
Untersuchungen zur Anwendbarkeit automatischer Notbremssysteme für Motorräder

Vom Fachbereich Maschinenbau an der
Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Nora Leona Merkel, M.Sc.
aus Frankfurt am Main

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Mitberichterstatter: Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Tag der Einreichung: 25.01.2022

Tag der mündlichen Prüfung: 15.03.2022

Darmstadt 2022

D 17

Merkel, Nora Leona: Untersuchungen zur Anwendbarkeit automatischer Notbremssysteme für
Motorräder

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2022

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-210961

URI: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/21096>

Tag der mündlichen Prüfung: 15.03.2022

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt. Die Inhalte der Dissertation resultieren aus einem Forschungsprojekt mit der Bundesanstalt für Straßenwesen und aus dem Projekt PIONEERS innerhalb des EU-Rahmenförderprogramms Horizon 2020.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, der mich zum Ende meines Studiums ermutigte, den Weg der Promotion einzuschlagen. Die kritischen und stets konstruktiven Diskussionen, das große Vertrauen und vor allem auch die gewährten Freiräume haben mich wachsen lassen und nicht nur maßgeblich zur Entstehung dieser Arbeit, sondern auch zu meiner persönlichen Entwicklung beigetragen.

Bei Herrn Prof. Dr. phil. Klaus Bengler, Leiter des Lehrstuhls für Ergonomie der Technischen Universität München, möchte ich mich herzlich für die Übernahme des Korreferats und für die Möglichkeit zur Präsentation und Diskussion meiner Forschungsarbeit an seinem Lehrstuhl bedanken.

Außerdem bedanke ich mich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachgebiets Fahrzeugtechnik für einen einzigartigen kollegialen Umgang. Ich danke den Kollegen, die jederzeit ein offenes Ohr hatten, mit denen ich unzählige konstruktive Diskussionen führen durfte und auf deren Unterstützung ich zählen konnte, wann immer sie nötig war. Die angenehme Arbeitsatmosphäre, die Qualität des fachlichen Austauschs und der Zusammenhalt am Fachgebiet werden mir stets in positiver Erinnerung bleiben. Ich wünsche dem Fachgebiet, dass dieses herausragende Miteinander noch lange erhalten bleibt, sodass auch zukünftig viele Doktorandinnen und Doktoranden daran teilhaben und davon profitieren können. Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus Sekretariat und Werkstatt danke ich für den unermüdlichen Einsatz und die jederzeit wohlwollende Unterstützung.

Darüber hinaus danke ich den zahlreichen Studentinnen und Studenten, die im Rahmen von Abschlussarbeiten und als wissenschaftliche Hilfskräfte mit viel Interesse und Engagement meine Tätigkeiten unterstützt haben.

Ein besonders großer Dank gilt nicht zuletzt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben, jederzeit hinter meinen Entscheidungen standen und mich in jeder Lebenslage unterstützt haben. Ihr Rückhalt hat maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Meinem Partner Raphael danke ich für die mentale Unterstützung, für die vielen fachlichen Diskussionen und für den Rückhalt, insbesondere in den letzten Monaten der Entstehung dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungen	V
Formelzeichen und Indizes	VI
Abbildungen und Tabellen	VIII
Kurzzusammenfassung	XII
Summary	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung.....	3
1.2 Vorgehen	4
2 Grundlagen und Stand der Forschung	6
2.1 AEB im Pkw-Bereich	6
2.1.1 Wirkweise.....	7
2.1.2 Evaluation von AEB.....	9
2.2 AEB für Motorräder	14
2.2.1 Motorradspezifische Herausforderungen	14
2.2.2 Potential.....	20
2.2.3 Fahrerreaktion	23
2.2.4 Technische Umsetzung.....	26
2.2.5 Patente	27
3 Forschungsbedarf und Zielsetzung	29
3.1 Abgeleiteter Forschungsbedarf.....	29
3.2 Konkretisierung der Zielsetzung.....	30
4 Untersuchungsmethodik	32
4.1 Fahrerbereitschaft und Transition	32
4.1.1 Transition.....	32
4.1.2 Zielkonflikt.....	35
4.2 Abgeleitetes Vorgehen	36
4.2.1 Kontrollierbarkeitsgrenzen – Expertenstudie	38
4.2.2 Potentialermittlung – Probandenstudie 1	40
4.2.3 Maße zur Beschreibung der Fahrerreaktion – Probandenstudie 2	47
4.2.4 Zusammenfassung des Vorgehens	48

4.3	Sicherheitsvorkehrungen	49
4.4	Untersuchungswerkzeuge.....	50
4.4.1	Messfahrzeug	50
4.4.2	EVITA	56
5	Studiendurchführung und Auswertung.....	58
5.1	Kontrollierbarkeitsgrenzen – Expertenstudie	58
5.1.1	Kontrollierbarkeit für Normalfahrer	58
5.1.2	Parametrierung der Teilbremsprofile	66
5.1.3	Geschwindigkeitsvariation.....	66
5.1.4	Kurvenfahrt	69
5.2	Potentialermittlung – Probandenstudie 1	70
5.2.1	Messdatenauswertung	72
5.2.2	Subjektivbewertung	81
5.2.3	Zwischenfazit Probandenstudie 1 – Potentialermittlung	82
5.3	Maße zur Beschreibung der Fahrerreaktion – Probandenstudie 2	83
5.3.1	Messung der Oberkörperbewegung	83
5.3.2	Vorversuch	84
5.3.3	Hauptversuch	89
5.3.4	Kontrollierbarkeitsbewertung	96
5.3.5	Zwischenfazit Probandenstudie 2 – Maße zur Beschreibung der Fahrerreaktion	97
6	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	99
6.1	Belastbarkeit der Ergebnisse	101
7	Fazit und Ausblick	102
7.1	Ableitung offener Fragen	103
A	Anhang.....	105
A.1	Untersuchungswerkzeuge.....	105
A.1.1	Bremsaktor.....	105
A.1.2	Kupplungsaktor.....	108
A.1.3	Messung Fahrerreaktion	110
A.2	Fragebogen	115
A.3	Studienergebnisse.....	120
A.3.1	Expertenstudie	120
A.3.2	Probandenstudie 1	126
A.3.3	Probandenstudie 2.....	134
A.4	Ethik	136
A.4.1	Freigabe Probandenstudie 1	136
A.5	Freigabe Probandenstudie 2	139

Literaturverzeichnis.....	140
Eigene Veröffentlichungen	147
Betreute studentische Arbeiten	148

