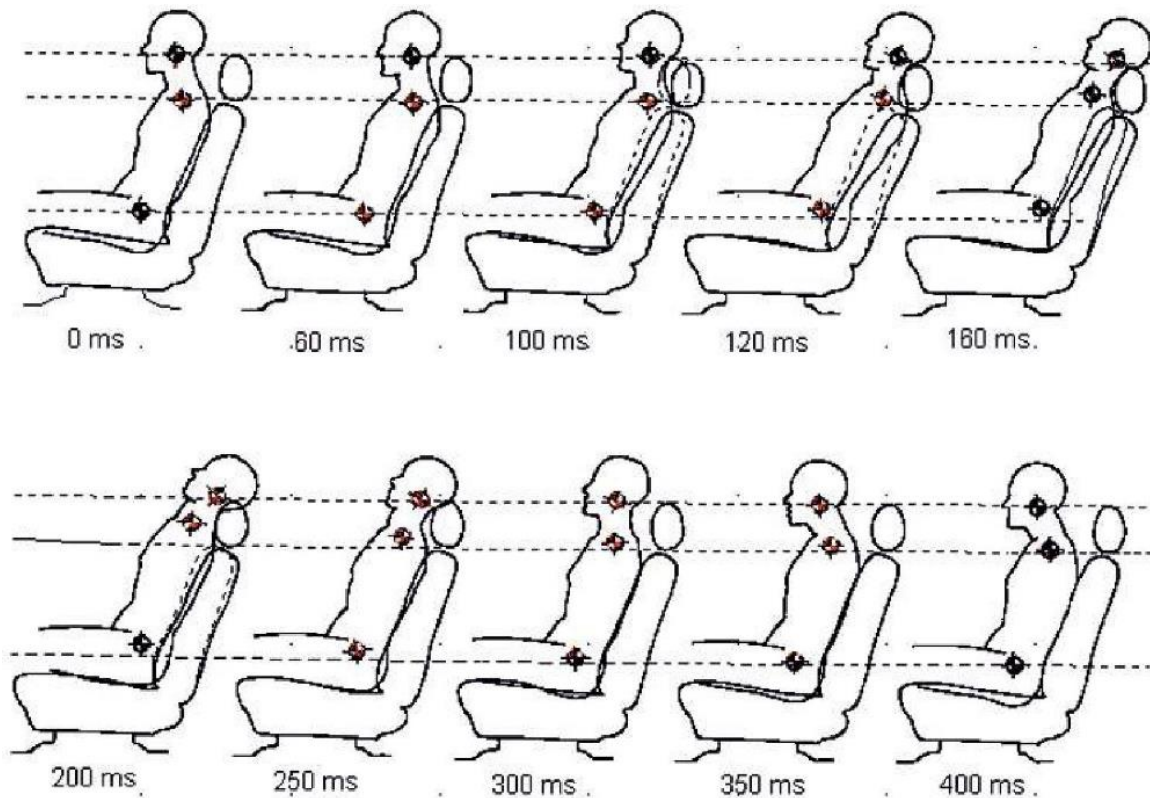


Abbildung 37: Bewegung eines sitzenden Insassens bei einer Geschwindigkeitsänderung.

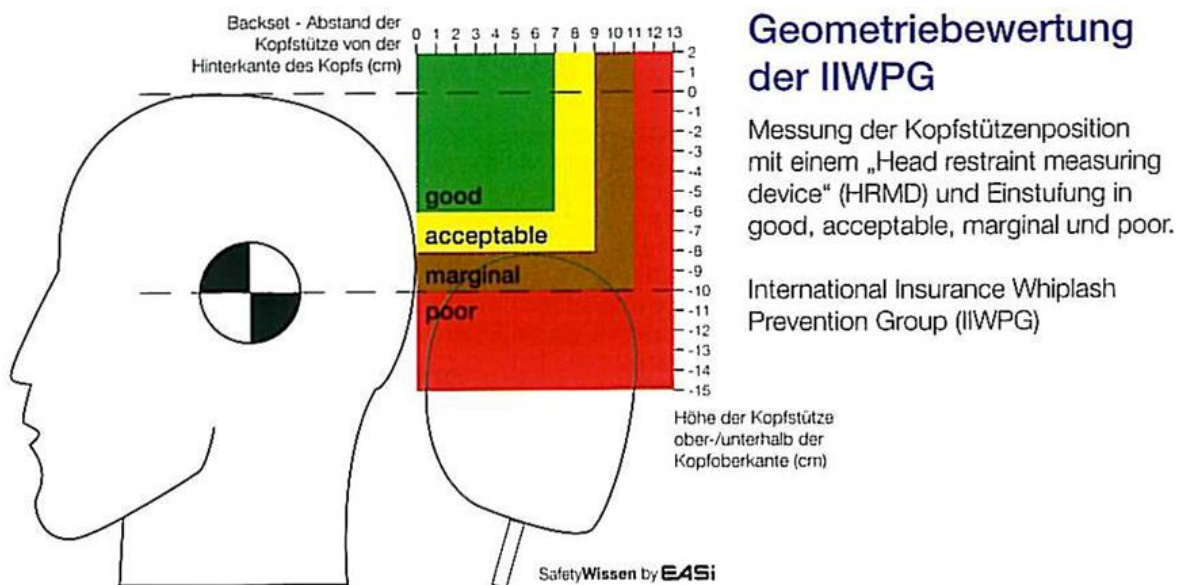


Abbildung 38: Geometriebewertung der Position einer Kopfstütze (Quelle IIWPG).

Tabelle 20: Dokumentierte Belastungen des IFU-Hamburg aus Versuchen in der Vergangenheit (Quelle: IFU-Datenbank).