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
<i>ABS</i>	Anti-Blockier-System
<i>ACC</i>	Adaptive Cruise Control, Abstandsregeltempomat
<i>AEB</i>	Autonomous Emergency Braking, Automatisches Notbremssystem
<i>ARAS</i>	Advanced Rider Assistance Systems
<i>CBS</i>	Combined Braking/Brake System
<i>DMS</i>	Dehnmessstreifen
<i>EBS</i>	Enhanced Braking System
<i>ESC</i>	Electronic Stability Control, Elektronische Stabilitätskontrolle
<i>Euro NCAP</i>	European New Car Assessment Programme, Europäisches Neuwagen-Bewertungs-Programm
<i>FAS</i>	Fahrerassistenzsystem
<i>FOT</i>	Field Operational Test
<i>FVCA</i>	Forward Vehicle Collision Avoidance, Frontkollisionsverhinderung
<i>FVCC</i>	Forward Vehicle Collision Conditioning, Frontkollisionsvorbereitung
<i>FVCM</i>	Forward Vehicle Collision Mitigation, Frontkollisionsschwereminderung
<i>FVCW</i>	Forward Vehicle Collision Warning, Frontkollisionswarnung
<i>FVCX</i>	Forward Vehicle Collision [Assistance Systems], Frontkollisionsassistenzsysteme
<i>GDV</i>	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
<i>IMMU</i>	Inertial Magnetic Measurement Unit, Inertial-magnetische Messeinheit
<i>IMU</i>	Inertial Measurement Unit, Inertialmesseinheit
<i>LWS</i>	Lendenwirbelsäule
<i>MAEB</i>	Automatische Notbremssysteme für Motorräder
<i>NBA</i>	Notbremsassistent
<i>PBA</i>	Predictive Brake Assist
<i>PISa</i>	Powered Two-wheelers Integrated Safety
<i>TTC</i>	Time-to-Collision
<i>UDV</i>	Unfallforschung der Versicherer

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	m/s ²	Beschleunigung
D	m/s ²	Verzögerung
F	N	Kraft
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
k	-	Kennwert
m	kg	Masse
p	bar	Druck
s	-	Schlupf
t	s	Zeit
v	m/s	Geschwindigkeit
Δ	-	Differenz
ϑ	°	Nickwinkel
μ	-	Reibwert
σ	°	Abstützwinkel
τ	s	Zeitverzug
φ	°	Rollwinkel

Index	Beschreibung
Acc	Beschleunigungssensor (Accelerometer)
aim	Ziel-/Soll-
Block	Blockprofil
F	Fliehkraft
Fuß	Fußbremshebel
Hand	Handbremshebel
G	Gewichtskraft
ges	gesamt
gleit	Gleitreibwert
H	Lenker (Handlebar)
HBZ	Hauptbremszylinder
Kpl	Kupplung
max	maximal
pot	potentiell, theoretisch möglich
R	Fahrer (Rider)
Rh	am Fahrerkopf (Rider Head)
Rl	auf Höhe der Lendenwirbelsäule des Fahrers (Rider Lumbar Spine Level)
Rs	auf Schulterhöhe des Fahrers (Rider Shoulder Level)
Ref	Referenz
res	resultierend
start	Start
sw	Ausweichen (Swerving)
th	theoretisch/physikalisch
trans	Transition
V	Fahrzeug (Vehicle)
x	in x-Richtung (entspricht Fahrzeug-Longitudinalrichtung)
y	in y-Richtung (entspricht Fahrzeug-Lateralrichtung)
z	in z-Richtung (entspricht Fahrzeug-Vertikalrichtung)
50	50 % des Maximalwerts

Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1-1: Entwicklung der Anzahl der Verkehrstoten in Deutschland 1992 bis 2020 (1992 = 100 %), aufgeschlüsselt nach Art der Verkehrsbeteiligung	1
Abbildung 1-2: Schema der Vorgehensweise und Struktur der Dissertation	5
Abbildung 2-1: Ablauf einer kritischen Verkehrssituation zur Ableitung verschiedener Assistenzstrategien nach Braun und Ihme	8
Abbildung 2-2: Versuchsablauf und Auswertefahren zur Bestimmung der Wirksamkeit von Frontkollisionsgegenmaßnahmen nach Hoffmann.....	13
Abbildung 2-3: Wirksamkeit der untersuchten Frontkollisionsgegenmaßnahmen im Rahmen der Dissertation von Hoffmann.....	14
Abbildung 2-4: Kräftegleichgewicht bei der Motorradfahrt, Vereinfachung durch Modellierung des Aufsassen als Starrkörper ohne Relativbewegung zum Fahrzeug..	15
Abbildung 2-5: Motorradfahrer als integraler Bestandteil des Fahrer-Fahrzeug-Systems	17
Abbildung 2-6: Ideale Bremskraftverteilung für Pkw und Motorrad im Vergleich	18
Abbildung 2-7: Kinematische Instabilitäten von Gier- und Rollbewegung des Motorrads	19
Abbildung 2-8: Lenkrollradius, der bei Bremsung zu einem nach kurveninnen drehenden Moment um die Lenkachse führt	20
Abbildung 2-9: Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsverläufe bei Schreckbremsung mit verschiedenen Bremsregelsystemen und mit herkömmlicher Bremsanlage	21
Abbildung 2-10: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus beim Labortest zur Fahrerreaktion bei unvorhergesehenen Verzögerungen	23
Abbildung 3-1: Ansätze zur Effektivitätssteigerung von Notbremssystemen	29
Abbildung 4-1: Phasen des Fahrerzustands vor einem Notbremsmanöver	33
Abbildung 4-2: Prinzip der vorbereitenden Teilbremsung vor Einleitung der maximalen Verzögerung	35
Abbildung 4-3: Fragestellungen der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen.....	35
Abbildung 4-4: Verzögerungsprofile für vorbereitende Teilbremsung	37
Abbildung 4-5: Schema der Expertenstudie: Steigern der Verzögerung ($D_1 \dots D_n$) innerhalb der durch ihre Ausgangsgeschwindigkeit ($v_1 \dots v_3$) definierten Versuchsreihen, Bewertung: „kontrollierbar“ (✓) oder „nicht kontrollierbar“ (✗).....	39
Abbildung 4-6: Vorgehen Expertenstudie: Ermitteln von Kontrollierbarkeitsgrenzen und Parametrierung der Teilbremsprofile	40
Abbildung 4-7: Vorgehen zur Ermittlung der abgebauten Geschwindigkeit im Referenzzeitraum	44
Abbildung 4-8: Geschwindigkeitsabbau während eines Notbremsmanövers anhand von skizzierten Geschwindigkeits- bzw. Verzögerungsverläufen für die verschiedenen (Teil-)Bremsprofile	45
Abbildung 4-9: Skala zur Bewertung der Kritikalität nach Neukum et al.....	46
Abbildung 4-10: Vorgehen Probandenstudie 1: Potentialanalyse und Priorisierung der Bremsprofile.....	46
Abbildung 4-11: Aus drei Studienabschnitten zusammengefügte Untersuchungsmethodik...	48
Abbildung 4-12: Verzögerungspotential in der Kurvenfahrt nach Rollwinkel und Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn	49
Abbildung 4-13: Versuchsfahrzeug Honda NC700X	51
Abbildung 4-14: Fahrzeugverzögerung durch Bremsdruckaufbau mittels Bremsaktor, Zielverzögerung 7 m/s^2	52

Abbildung 4-15: links: am Lenker applizierte Dehnmessstreifen, rechts: Abstützkraft am Lenker	53
Abbildung 4-16: Rückenprotector mit Beschleunigungssensor	54
Abbildung 4-17: Sensoren zur Messung der Fahreroberkörper- und Kopfbewegung	55
Abbildung 4-18: Motorradfahrer in Folgefahrt hinter EVITA mit Zugfahrzeug	56
Abbildung 5-1: Verzögerungsprofil <i>Block</i> mit 5 m/s^2 aus Zielgeschwindigkeit 70 km/h	60
Abbildung 5-2: Kontrollierbarkeitsbewertung des <i>Blockprofils</i> bei 70 km/h (Tachoanzeige)	61
Abbildung 5-3: Verzögerungsprofil <i>Rampe</i> mit Gradient 3 m/s^3 aus Zielgeschwindigkeit 90 km/h	62
Abbildung 5-4: Kontrollierbarkeitsbewertung des <i>Rampenprofils</i> bei 70 km/h (Tachoanzeige)	63
Abbildung 5-5: Verzögerungsprofil <i>Impuls</i> mit 7 m/s^3 aus Zielgeschwindigkeit 70 km/h	64
Abbildung 5-6: Kontrollierbarkeitsbewertung des <i>Impulsprofils</i> bei 70 km/h (Tachoanzeige)	65
Abbildung 5-7: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Kontrollierbarkeitsgrenze beim <i>Blockprofil</i>	67
Abbildung 5-8: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Kontrollierbarkeitsgrenze beim <i>Rampenprofil</i>	68
Abbildung 5-9: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Kontrollierbarkeitsgrenze beim <i>Impulsprofil</i>	69
Abbildung 5-10: Rollwinkelabhängigkeit der Kontrollierbarkeit von Verzögerungen in Kurvenfahrt bei einer Kurvenkrümmung von $0,04 \text{ m}^{-1}$, zwei Rollwinkelcluster ergeben sich aus den Ausgangsgeschwindigkeiten 30 km/h und 50 km/h	70
Abbildung 5-11: Schematischer Ablauf des Versuchs am Beispiel einer <i>Blockbremsung</i>	71
Abbildung 5-12: Beispielhafte Darstellung der Messdaten einer <i>Blockbremsung</i> mit Sollverzögerung 5 m/s^2 aus einer Sollgeschwindigkeit von 70 km/h ($19,4 \text{ m/s}$)	73
Abbildung 5-13: Ermitteln des Transitionsendes für das Teilbremsprofil <i>Block</i> anhand des Endes des Verzögerungsaufbaus am Fahreroberkörper bzw. des Lenkerkraftaufbaus	74
Abbildung 5-14: Ermitteln des Transitionsendes für das Teilbremsprofil <i>Rampe</i> anhand des Endes des Verzögerungsaufbaus am Fahreroberkörper bzw. des Lenkerkraftaufbaus	75
Abbildung 5-15: Ermitteln des Transitionsendes für das Teilbremsprofil <i>Impuls</i> anhand der ersten Brems- bzw. Kupplungsbetätigung	77
Abbildung 5-16: Ermitteln des Transitionsendes für die Referenzbremsung anhand der ersten Brems- bzw. Kupplungsbetätigung	78
Abbildung 5-17: Zusammenfassung der Ergebnisse der subjektiven Kontrollierbarkeitsbewertungen der ersten Probandenstudie (Häufigkeiten)	82
Abbildung 5-18: Charakteristische Verläufe der Fahrzeugbeschleunigung, Beschleunigungen am Fahreroberkörper und der Lenkerkraft bei automatischen und manuellen Bremsungen im Vorversuch zur zweiten Probandenstudie	85
Abbildung 5-19: Ermittlung des Zeitverzugs zwischen Fahrzeug- und Fahrer(kopf)beschleunigung	86
Abbildung 5-20: Zeitverzug zwischen Fahrzeug- und Fahrerverzögerung für drei Fahrten desselben Fahrers	87
Abbildung 5-21: Nickbewegung am Fahreroberkörper nach Einleiten verschiedener Bremsmanöver im Vorversuch zur zweiten Probandenstudie	88
Abbildung 5-22: Ablauf der Fahrerbewegung nach Einsetzen der automatischen Verzögerung	91

Abbildung 5-23: Nickraten aller Probanden nach Einleitung der automatischen Verzögerung	92
Abbildung 5-24: Vergleich Nickraten zweier Fahrer während des AEB-Manövers	93
Abbildung 5-25: Lenkerabstützkraft aller Probanden nach Einleitung der automatischen Verzögerung	94
Abbildung 5-26: Nickraten aller Probanden in den manuellen Bremsmanövern	95
Abbildung 5-27: Zusammenfassung der Ergebnisse der subjektiven Kontrollierbarkeitsbewertungen der zweiten Probandenstudie (Häufigkeiten)	97
Abbildung 6-1: Zusammenfassung der Ergebnisse mit Zuordnung zu den Teilstudien	99
Abbildung A-1: An der Soziusfußraste montierter Bremsaktor	105
Abbildung A-2: Aufbau des Kupplungsaktors	109
Abbildung A-3: Kupplungsaktor im eingebauten Zustand	110
Abbildung A-4: Sensorposition zur Messung der Fahreroberkörperbeschleunigung	110
Abbildung A-5: Aufgezeichnete Messdaten der <i>Blockbremsungen</i> in der ersten Probandenstudie	127
Abbildung A-6: Aufgezeichnete Messdaten der <i>Rampenbremsungen</i> in der ersten Probandenstudie	129
Abbildung A-7: Aufgezeichnete Messdaten der <i>Impulsbremsungen</i> in der ersten Probandenstudie	131
Abbildung A-8: Aufgezeichnete Messdaten der Referenzbremsungen in der ersten Probandenstudie	133
Tabelle 2-1: Kategorisierung von Frontkollisionsassistenzsystemen nach Reschka et al.	6
Tabelle 2-2: Betrachtete Ausbaustufen von NBA bei Hummel	10
Tabelle 2-3: Sicherheitspotential von Notbremsassistenten nach Hummel et al.	11
Tabelle 2-4: Ergebnisse der Gegenüberstellung verschiedener Bremsregelsysteme hinsichtlich Unfallverhinderung und Minderung der Unfallfolgen	22
Tabelle 2-5: Bewertung verschiedener Auslösezeitpunkte eines prototypischen MAEB durch Probanden, Skala von 0 (viel zu früh) bis 100 (viel zu spät)	24
Tabelle 5-1: Permutationsplan der Expertenstudie	59
Tabelle 5-2: Ermittelte kontrollierbare Verzögerungen/Verzögerungsgradienten der Teilbremsprofile bei 70 km/h	66
Tabelle 5-3: Ermittelte Transitionsdauern für das Teilbremsprofil <i>Block</i>	74
Tabelle 5-4: Ermittelte Transitionsdauern für das Teilbremsprofil <i>Rampe</i>	76
Tabelle 5-5: Ermittelte Transitionsdauern für das Teilbremsprofil <i>Impuls</i>	77
Tabelle 5-6: Ermittelte Transitionsdauern für die Referenzbremsungen	79
Tabelle 5-7: Zusammenfassung der Ergebnisse der ersten Probandenstudie	80
Tabelle 5-8: Mittlerer Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Nickrate nach Einleitung der automatischen Verzögerung über alle Fahrer	93
Tabelle 5-9: Mittlerer Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Schulternickrate und des Kraftaufbaus über alle Fahrer nach Einleitung der automatischen Verzögerung	94
Tabelle 5-10: Mittlerer Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Nickraten und des Kraftaufbaus über alle Fahrer nach Beginn des Bremsdruckaufbaus in den manuellen Bremsmanövern	96
Tabelle A-1: Zusammenfassung Expertenversuche <i>Blockprofil</i>	120
Tabelle A-2: Zusammenfassung Expertenversuche <i>Rampenprofil</i>	122
Tabelle A-3: Zusammenfassung Expertenversuche <i>Impulsprofil</i>	124

Tabelle A-4: Zusammenfassung Probandenstudie 1, <i>Blockprofil</i>	126
Tabelle A-5: Zusammenfassung Probandenstudie 1, <i>Rampenprofil</i>	128
Tabelle A-6: Zusammenfassung Probandenstudie 1, <i>Impulsprofil</i>	130
Tabelle A-7: Zusammenfassung Probandenstudie 1, Referenzmanöver	132
Tabelle A-8: Zusammenfassung Probandenstudie 2, automatische Bremsengriffe	134
Tabelle A-9: Zusammenfassung Probandenstudie 2, manuelle Bremsengriffe	135

Kurzzusammenfassung

Im Pkw- und Lkw-Bereich sind schon seit vielen Jahren Assistenzsysteme im Einsatz, die in Notfallsituationen eingreifen und damit zu einer Verbesserung der Fahrzeugsicherheit beitragen. Ein klassisches Beispiel hierfür sind automatische Notbremsassistenten. Diese gehören bei vielen Fahrzeugen bereits zur Serienausstattung bzw. sind für Lkw sogar gesetzlich vorgeschrieben.