Gruppe	Versuchsbeschreibung	Hauptkraft- richtung	Beschreibung der Belastung (Werte in g und ms)					
			Brust			Kopf		
			a _{max}	a _{mean}	Δt	a _{max}	a _{mean}	Δt
Crash	Frontal-Crash (Δv=19km/h) im Mercedes	frontal	7,1	3,9	132	5,1	2,7	190
	Auffahrkollision (Δv=13km/h) Mercedes auf BMW	hinten	8,8	4,3	71	12,0	6,8	31
	Auffahrkollision (Δv=9km/h) Renault auf Mazda	hinten	5,2	3,0	136	7,5	5,0	97
	Auffahrkollision (Δv=10km/h) Opel auf Mercedes	hinten	6,7	3,5	79	7,4	3,6	130
	Seitenkollision (Δv=2km/h) Polo gegen BMW	lateral	2,1	1,6	215	1,7	1,3	193
	Seitenkollision Opel gegen VW	lateral	6,0	2,5	150	2,5	1,1	210
Alltag	Fallenlassen auf Couch	hinten	5,0	2,3	400	6,5	2,2	400
	Schubsen von der Seite (Bodycheck)	lateral	6,6	3,3	59	3,5	2,1	84
	Zurückfallen lassen aus sitzender Position	hinten	3,3	2,0	160	6,0	3,9	48
	Schubsen mit Händen gegen den Rücken	hinten	4,0	2,0	127	2,8	1,0	147
	Zurückwerfen in einen Autositz Mazda	hinten	2,7	1,7	60	5,8	2,9	158
	Zurückwerfen in einen Autositz Mercedes	hinten	2,2	1,6	109	6,8	3,2	108
Sport	Sprung beim Downhill mit Mountainbike	frontal	7,0	3,7	91	10,0	4,9	90
	Sprung mit Querfeldeinrad	frontal	3,0	1,4	140	2,0	1,4	100
	Seitensturz von einem stehenden Fahrrad	lateral	8,0	4,1	240	8,0	6,1	110
	Reiten auf einem Pferd im Trab	frontal/ vertikal	9,6	5,0	70	3,7	2,4	160
	heftiger Rempler von der Seite	lateral	6,0	2,8	66	2,1	0,9	140
	Sprung aus 45 cm Höhe von einer Kiste	vertikal	16,0	6,8	46	12,0	4,4	44
	Fallen vorwärts auf eine Matratze	frontal	9,2	4,7	57	4,4	2,5	230
	Fallschirmsprung - Schirm öffnen	frontal	4,2	1,6	200	7,2	2,9	30
	Fallschirmsprung - Landung	vertikal	6,2	2,2	45	7,0	2,8	14
Freizeit	Versuchsschlitten Verkehrswacht	frontal	13,6	6,9	73	6,6	3,1	429
	Achterbahn Desert Race Abschuss	hinten	2,4	1,9	390	2,7	2,0	360
	Achterbahn Desert Race Durchfahren Senke	vertikal	6,0	3,3	2250	5,0	2,9	2000
	Achterbahn Big Loop "corkscrew"	lateral	5,9	2,5	147	5,5	3,0	121
	Achterbahn Big Loop "looping"	vertikal	6,0	2,7	2000	5,0	2,3	2500
	Sky Swing in einem Skipark	frontal	5,1	3,3	580	5,2	3,0	600
	Autoskooter gegen Seitenwand (Bande)	frontal	7,8	4,0	78	3,3	2,2	73
	Autoskooter Seitenwand - Rückprall	hinten	10,0	4,5	45	4,0	2,3	53
	Auffahrkollision im Autoskooter	hinten	8,3	4,0	74	5,5	3,2	92
	Seitenkollision im Autoskooter	lateral	2,3	1,6	68	1,7	1,2	200

Kurvenfahrt mit Gefahrenbremsung

Als zweite besondere Versuchsreihe ist die Kurvenfahrt mit einer Gefahrenbremsung zu nennen. Es handelt sich hierbei um eine Überlagerung zweier Beschleunigungsrichtungen. Die Probanden erfahren, wie bei einer normalen Gefahrenbremsung, eine negative Beschleunigung in Längsrichtung. Des Weiteren wirkt durch das Fahren einer Kurve eine Querschleunigung auf die Probanden. Abbildung 39 zeigt, in der Analyse der Einzelbilder der seitlichen Videoaufnahme, ein Nicken des Kopfes des Probanden B nach vorne. Der Bremsvorgang ist an der schräg hängenden Leitung des Funkgeräts ersichtlich (vgl. gelber Pfeil). Durch Fixieren des Oberkörpers durch den angelegten Rückhaltegurt wird nur der Kopf des sitzenden Probanden nach vorne geneigt. Ein minimales Mitführen des Oberkörpers ist durch das Lösen des Rückens vom Sitz ersichtlich. Abbildung 40 zeigt das Einzelbild der seitlichen Videoaufnahme des Patientenraumes bei Beendigung des Bremsvorgangs. Der Kopf des sitzenden Probanden wird hierbei ruckartig in den Sitz gedrückt (vgl. blauer Pfeil). Durch diese plötzliche Bewegungsänderung wird der Kopf zudem nach hinten überstreckt. Eine Stauchung des Nackenbereichs ist die Folge. Der liegende Proband wird hingegen in beiden Abbildungen vom Rückhaltegurt der Trage zurückgehalten.

Abbildung 41 und 42 bilden Einzelbilder der Videoanalyse in frontaler Aufnahme des Patientenraums ab. Das Nicken des sitzenden Probanden ist auch in dieser Blickrichtung in der Abbildung 41 ersichtlich (vgl. blauer Pfeil). Zudem kann durch den angebrachten Maßstab die Höhe der Trage ermittelt werden. Zu Beginn wurde ein Nullpunkt der Trage bzw. des Tragetisches, auf dem die Trage fixiert ist, ermittelt. Der Nullpunkt im Ruhezustand der Trage wird auf rund 6 cm über der Markierung 24 gesetzt. Es zeigt sich, dass die Trage diesen Bremsvorgang zunächst abfedert. Erst in Abbildung 42 ist ein deutlicher Versatz von rund 9 cm vom gesetzten Nullpunkt ersichtlich. Das hydraulisch gefe-

derte Tragesystem gleicht prinzipiell die Bewegung der Bremsung aus und erhöht die Position des liegenden Probanden (vgl. roter Pfeil). Des Weiteren ist durch den Kopf des liegenden Probanden in beiden Abbildungen ersichtlich, dass dieser in seiner liegenden Position durch den Rückhaltegurt der Trage gehalten wird.

Es kann bei einer solchen ruckartigen Bewegung, wie sie der sitzende Proband erfährt, die Verletzung der Nackenmuskulatur und der oberen Wirbelsäule sein. Des Weiteren können zudem Verletzungen im Kopfbereich auftreten. Hierbei spielt auch die Höhe der Kopfstütze der relativ zum Kopf der sitzenden Person eine wichtige Rolle.

Identisch wie im Versuch der Gefahrenbremsung erfährt auch in diesem Fahrversuch der Proband B Bewegungen einer Geschwindigkeitsänderung. Dabei kann die Geometrie der Position der Kopfstütze des Probanden B ebenfalls bewertet werden. Abbildung 38 zeigt die Geometriebewertung der Position der Kopfstütze nach IIWPG. Je höher die Kopfstütze eingestellt ist, desto niedriger fällt die Streckung des Kopfes bei einem solchen Rückschlag aus. Eine zu niedrig positionierte Kopfstütze bewirkt eine größere Streckung des Nackens bzw. der oberen Wirbelsäule.

Die Folgen einer solchen ruckartigen Bewegung können sowohl auf die sitzenden Patienten als auch auf das mitfahrende Bordpersonal übertragen werden, wobei die genaue Sitzposition zu berücksichtigen ist.