Obwohl Motorradfahrer¹ einen großen Anteil an den im Straßenverkehr getöteten und schwer verletzten Personen haben, sind in diesem Bereich in Notfallsituationen aktiv eingreifende Systeme bislang nicht verfügbar. Ein Grund hierfür besteht darin, dass Pkw-Systeme nicht einfach adaptiert werden können, weil die motorradtypische Einspurfahrtdynamik charakteristische Herausforderungen bereithält und den Einsatzmöglichkeiten aktiv eingreifender Assistenzsysteme somit Grenzen setzt. Beim Eingreifen eines Assistenzsystems ist das Überschreiten dieser Grenzen und ein daraus resultierendes Hervorrufen einer neuen kritischen, für den Fahrer nicht mehr kontrollierbaren Situation zu vermeiden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird am Beispiel eines automatischen Notbremssystems nachgewiesen, dass aktiv in die Motorradlängsdynamik eingreifende Assistenzsysteme trotzdem durchaus anwendbar sind. Es wird eine Methodik entwickelt, die es erlaubt, Kontrollierbarkeitsgrenzen zu ermitteln, um das Potential des Systems durch Annäherung an diese Grenzen möglichst gut ausnutzen zu können. Im zweiten Schritt beinhaltet die Methodik eine Potentialanalyse, deren Ziel ist, verschiedene Eingriffsstrategien zu vergleichen, um vielversprechende Ansätze zu priorisieren. Darüber hinaus sieht die Untersuchungsmethodik eine Analyse der Reaktionen von durch einen Eingriff überraschten Fahrern vor, um weitere Kenntnisse darüber zu erlangen, was bei der Auslegung automatischer Notbremssysteme für Motorräder zu beachten ist.

Das erarbeitete Vorgehen wird exemplarisch auf ein prototypisches System angewendet. Dabei bewährt sich die Untersuchungsmethodik und liefert vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Anwendbarkeit automatischer Notbremssysteme für Motorräder. Die Reproduzierbarkeit der gemessenen Fahrerreaktionen schafft Vertrauen, dass die entsprechenden Effekte vorhersehbar sind und damit keinen vollständig unberechenbaren sicherheitskritischen Faktor darstellen.

Die erfolgreiche Anwendung der Methode führt zu dem Ergebnis, dass sie als Grundlage für die Freigabe dienen und somit einen Beitrag zum zukünftigen Einsatz sicherheitsfördernder Assistenzsysteme für Motorräder leisten kann.

¹ Zur besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit für Personenbezeichnungen das generische Maskulinum verwendet, wobei alle Geschlechtsidentitäten gleichermaßen gemeint sind.

Summary

Assistance systems that intervene in emergency situations and thus help to improve vehicle safety have been in use in the car and truck sector for many years. One common example for this are emergency brake assistants. These are already standard equipment in many vehicles or are rather even legally required for trucks.

Although motorcyclists account for a large proportion of fatalities and serious injuries in road traffic, systems that actively intervene in emergency situations are not yet available in the motorcycle sector. One reason for this is that passenger car systems cannot easily be adapted because the motorcycle specific single-track vehicle dynamics lead to characteristic challenges and thus set limits to the possible application of actively intervening assistance systems. If an assistance system is applied, it is important to avoid exceeding these limits as this could result in the occurrence of a new critical situation that is no longer controllable for the rider.

The presented work uses an autonomous emergency braking system as an example to demonstrate that it is certainly possible to apply assistance systems that actively intervene on the longitudinal motorcycle dynamics. A methodology is developed that allows to determine controllability limits in order to exploit the potential of the system to an optimum by approximating these limits. In the second step, the methodology includes a potential analysis with the aim to compare different intervention strategies in order to prioritize promising approaches. Additionally, the method intends to analyze the reactions of riders surprised by a braking intervention. This helps to gain further knowledge about what needs to be considered during the design of autonomous emergency braking systems for motorcycles.

The developed procedure is exemplarily applied to a prototype system. The methodology proves to be appropriate and delivers promising results regarding the applicability of autonomous emergency braking systems for motorcycles. The reproducibility of the measured rider reactions creates confidence that the corresponding effects are predictable and thus do not represent a completely incalculable safety-critical factor.

The successful application of the method leads to the conclusion that it can serve as a basis for the release of a system and thus contribute to the future use of safety-enhancing assistance systems for motorcycles.

1 Einleitung

Die Reduktion der Anzahl von Verkehrsunfällen stellt ein wichtiges Ziel in der Forschung und Entwicklung in der Automobilindustrie dar. Während sich die Anzahl der Getöteten im deutschen Straßenverkehr insgesamt seit 1992 auf weniger als ein Drittel reduziert hat, ist der prozentuale Rückgang der getöteten Motorradfahrer wesentlich geringer (siehe Abbildung 1-1). Entsprechend verschob sich der Anteil der Motorradfahrer an den im Straßenverkehr getöteten Personen von knapp 12 % im Jahr 1992 auf den fast doppelten Wert (22,4 %)² im Jahr 2018. Es ist anzunehmen, dass der bei Pkw-Insassen vergleichsweise stärkere Rückgang der Getötetenzahlen auf vielfältige Sicherheitssysteme zurückzuführen ist, die sich in den letzten Jahrzehnten etabliert haben.

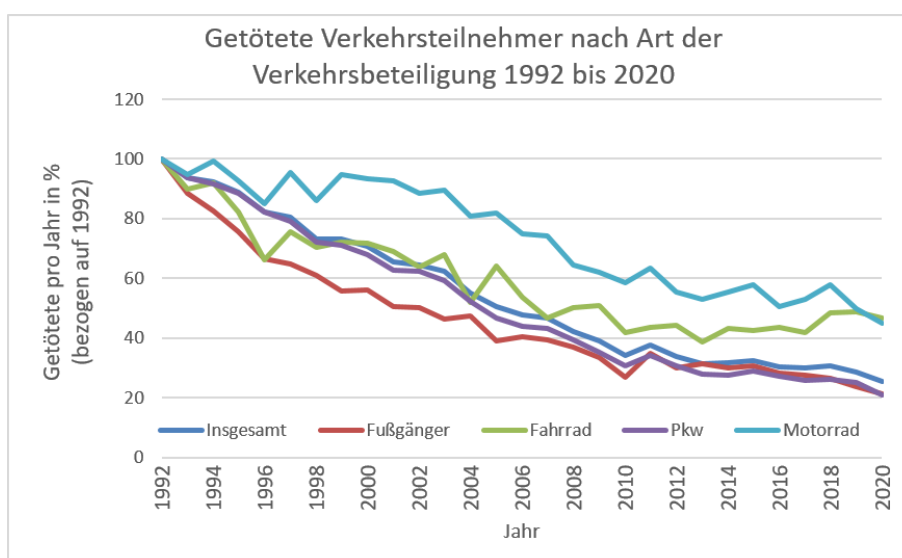


Abbildung 1-1: Entwicklung der Anzahl der Verkehrstoten in Deutschland 1992 bis 2020 (1992 = 100 %), aufgeschlüsselt nach Art der Verkehrsbeteiligung³

Im Pkw-Bereich werden zur Verbesserung der Sicherheit bereits seit vielen Jahren Fahrerassistenzsysteme (FAS) eingesetzt. Neben für neu zugelassene Fahrzeuge mittlerweile verpflichtenden Systemen wie dem Anti-Blockier-System (ABS) und der elektronischen Stabilitätskontrolle (ESC, Electronic Stability Control) zählen hierzu beispielsweise die Adaptive Geschwindigkeitsregelung (ACC, Adaptive Cruise Control, oft auch als Abstandsregeltempomat bezeichnet) und automatische Notbremssysteme⁴ (AEB, Autonomous Emergency Braking). Untersuchungen der Unfallforschung des Gesamtverbands der

² Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle bis 2018 (2019).

³ Eigene Darstellung, basierend auf Daten aus: Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle bis 2020 (2021).

⁴ In einfacher Form seit 2018 für Lkw über 3,5 t ebenfalls verpflichtend, vgl. Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages: Lkw-Auffahrunfälle auf BAB (2016), S. 4.

Deutschen Versicherungswirtschaft (Unfallforschung der Versicherer, UDV) zeigen, dass der Einsatz solcher Systeme sich positiv auf die Entwicklung von Sach- und Personenschäden auswirkt⁵.

Während die oben genannten Systeme im Pkw häufig bereits zur Serienausstattung gehören, oder zumindest weit verbreitet sind, fallen die Verfügbarkeit (bzw. Ausrüstungsraten bei gegebener Verfügbarkeit) von Assistenzsystemen motorisierter Zweiräder wesentlich geringer aus. Lediglich das ABS ist seit 2017 für alle neu zugelassenen Fahrzeuge mit einem Hubraum über 125 cm³ gesetzlich vorgeschrieben⁶. Dieses Beispiel zeigt, dass durchaus Bestrebungen bestehen, bewährte Systeme aus dem Pkw auch für Motorräder zu etablieren. Weitere häufig eingesetzte Systeme sind Traktions- und Hinterrad-Abhebe-Kontrolle.

Zwar werden weitere Assistenzsysteme entwickelt, die auf dem Markt jedoch bislang nicht verfügbar sind. Die Zurückhaltung bei der Anwendung für Motorräder ist zu einem großen Teil auf die einspurpezifische Fahrdynamik zurückzuführen. Die Unterschiede zur Fahrdynamik eines Zweispurfahrzeugs erschweren die Adaption von Systemen aus dem Pkw-Bereich (in einigen Fällen ist die Adaption für Einspurfahrzeuge prinzipbedingt sogar ausgeschlossen, bspw. ESC). Sie erfordern eine eigens auf Zweiräder abgestimmte Entwicklung, die durch die geringen Stückzahlen nicht immer wirtschaftlich scheint. Die Besonderheiten der Fahrdynamik und des Zusammenspiels zwischen Fahrer und Fahrzeug stellen die Entwickler vor zusätzliche Herausforderungen.

Trotz der zurückbleibenden Entwicklung aktiv eingreifender Assistenzsysteme für Motorräder wird diesen ein hohes Sicherheitspotential zugesprochen⁷. Ziel der vorliegenden Arbeit ist, am Beispiel eines automatischen Notbremssystems zu untersuchen, inwieweit die genannten zweiradspezifischen Herausforderungen dessen Anwendbarkeit beeinflussen. Dabei können durch ein besseres Verständnis dieser Einflüsse nicht nur die zu erwartenden Einschränkungen aufgezeigt werden, vielmehr kann Vertrauen generiert werden, entsprechende Systeme trotz der Einschränkungen innerhalb gewisser Grenzen dennoch einsetzen zu können. Es soll also aufgezeigt werden, unter welchen Rahmenbedingungen die Anwendbarkeit eines automatischen Notbremssystems für Einspurfahrzeuge gegeben ist. Darüber hinaus werden Ansätze einer Methodik zur Ermittlung der Einsatzgrenzen sowie zur Freigabe des Assistenzsystems erarbeitet.

⁵ Hummel, T. et al.: Ermittlung des Sicherheitspotentials (2011), S. 55.

⁶ Europäisches Parlament: EU-Verordnung 168/2013 (2013), S. 123.

⁷ Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015), S. 786.

1.1 Motivation und Zielsetzung

Wie bereits zuvor geschildert, resultieren aus der einspur-spezifischen Fahrdynamik des Motorrads bei der Auslegung von Assistenzsystemen Herausforderungen, die so im Pkw-Bereich nicht vorliegen. Eine große Rolle spielt dabei das Zusammenspiel zwischen dem Fahrzeug und seinem Aufsassen⁸. Das Zweirad stellt ein grundsätzlich instabiles System dar, das insbesondere im Niedriggeschwindigkeitsbereich die Stabilisierung durch den Aufsassen erfordert. Mit einem Anteil von bis zu 50 % der Gesamtsystemmasse besitzt der Aufsasse im Vergleich zum Fahrer eines Pkw außerdem einen wesentlich größeren und direkteren Einfluss auf die Fahrdynamik. Es ist also anzunehmen, dass der Aufsasse eines Zweirads sein Fahrzeug durch eine unerwünschte Reaktion auf einen automatischen Bremseneingriff deutlich schneller destabilisieren kann, als es für einen Fahrer eines Pkw der Fall ist. Darüber hinaus fehlt dem Zweiradaufsassen das Rückhaltesystem in Form eines Sicherheitsgurts, was zur Folge hat, dass er die während der Bremsung auf ihn wirkenden Trägheitskräfte selbst aktiv abfangen muss, beispielsweise durch Körperspannung und Abstützen an der Lenkstange.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist folglich, zu klären, ob automatische Notbremssysteme trotz der beschriebenen Herausforderungen grundsätzlich auf dem Motorrad anwendbar sind und welche Randbedingungen gegebenenfalls erfüllt sein müssen, um eine unerwünschte Destabilisierung des Fahrer-Fahrzeug-Systems durch einen automatischen Bremseneingriff zu vermeiden. Hierbei liegt ein besonderer Fokus darauf, dass der Motorradfahrer nicht zu einer unerwünschten Reaktion (z.B. plötzliche Lenkeingabe) gedrängt werden darf. Aus den erforderlichen Randbedingungen werden Anwendbarkeitsgrenzen für automatische Notbremssysteme für Motorräder abgeleitet.