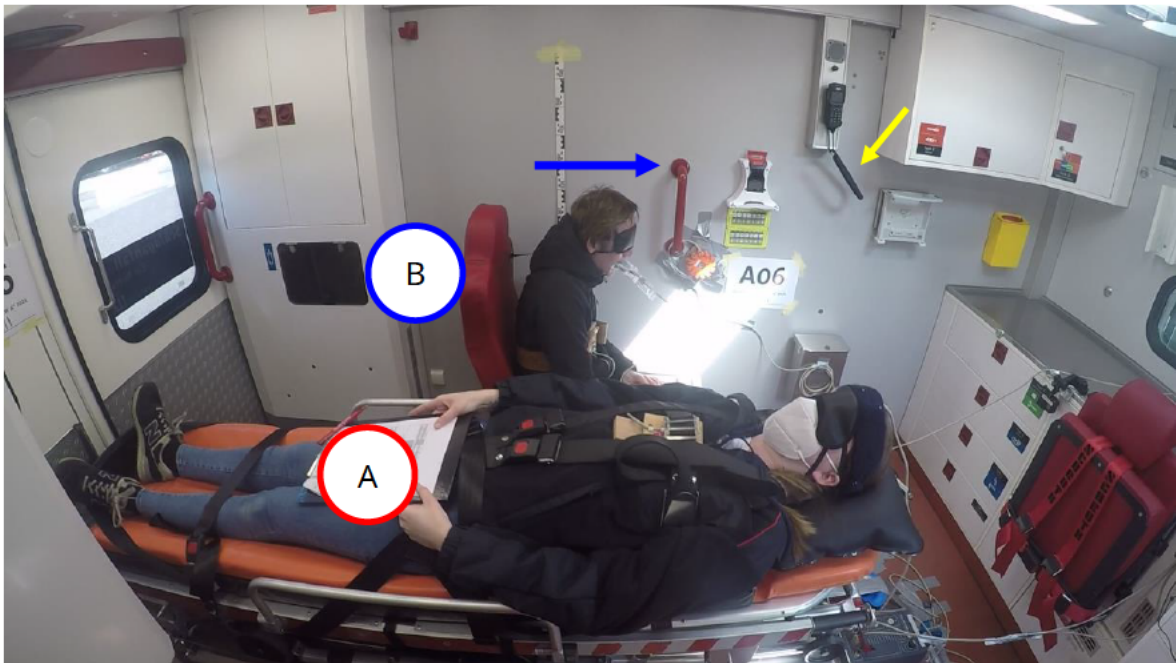


Abbildung 39: Einzelbild der Videoanalyse – ein Nicken des Kopfes wird durch die Bremsung hervorgerufen.

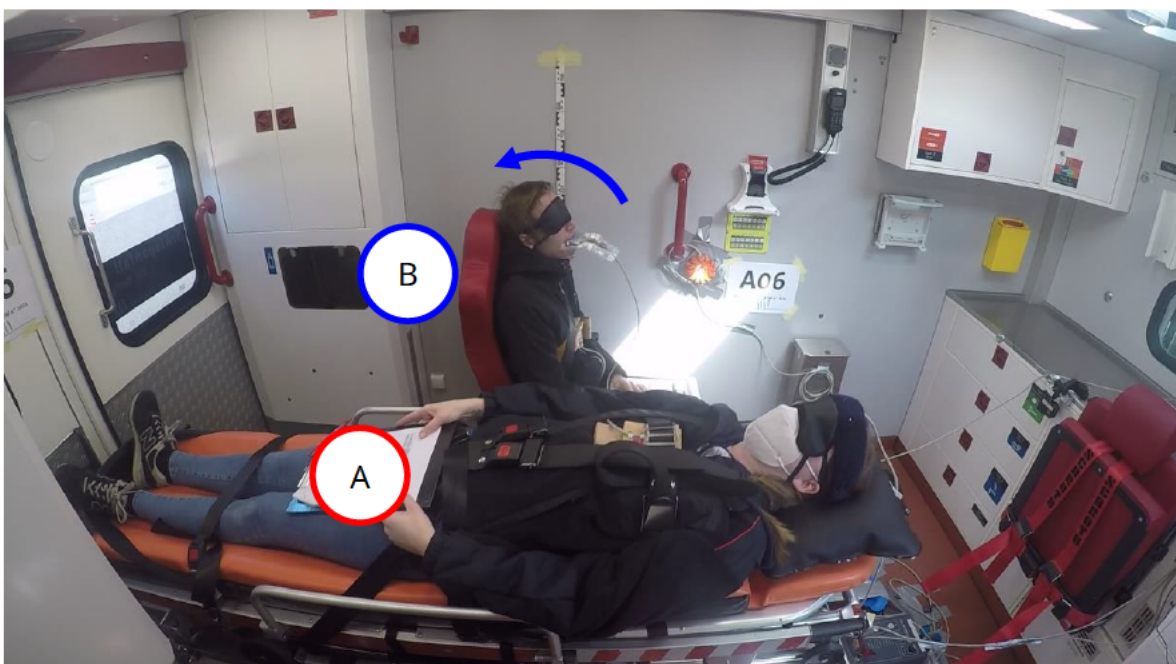


Abbildung 40: Einzelbild der Videoanalyse – Nach der Bremsung wird der Kopf des sitzenden Probanden überstreckt.

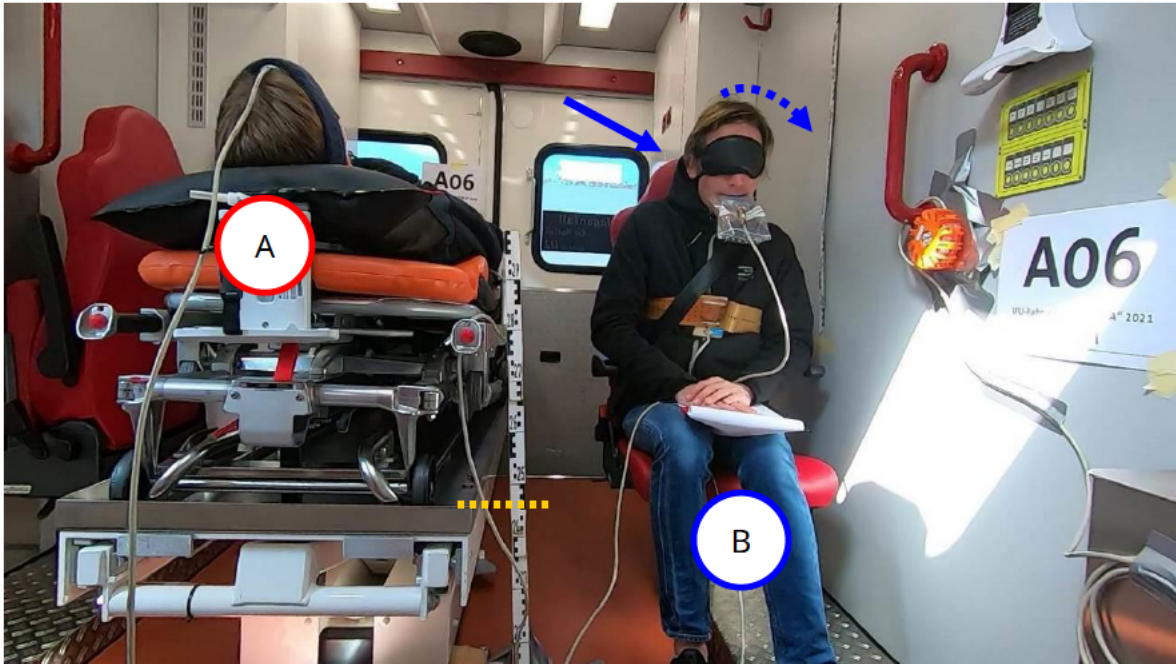


Abbildung 41: Kopfbewegung des Probanden B während des Bremsvorgangs.

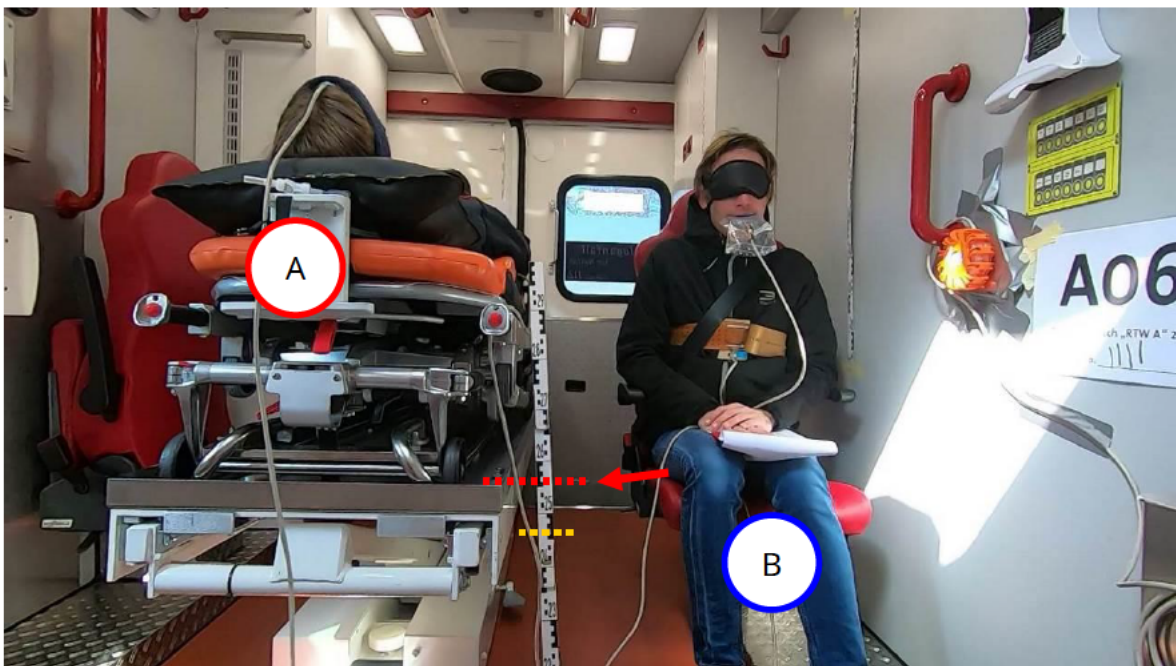


Abbildung 42: Einzelbild der Videoanalyse der Versuchsreihe A04 – der Streckungspunkt des Trageti-sches liegt rund 9 cm über dem Nullpunkt (vgl. roter Pfeil).

Überfahrt einer Bremsschwelle

In diesem Abschnitt soll insbesondere die letzte Versuchsreihe des Überfahrens einer Bremsschwelle weiter diskutiert werden, da hierbei unerwartet massive Insassenbelastungen aufgetreten sind. Insbesondere der liegende Proband erfährt in allen drei Versuchen deutliche Belastungen.

Die hohen Werte der Beschleunigung in diesem Versuch zeigen, dass bereits kleine Änderungen der Fahrbahn eine hohe Insassenbelastung erzielen können. Des Weiteren fällt durch die Aussage aller Probanden auf, dass sich die taktile Wahrnehmung von Vorder- zu Hinterachse deutlich unterscheidet.

Die Abbildungen 44 und 45 zeigen die Einzelbildauswertung der Seitenansicht. Nach dem Überfahren der Bremsschwelle mit der Hinterachse wird das Fahrzeug ruckartig eingefedert. Probanden A wird durch den Versuch des Bewegungsausgleichs der Trage in Hochrichtung beschleunigt. Im maximalen Streckungspunkt der Trage löst sich der liegende Proband völlig unerwartet temporär, wie in Abbildung 44 ersichtlich, von der Trage vollständig und wird nur noch durch den Rückhaltegurt von einer weiteren Bewegung in Hochrichtung zurückgehalten (vgl. roter Pfeil). Des Weiteren zeigt sich, dass der Kopf des liegenden Probanden ebenfalls eine Nickbewegung durchläuft (vgl. gelber Pfeil). Diese Bewegung spiegelt sich in den Ergebnissen der Auswertung in Längsrichtung wider.

Das Zurückfallen des liegenden Probanden ist in Abbildung 45 dokumentiert. Der gelbe Pfeil zeigt ein weiteres Senken des Kopfes und eine damit verbundene Streckung des Nackens. In diesem Einzelbild der Videoaufnahme federt das Tragesystem bis zu ihrem minimalen Stauchungspunkt ein.

In den Abbildungen 46 und 47 ist die frontale Ansicht auf beide Probanden im Patientenraum dargestellt. Durch den angebrachten Maßstab ist eine Höhenanalyse der Trage möglich. Der maximale Streckungspunkt des Trageti-sches liegt, wie in Abbildung 46 ersichtlich, bei einer unerwarteten Höhe

von 24 cm. Der Nullpunkt ist mit einem gelben Pfeil und die maximale Elongation mit einem roten Pfeil markiert. Hinzu kommt die weitere minimale Bewegung in Hochrichtung der Trage, welche durch die Lagerung jedoch nicht erfasst werden konnte. Abbildung 47 zeigt den maximalen Stauchungspunkt der Trage bzw. des Tragestisches an dem die Trage befestigt ist. Die maximale Höhe des Eintauchens der Trage vom Nullpunkt liegt bei rund 9 cm. Addiert man die beiden maximalen Auslenkungen vom gesetzten Nullpunkt, so ergibt sich eine unerwartet stark ausgeprägte Auslenkung der Trage in Hochrichtung von ca. 33 cm, die der liegende Proband zurücklegt.

Betrachtet man die Tabelle 21 der Grenzbelastung näher, so ist eine maximale Beschleunigung des gesamten Körpers ist mit 40 g angegeben. Dies entspricht einer Beschleunigung von ca. $392,4 \frac{m}{s^2}$. Der rote Pfeil markiert diesen Wert in der Tabelle. Diese extreme Belastung kann im Einzelfall, je nach körperlicher Konstitution der liegenden Person, zu irreversiblen Verletzungen oder im Fall von stark verletzten Patienten sogar zum Tod führen (vgl. Burg & Moser 2017: 561). Die Grenzbelastung des menschlichen Körpers ist im Anhang VIII c in Gesamtheit abgebildet.