Obwohl zu erwarten ist, dass die Anwendbarkeitsgrenzen im Zweiradbereich deutlich enger gesteckt sind als für Zweispurfahrzeuge, wird erwartet, dass automatische Notbremssysteme auch für Motorräder das Potential zur Verbesserung der Sicherheit in entsprechenden kritischen Situationen besitzen. Diese Erwartung basiert auf der Annahme, dass auch eine geringe Reduktion der Geschwindigkeit – und somit der kinetischen Energie – vor einer Kollision immer zu einer Reduktion der Aufprallenergie führt und folglich zu einer Minderung der Unfallfolgen führt. Die Analyse des Potentials zur Geschwindigkeitsreduktion, das ein automatisches Notbremssystem innerhalb der für Motorräder ermittelten Anwendbarkeitsgrenzen bietet, stellt ebenfalls ein Ziel der Arbeit dar. Aus dem Ergebnis der Arbeit können Hinweise für die zukünftige Entwicklung von Motorrad-Notbremssystemen abgeleitet werden.

⁸ In der vorliegenden Arbeit wird lediglich das mit einer Person besetzte Fahrzeug betrachtet. Die Fahrt mit Sozius (Beifahrer) wird in den Untersuchungen nicht berücksichtigt.

1.2 Vorgehen

Zunächst werden die Grundlagen und der Stand der Forschung analysiert (Kapitel 2). Hierbei werden insbesondere Ergebnisse bereits durchgeführter, meist EU-geförderter Forschungsprojekte im Bereich der Notbremsassistenten für Motorräder beleuchtet. Außerdem wird zusammengefasst, welche Bestrebungen hinsichtlich der Entwicklung entsprechender Systeme in der Industrie bereits stattgefunden haben. Neben den Ergebnissen bereits durchgeführter Forschungsprojekte spielen auch die Grundlagen der Motorradfahrtdynamik eine wichtige Rolle. Aus der einspur-spezifischen Fahrtdynamik ergeben sich Herausforderungen, die einen entscheidenden Einfluss auf das weitere Vorgehen und somit auf die Durchführung der hier beschriebenen Forschungsarbeit haben.

Aus den bereits vorhandenen Erkenntnissen und den bei der Analyse des Ist-Stands identifizierten offenen Fragestellungen wird anschließend der Forschungsbedarf abgeleitet (Kapitel 3).

In Kapitel 4 wird anschließend basierend auf dem identifizierten Forschungsbedarf und unter Berücksichtigung der motorrad-spezifischen Herausforderungen das Vorgehen zur Untersuchung der Anwendbarkeit und des Potentials zur Geschwindigkeitsreduktion automatischer Notbremsysteme für Motorräder abgeleitet, dem die vorliegende Arbeit folgt.

Der festgelegten Methodik folgend werden die zur Erreichung der Ziele notwendigen Versuche definiert und zu Studien zusammengefasst. Im Anschluss an die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Studien (Kapitel 5) wird im abschließenden Schritt diskutiert, ob anhand der Studienergebnisse angenommen werden kann, dass Notbremsysteme für Motorräder grundsätzlich anwendbar sind und ob die erarbeitete Methodik valide ist (Kapitel 6 und 7).

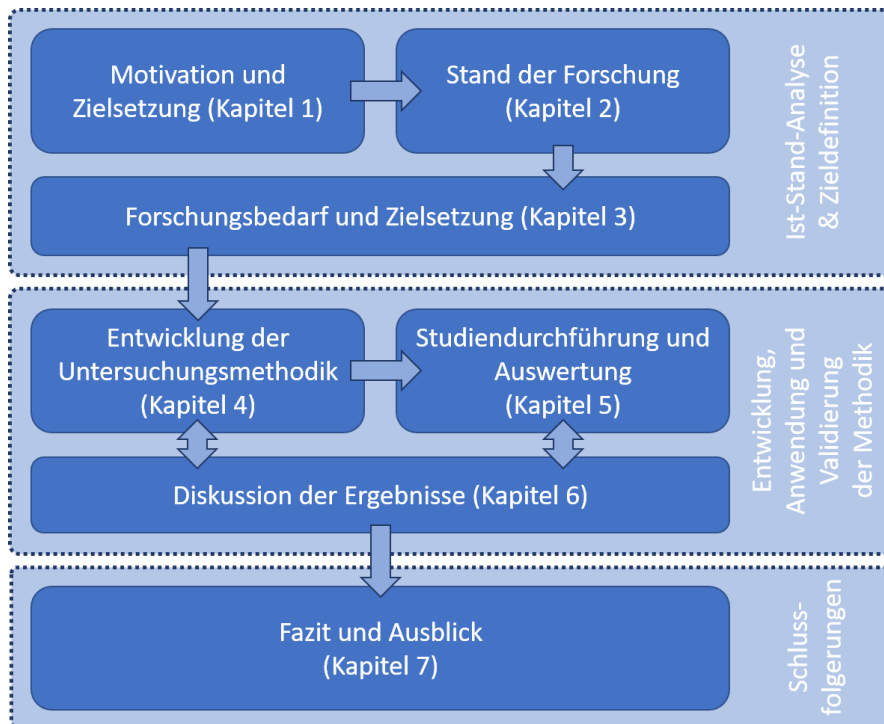


Abbildung 1-2: Schema der Vorgehensweise und Struktur der Dissertation

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Im Folgenden wird auf die notwendigen Grundlagen für die vorliegende Arbeit eingegangen. Zunächst werden die Grundlagen für AEB im Allgemeinen bzw. bekannte Systeme aus dem Pkw-Bereich erläutert. Im Anschluss daran wird speziell auf Motorrad-AEB (MAEB) eingegangen. Hierbei werden neben den motorradspezifischen Herausforderungen besonders bereits erfolgte Forschungsarbeiten beleuchtet. Darüber hinaus werden bereits bekannte Ansätze zur Umsetzung von Motorrad-AEB aus der Industrie vorgestellt.

2.1 AEB im Pkw-Bereich

AEB gehören zur Gruppe der Frontkollisionsassistenzsysteme (FVCX). FVCX können hinsichtlich ihrer Wirkweise eine Reihe verschiedener Ausprägungen annehmen. Nach Reschka et al. lassen sie sich folgendermaßen kategorisieren⁹:

Tabelle 2-1: Kategorisierung von Frontkollisionsassistenzsystemen nach Reschka et al.⁹

FCVX	Obermenge der Frontkollisionsassistenzsysteme		
FVCC	Forward vehicle collision conditioning	Frontkollisionsvorbereitung	Vorbereitung von Subsystemen, sodass die Wirkung im Einsatzfall schneller entfaltet werden kann
FVCW	Forward vehicle collision warning	Frontkollisionswarnung	Warnen des Fahrers vor drohender Frontkollision
FVCM	Forward vehicle collision mitigation	Frontkollisions-schwereminderung	Verringern der Unfallschwere durch geeignete Maßnahmen
FVCA	Forward vehicle collision avoidance	Frontkollisionsverhinderung	Verhindern einer Frontkollision durch aktiven Eingriff

AEB werden sowohl für FVCM (Abbau kinetischer Energie bei nicht mehr zu verhindernder Kollision) als auch für FVCA (Vermeidung einer Kollision durch automatischen Eingriff) eingesetzt. Somit können AEB sowohl der aktiven (Vermeidung eines Unfalls) als auch der passiven Sicherheit (Minderung der Unfallfolgen) zugeordnet werden. Eine Warnung vor der drohenden Kollision (FVCW) geht den Eingriffen in aller Regel sowohl bei FVCM als auch bei FVCA voraus.

⁹ Reschka, A. et al.: Entwicklungsprozess von FVCX (2015), S. 915.

Das Potential von FVCX wurde früh erkannt. Bereits in den 1950er Jahren wurden radarbasierte prototypische Systeme zur Unterstützung des Fahrers beschrieben¹⁰. So beschreibt bspw. General Motors ein System, das Relativgeschwindigkeit und Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug per Radar misst und diese Information an den Fahrer weitergibt¹¹.

Kopischke zeigt anhand von Unfallanalysen das Potential automatischer Notbremssysteme auf, entwickelt ein radarbasiertes prototypisches System und leitet aus der Untersuchung unterschiedlicher Systemausprägungen eine Nutzenanalyse für AEB ab¹². Basierend auf der Tatsache, dass Unfälle im Längsverkehr zur größten Gruppe der Unfallarten gehören und einen hohen Anteil der Unfälle mit Schwerverletzten und Getöteten ausmachen, leiten Kühn und Hannawald in ihrer Analyse zum Sicherheitspotential von Fahrerassistenzsystemen ab, dass das Notbremssystem eines der vielversprechendsten Assistenzsysteme darstellt¹³. Das spiegelt sich in der Entwicklung der letzten beiden Dekaden wider, in der sich automatische Notbremssysteme im Pkw- und Lkw-Bereich etabliert haben. So sind Notbremsassistenten seit 2013 für Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t mit neuer Typzulassung Pflicht, seit 2015 für alle entsprechenden neu zugelassenen Fahrzeuge^{14,15}. Für Pkw führte die Verbraucherschutzorganisation Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) 2013 erstmals Tests von AEB durch und nahm diese 2014 in die Sternebewertung auf¹⁶, wodurch in Folge diese Systeme in die Grundausstattung neuer Pkw-Modelle aufgenommen wurden.

2.1.1 Wirkweise

Bei Frontkollisionsschutzsystemen handelt es sich um eine Gruppe von Assistenzsystemen, die dazu dienen, Unfällen im Längsverkehr (insbes. Auffahrunfällen) entgegenzuwirken. Es wird davon ausgegangen, dass dem Unfall eine Störung vorhergeht. Das Unfallereignis resultiert jedoch nicht unmittelbar aus dieser Störung. Vielmehr erhöht die Störung das Niveau der latenten Gefahr und lässt das Gefahrenniveau im zeitlichen Verlauf ansteigen. Erfolgt in der Folge ein korrigierender Eingriff, kann der Unfall abgewendet werden. Wird

¹⁰ Fonck, K.-H.: Radar bremst bei Gefahr (1955).

¹¹ Janicki, E.: Cars Detroit Never Built (1990) nach Wiesbeck, W.: Radar Systems Engineering (2009), S. 141.

¹² Kopischke, S.: Diss., Entwicklung einer Notbremsfunktion (2000).

¹³ Kühn, M.; Hannawald, L.: Verkehrssicherheit und Potentiale von FAS (2015), S. 68.

¹⁴ Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages: Lkw-Auffahrunfälle auf BAB (2016), S. 4.

¹⁵ Zunächst gültig für Busse mit mehr als neun Sitzplätzen und Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse über 8 t, seit 2016 (Typzulassung) bzw. 2018 (neu zugelassene Fahrzeuge) für alle Lkw über 3,5 t.

¹⁶ Euro NCAP: Autonome Notbremssysteme (2020).

nicht (oder gar falsch) eingegriffen, steigt das Gefahrenniveau immer weiter an, bis es schließlich im Unfall mündet^{17a}.

Der Ablauf einer solchen Verkehrssituation ist in Abbildung 2-1 schematisch dargestellt. Es ergeben sich daraus drei verschiedene Ansatzpunkte, den Unfall zu vermeiden bzw. die Unfallfolgen zu mindern:

1. Präventive Assistenz

Die latente Gefahr wird herabgesetzt, um die Auftretenswahrscheinlichkeit einer kritischen Situation zu reduzieren bzw. im Fall einer Störung den Handlungsspielraum (siehe ① in Abbildung 2-1) zu vergrößern, z.B. durch Entlastung des Fahrers (z.B. Übernahme des Folgefahrens durch ACC → Fahrer hat mehr Kapazitäten für andere Aufgaben zur Verfügung).

2. Reaktionsunterstützung

Der Fahrer wird dabei unterstützt, rechtzeitig und korrekt zu reagieren, damit er sich schnell und sicher den Grenzen der Fahrphysik nähern kann (siehe ② in Abbildung 2-1). So kann bspw. in einer Notbremssituation mithilfe eines ABS maximale Verzögerung aufgebaut werden, ohne dass die Gefahr blockierender Räder besteht.

3. Notmanöver

Falls die Fahrerreaktion ausbleibt, erfolgt ein (Brems-)Eingriff, um den Unfall zu verhindern, oder zumindest die Unfallfolgen zu lindern (siehe ③ in Abbildung 2-1).

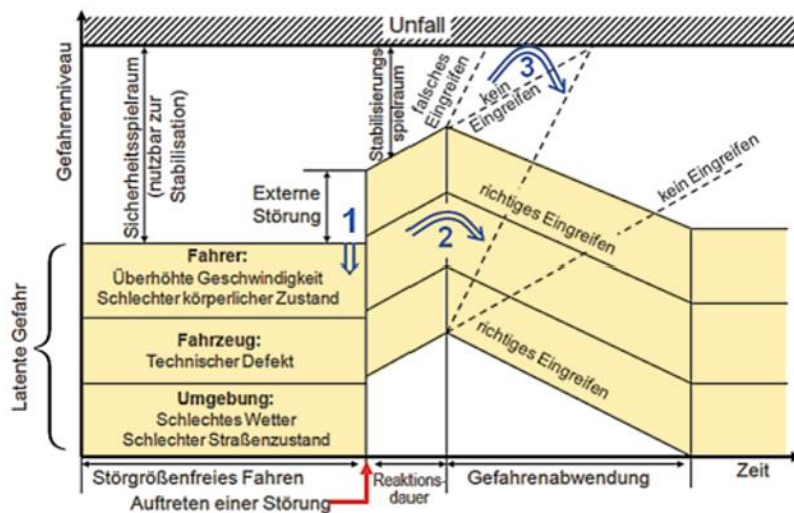


Abbildung 2-1: Ablauf einer kritischen Verkehrssituation zur Ableitung verschiedener Assistenzstrategien nach Braun und Ihme¹⁸, Bildquelle: Winner¹⁹

¹⁷ Winner, H.: Grundlagen von Frontkollisionsschutzsystemen (2015). a: S. 894 f.; b: S. 896 f.; c: S. 908, d: -

¹⁸ Braun, H.; Ihme, J.: Definition kritischer Situationen (1983).

¹⁹ Quelle: Winner, H.: Grundlagen von Frontkollisionsschutzsystemen (2015), S. 895.

Notbremssysteme für Pkw bewegen sich innerhalb der letzten beiden Punkte. So dienen sogenannte Bremsassistenten dazu, bei Betätigung des Bremspedals durch den Fahrer den Eingriff so zu unterstützen, dass möglichst schnell die benötigte Verzögerung erreicht wird, wenn die Betätigung durch den Fahrer zu zögerlich erfolgt (Reaktionsunterstützung)^{17b}. Hierbei erfolgt die Erkennung des Notbremswunsches über die Bremspedalgeschwindigkeit bzw. den daraus folgenden Bremsdruckanstieg. Bleibt der Eingriff durch den Fahrer bis zu einem bestimmten Zeitpunkt²⁰ aus, kann durch ein automatisches Notbremssystem Bremsdruck ohne Zutun des Fahrers aufgebaut werden (Notmanöver)^{17c}. Hierzu ist Umfeldsensorik erforderlich, um die Notwendigkeit des Notbremseingriffs zu erfassen.