Gemessen wurden diese maximalen Belastungswerte durch Tier- und Leichenversuche. Des Weiteren fließen Erkenntnisse aus den Rekonstruktionen von Straßenverkehrsunfällen und freiwilligen Sturzversuchen mit in die Analyse der maximalen Belastung mit ein.

Ein Resultat von Leichenversuche ist die sogenannte *Wayne State Tolerance Curve*, welche im Diagramm 109 dargestellt ist. Die Kurve im Diagramm 109 beschreibt den Zusammenhang der einwirkenden Kopfbeschleunigung mit dessen einwirkenden Dauer (vgl. Schmitt et al 2014: 69). Der Kurvenverlauf zeigt den jeweiligen Maximalwert der Kopfbeschleunigung mit dessen Wirkungsdauer, bis eine irreversible Verletzung oder der Tod eintritt. Exemplarisch kann ein gesunder Mensch eine Kopfbeschleunigung von 60 g oder $588,6$

$\frac{m}{s^2}$ über eine Wirkungsdauer von 10 ms aushalten, bevor er irreversible Verletzungen davonträgt. In den durchgeführten Versuchsreihen wurde beim letzten Versuch ein maximaler Belastungswert von ca. $91 \frac{m}{s^2}$ erreicht. Beim Überfahren einer Bremsschwelle lag die Belastung des liegenden Probanden A bei diesen ca. $91 \frac{m}{s^2}$ oder umgerechnet bei 9,3 g. Die grün gepunktete Linie zeigt visuell die Eingrenzung dieses Belastungswertes des Versuchs dieser Arbeit in der WSTC.

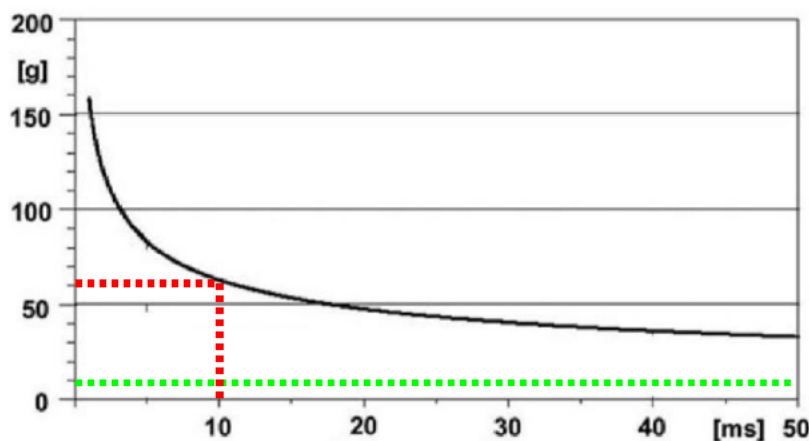


Diagramm 109: Darstellung der WSTC (Quelle: Schmitt et al 2014: 70)

Bei einer solchen erhöhten und plötzlichen Bewegung und dem zusätzlichen Lösen von der Trage, wie sie der liegende Proband A im letzten Versuch erfährt, kann es möglicherweise zu einer ungünstigen Bewegung des liegenden Patienten kommen. Es können dadurch schwerwiegende Verletzungen im Kopfbereich auftreten. Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass insbesondere die Konstruktion und die Ansprechzeit des Tragesystems herstellereits zu überdenken sind, um mögliche abrupte und damit ungünstige Bewegungen eines liegenden Patienten in Hochrichtung zu minimieren.

Tabelle 21: Übersicht der Grenzbelastungen des menschlichen Körpers (Quelle: Burg & Moser 2017: 561)

Körperteil	Mechanische Größe	Belastungsgrenzen
Ganzer Körper	a_x max a_x mittel	40 bis 80 g (3 ms) ← 40 bis 45 g (160 bis 220 ms)
Kopf/Gehirn	a_{res} $\ddot{\alpha}$ GAMBIT	bis 300 g (sehr kurz) 80 g (> 3 ms) 60 g (> 45 ms) 1.800 bis 7.500 rad/s ² 7.500 bis 8.500 rad/s ² bis 25.000 rad/s ² 1,0
Knöcherner Schädel	a_x max, a_y max	80 bis 300 g je nach Größe der Stoßfläche
Stirn	a_x max F_x	120 bis 200 g 4.000 bis 6.000 N
Halswirbelsäule	a_x max Thorax a_y max Thorax α_{max} Flexion α_{max} Extension M_b Flexion M_b Extension M_b F_{Scher} F_{Zug} F_{Druck}	30 bis 40 g 15 bis 18 g 80° bis 100° 80° bis 90° 190 Nm 57 Nm 370 Nm 1.800 bis 2.600 N 1.200 bis 2.600 N 1.100 bis 2.600 N 3.600 bis 5.700
Brustkorb	a_x max F_x S_x	40 bis 60 g (>3 ms) 60 g (< 3 ms) 4.000 bis 8.000 N 50 bis 76 mm

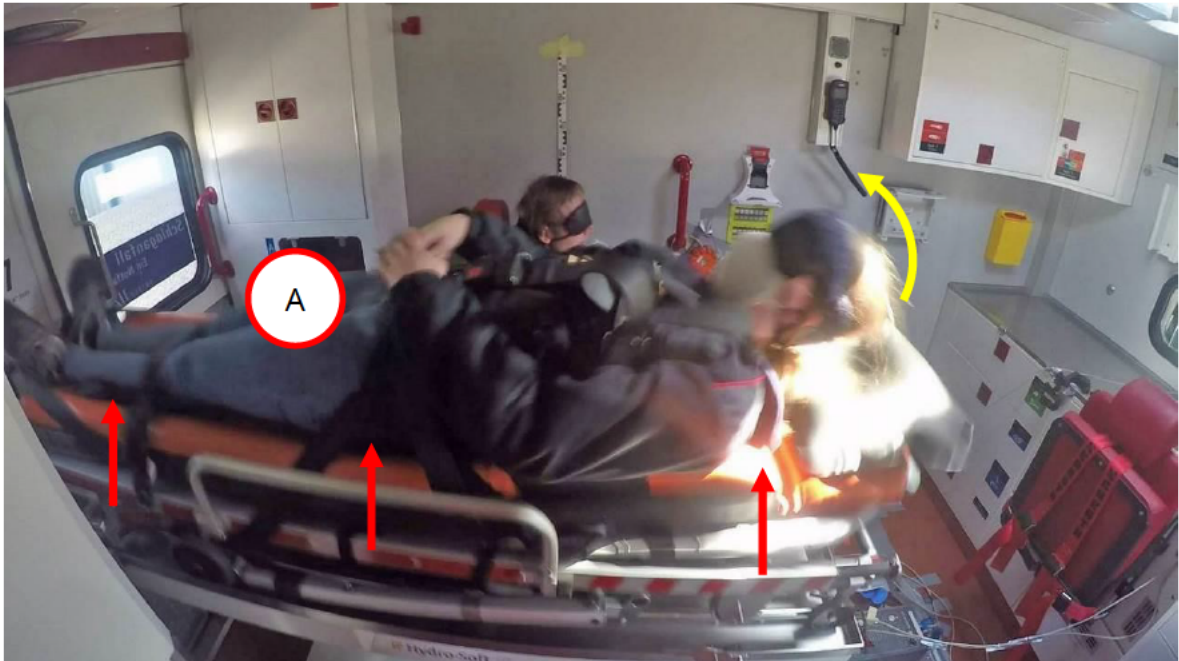


Abbildung 43: Einzelbild der Videoanalyse der Versuchsreihe A05 – in der Seitenansicht zeigt sich das Lösen des Probanden A von der Trage im maximalen Streckungspunkt der Trage.



Abbildung 44: Einzelbild der Videoanalyse der Versuchsreihe A05 – in der Seitenansicht ist die maximale Kopfbewegung des Probanden A ersichtlich.

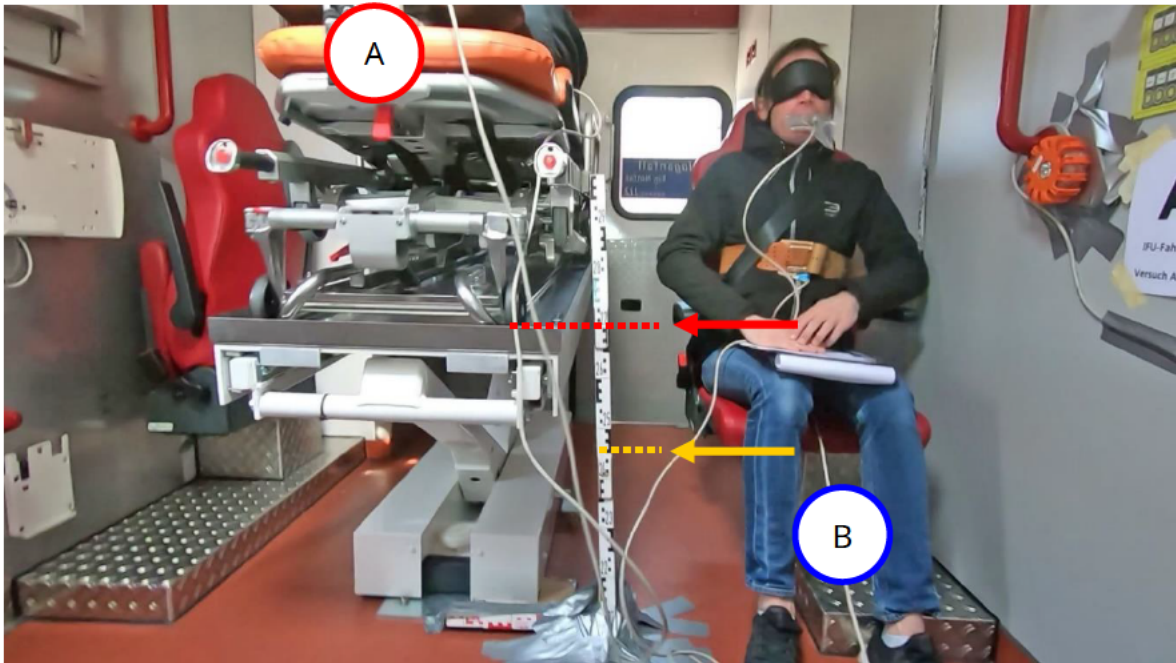


Abbildung 45: Einzelbild der Videoanalyse der Versuchsreihe A05 – der maximale Streckungspunkt des Tragetisches liegt rund 24 cm über dem Nullpunkt (vgl. roter Pfeil).

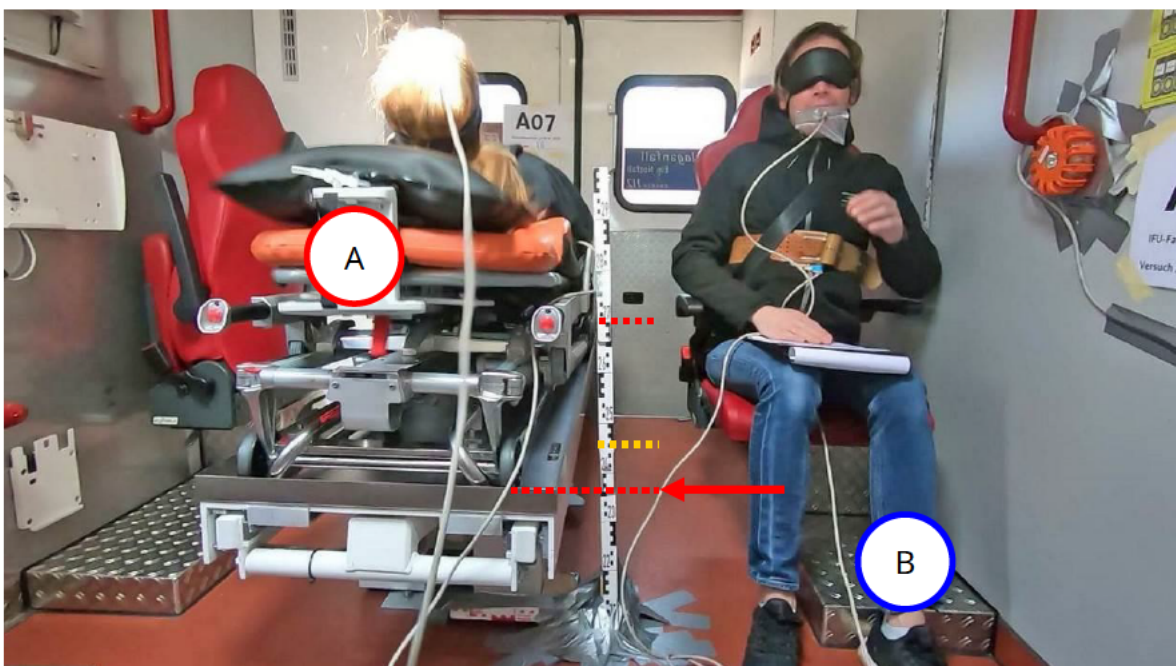


Abbildung 46: Einzelbild der Videoanalyse der Versuchsreihe A05 – der maximale Eintauchpunkt des Tragetisches liegt rund 9 cm unter dem Nullpunkt (vgl. roter Pfeil).

6. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich nach Auswertung der Versuchsreihen feststellen, dass der Schutz aller Probanden jederzeit gewährleistet wurde. Es zeigen sich dennoch deutliche Unterschiede in den Belastungen in Längs-, Quer- oder Hochrichtung. Insbesondere ist die Versuchsreihe des Überfahrens der Bremsschwelle hervorzuheben. Hierbei wurde trotz geringer Fahrgeschwindigkeiten die höchste Insassenbelastung beobachtet.

Für eine weitere Analyse und Optimierung des hydraulisch gefederten Tragesystems sind weitere, detaillierte Versuchsfahrten nötig. Daher kann diese Arbeit keine endgültige Lösung der aufgezeigten Problematik des Tragesystems finden. Jedoch können Verhaltensweisen und mögliche Verordnungen entwickelt werden.

So lässt sich über alle Versuchsreihen feststellen, dass ein großer Faktor der Insassenbelastung die gefahrene Geschwindigkeit des Fahrzeugs ist. Demnach sollte der Fahrer eines Rettungswagens auch im Notfall bei einem Transport eines Patienten möglichst umsichtig und nur so zügig wie nötig durch den Stadtverkehr fahren. Insbesondere bei Überfahrten einer Bremsschwelle oder anderen baulichen Erhebungen der Straße sollte das Fahrzeug auf eine minimale Geschwindigkeit reduziert werden, um Insassenbelastungen in Hochrichtung zu vermeiden. Der Schutz des Patienten kann hierdurch weiter gefördert werden.

Letztendlich kann durch diese durchgeführten Versuche die Belastung der Probanden auch auf das Personal des Rettungsdienstes übertragen werden. Setzt man die Einführung von verstellbaren Kopfstützen um, so kann erfolg-

reich einer ungünstigen Bewegung des Kopfes sowie des Nackens entgegen-
gewirkt werden.

Um dieser Untersuchung weiter nachzugehen, sollten in Zukunft weitere Ver-
suchsfahrten mit messtechnisch instrumentierten Probanden untersucht
werden.

VI. Literaturverzeichnis

Feuerwehr Hamburg (2021): *Jahresbericht 2020*, 1. Auflage, Hamburg, Deutschland.

Burg, H. / Moser, A. (2017): *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, 3. Aufl., Wiesbaden, Deutschland: Springer Vieweg.

Schmidtt et. al. (2014): *Trauma-Biomechanik*, 2 Aufl., Berlin, Deutschland: Springer Vieweg

Roth, K (2018): *Struktur der medizinischen Notfallversorgung in Deutschland*, 1. Aufl., Stuttgart, Deutschland: W. Kohlhammer GmbH.

Gesundheitsberichterstattung des Bundes (2022): *Einsatzaufkommen im öffentlichen Rettungsdienst in Prozent. Gliederungsmerkmale: Jahre, Deutschland, Einsatzart, Rettungsmitteltyp*, [online] https://www.gbe-bund.de/gbe/pkg_olap_tables.prc_set_svg?p_uid=gast&p_aid=53993867&p_sprache=D&p_help=2&p_indnr=461&p_indsp=&p_ansnr=56362437&p_version=3&p_svg=2#SOURCES [aufgerufen am 04.06.2022 um 15:30 Uhr]

Deutscher Verkehrssicherheitsrat DVR (2020): *Einsatzfahrzeuge-Sicherheitsprogramm*, [online] <https://www.dvr.de/praevention/trainings/trainingsangebote/einsatzfahrzeuge> [aufgerufen am 12.07.2022 um 12:45 Uhr]

Bundesministerium der Justiz (2013): *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) § 35 Sonderrechte*, [online] https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/_35.html [aufgerufen am 22.07.2022 um 00:45 Uhr]

VII. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommenen Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, den 31.07.2022



Fabian Sengl

VIII. Anhang

Für eine vereinfachte Darstellung und für ein besseres Verständnis werden folgend wichtige Dokumente dieser Arbeit angehängt.

Es handelt sich hierbei um folgende Schriftstücke:

- Fahrzeugschein des zur Verfügung gestellten Rettungswagens
- Position der Kopfstütze – Geometriebewertung nach IIWPG
- Grenzbelastung des menschlichen Körpers

a. Fahrzeugschein des zur Verfügung gestellten Rettungswagens

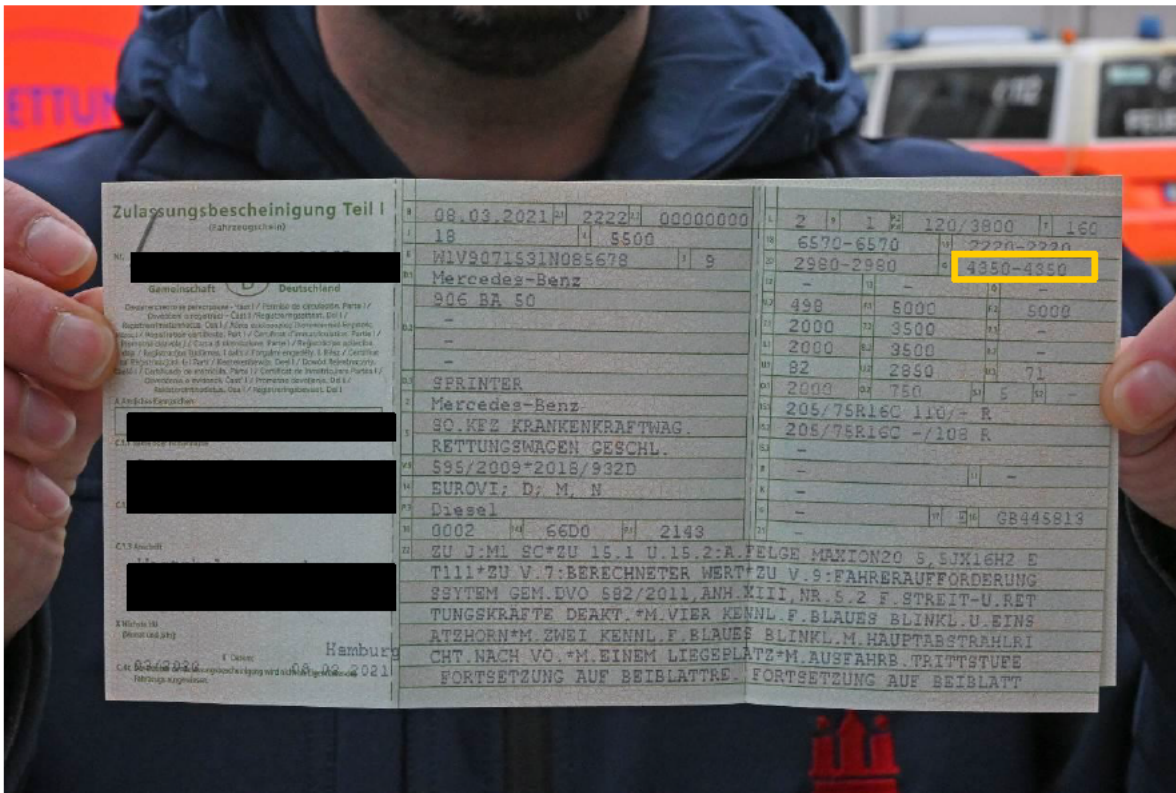
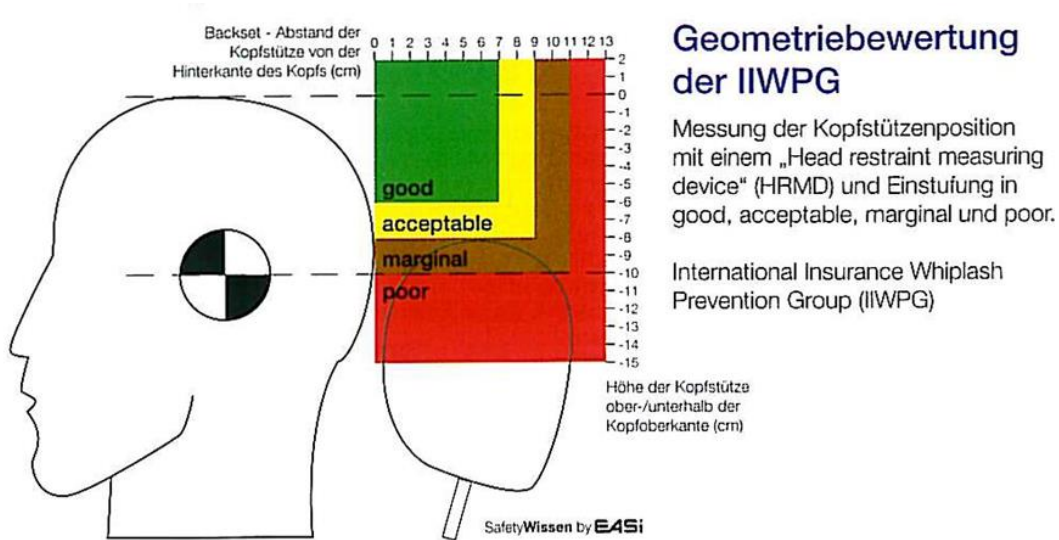


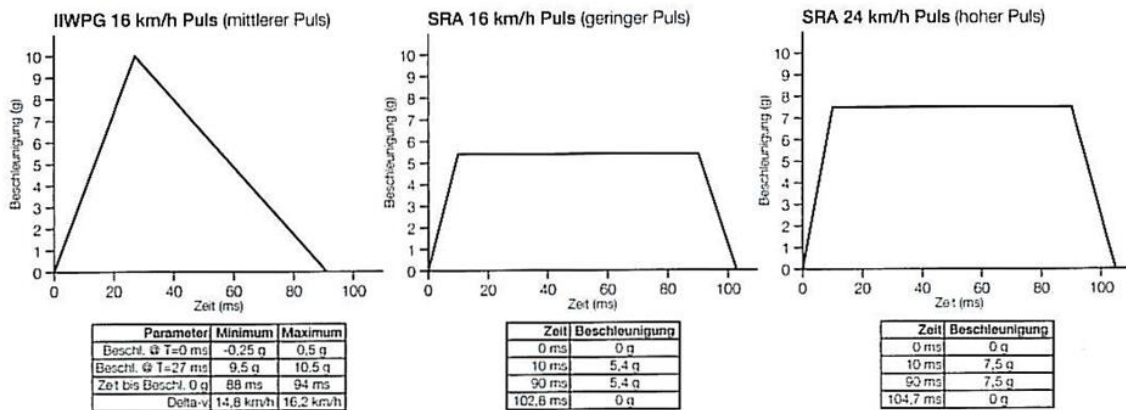
Abbildung 47: Fahrzeugschein des Versuchs-RTW – die zulässige Gesamtmasse des Fahrzeugs beträgt rund 4 350 kg (vgl. gelbe Markierung).

b. Position der Kopfstütze - Geometriebewertung

Kombiniertes Rating zur Erfassung des Verletzungsrisikos beim Kopfanprall gegen die Kopfstütze



Crashpulse für Schlittentests beim Heckaufprall



Vorgeschlagener Euro NCAP Heckaufprall Test (Stand 10/2006)

Die Sitze werden anhand der Geometrie und in dynamischen Tests bewertet.

Dynamische Bewertung

- Schlittentests mit individuellem Sitz ohne Rohkarosse
- 3 generische Pulse (geringer, mittlerer und hoher Crash-Puls) werden getestet
- Verwendung des BioRID II (letzter Baustand)
- Kriterien für die dynamische Bewertung
 - NIC
 - N_{km}
 - Head rebound velocity
 - F_x upper neck
 - F_z upper neck
 - T1 Beschleunigung
 - Zeit bis zum Kontakt Kopf mit der Kopfstütze

$$NIC = a_{rel} \cdot 0,2 m + v_{rel}^2 \quad [m^2/s^2]$$

$$a_{rel} = a_{T1} - a_{C1} \quad [m/s^2]$$

$$v_{rel} = \int a_{rel} \quad [m/s]$$

a_{C1} : Beschleunigung in x-Richtung des ersten Rückgratwirbels

a_{T1} : Beschleunigung in x-Richtung des ersten Brustkorbwirbels in

(Quelle: IIWPG)

c. Grenzbelastungen des menschlichen Körpers

Körperteil	Mechanische Größe	Belastungsgrenzen
Ganzer Körper	a_x max a_x mittel	40 bis 80 g (3 ms) 40 bis 45 g (160 bis 220 ms)
Kopf/Gehirn	a_{res} $\ddot{\alpha}$ GAMBIT	bis 300 g (sehr kurz) 80 g (> 3 ms) 60 g (> 45 ms) 1.800 bis 7.500 rad/s ² 7.500 bis 8.500 rad/s ² bis 25.000 rad/s ² 1,0
Knöcherner Schädel	a_x max, a_y max	80 bis 300 g je nach Größe der Stoßfläche
Stirn	a_x max F_x	120 bis 200 g 4.000 bis 6.000 N
Halswirbelsäule	a_x max Thorax a_y max Thorax α_{max} Flexion α_{max} Extension M_b Flexion M_b Extension M_b F_{Scher} F_{Zug} F_{Druck}	30 bis 40 g 15 bis 18 g 80° bis 100° 80° bis 90° 190 Nm 57 Nm 370 Nm 1.800 bis 2.600 N 1.200 bis 2.600 N 1.100 bis 2.600 N 3.600 bis 5.700
Brustkorb	a_x max F_x s_x	40 bis 60 g (>3 ms) 60 g (< 3 ms) 4.000 bis 8.000 N 50 bis 76 mm
Becken	a_x max a_{res} max	50 bis 80 g (Becken) 80 g, falls $\alpha \leq 20^\circ$
Oberschenkel	F_x	6.400 bis 12.500 N 9.070 N (0 ms) 7.560 N (>10 ms)
Knieverschiebung	s	15 mm
Schienbein	F_x M_x	2.500 bis 5.000 N 8.000 N 120 bis 170 Nm 225 Nm
Fußkontaktkraft	F	10 kN

Quelle: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, Burg und Moser, 3. Auflage, 2017, S.561