Eine detailliertere Auseinandersetzung mit Aspekten von Frontkollisionsschutzsystemen, deren Abstufungen, Warn- und Eingriffsstrategien sowie eine ausführliche Diskussion der fahrdynamischen Aspekte von Notbremssystemen erfolgt durch Winner^{17d}.

2.1.2 Evaluation von AEB

Zur Evaluation der Wirksamkeit von Frontkollisionsgegenmaßnahmen im Pkw-Bereich sind zahlreiche Studien bekannt. Einige werden in diesem Abschnitt beispielhaft erläutert.

Grundsätzlich gibt es nach Kühn und Hannawald²¹ verschiedene Verfahren zur Bewertung des Sicherheitspotentials von FAS:

- **Retrospektiver Vergleich**

Es erfolgt ein Vergleich zwischen zwei Unfallgruppen, z.B. „Fahrzeuge mit FAS“ vs. „Fahrzeuge ohne FAS“.

- **„Was wäre wenn...“-Methode**

Dem realen Unfallablauf wird ein errechneter Unfallablauf mit einem Assistenzsystem mit bestimmten Systemeigenschaften gegenübergestellt. Die Methode setzt einen gewissen Detailgrad der Kenntnis der Unfallumstände voraus.

- **Simulation**

Auch hier erfolgt eine Bewertung nach der Methode „Was wäre wenn...“. Allerdings wird die Unfallsituation innerhalb einer Simulationsumgebung nachgestellt, wobei auch FAS mit komplexerer Funktionalität abgebildet werden können. Um auch Fahrerreaktionen (z.B. bei warnenden oder informierenden Systemen) testen zu können, werden hier auch Fahrermodelle für das menschliche Verhalten vorausgesetzt, die bis heute eine große Herausforderung darstellen.

²⁰ Ein schwacher Bremsingriff (30-40 % der maximalen Verzögerung) kann bereits ab einer Time-to-Collision (TTC) von 1,5 bis 2 s eingesetzt werden. Hierbei ist jedoch sicherzustellen, dass das Manöver durch den Fahrer überstimmt werden kann, z.B. wenn dieser ein Ausweichmanöver einleitet. Erst wenn ein Ausweichen nicht mehr möglich ist, kann ein starkes Bremsmanöver (mindestens 50 % der maximalen Verzögerung) erfolgen^{17c}.

²¹ Kühn, M.; Hannawald, L.: Verkehrssicherheit und Potentiale von FAS (2015), S. 67 f.

- **Field Operational Test (FOT)**

Probanden erleben Fahrsituationen in einem mit umfangreicher Messtechnik ausgestatteten Fahrzeug Situationen mit eingeschaltetem und ausgeschaltetem FAS. So können von Daten zur Funktionalität des FAS über Größen zur Beschreibung des Fahrerverhaltens bis hin zu Umfelddaten alle nötigen Informationen aufgezeichnet werden, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug, Straße, Wetter, Verkehr etc. zu beschreiben.

Aus dem Bereich der Bewertung von AEB sind in erster Linie Betrachtungen in Form der zweiten und vierten Methode bekannt. So analysieren bspw. Hummel et al.^{22a} nach der „Was wäre wenn...“-Methode das Sicherheitspotential ausgewählter FAS auf Basis von Unfalldaten aus der Unfalldatenbank der UDV. In Bezug auf AEB ermitteln die Autoren für verschiedene Ausprägungen von Frontkollisionsschutzsystemen rechnerisch ein theoretisches und ein realistisches Sicherheitspotential^{22b}. Die betrachteten Systeme werden als Notbremsassistenten (NBA) bezeichnet und sind in Tabelle 2-2 vereinfacht zusammengefasst.

Tabelle 2-2: Betrachtete Ausbaustufen von NBA bei Hummel¹⁶

Bezeichnung	Systemeigenschaften
NBA 1	- Verstärkung der vom Fahrer initiierten Bremsung - keine Umfelderkennung
NBA 2	- Umfelderkennung: Detektion von vorausfahrenden (nicht stehenden) Zweispurfahrzeugen - Warnung, Teilbremsung bei ausbleibender Fahrerreaktion, Ziel-/Notbremsung bei Fahrerreaktion
NBA 2*	wie NBA 2, plus Detektion stehender zweispuriger Fahrzeuge/Anhänger
NBA 2*FG	wie NBA 2*, plus Detektion von Fußgängern
NBA 2*RF	wie NBA 2*FG, plus Detektion von Radfahrern

Das theoretische Sicherheitspotential bezieht sich hier auf die Unfälle, die unter idealen Umständen vermeidbar wären. Diese idealen Umstände liegen aber im Normalfall nicht vor. Daher wird mithilfe eines systemspezifischen Korrekturfaktors ein realisierbares Sicherheitspotential ermittelt^{22c}. Im Fall des NBA 1 bedeutet das, dass theoretisch 11,4 % der Unfälle mit einem entsprechenden System vermeidbar wären. Studien zeigen jedoch, dass nur die Hälfte der Fahrer das Bremspedal überhaupt schnell genug betätigt, um das System zu aktivieren. So ergibt sich mit einem Korrekturfaktor von 0,5 ein realisierbares Sicherheitspotential von 5,7 %^{22d}. Die weiteren Ergebnisse sind in Tabelle 2-3 zusammengefasst.

²² Hummel, T. et al.: Ermittlung des Sicherheitspotentials (2011). a: -; b: S. 11 ff.; c: S. 10; d: S. 13

Tabelle 2-3: Sicherheitspotential von Notbremsassistenten nach Hummel et al.^{22b}

	Sicherheitspotential in %	
	theoretisch	realisierbar
NBA 1	11,4 ± 2,4	5,7
NBA 2	17,8 ± 2,9	12,1
NBA 2*	19,6 ± 3,0	13,9
NBA 2*FG	24,5 ± 3,4	18,8
NBA 2*RF	43,4 ± 4,5	37,7

Hoffmann^{23 a} geht einen Schritt weiter und zieht als Bewertungsverfahren für Frontkollisionsgegenmaßnahmen nur solche Methoden in Betracht, die die Interaktion eines Systems mit einem realen Fahrer einschließen. Als Möglichkeiten hierfür werden Simulatorversuche mit statischen oder dynamischen Simulatoren sowie Realfahrversuche genannt²⁴. Aufgrund der „natürlichen, multimodalen sensorischen Belastung der Versuchsperson“ sieht Hoffmann den Realfahrversuch gegenüber Simulatorversuchen als überlegen an^{23c}. Während Simulatorversuche (z.B. Untersuchung von akustischen Warnelementen durch Graham²⁵) den Vorteil der schnellen Realisierbarkeit von Funktionen und der sicheren Umgebung bieten, birgt der Realfahrversuch die Herausforderung, „kritisch erscheinende Situationen“ darzustellen, ohne eine reale Gefährdung für die Probanden darzustellen^{23c}. Bereits zu Beginn der 2000er Jahre wurden hierfür zahlreiche Ansätze erarbeitet, die Hoffmann^{23d} zusammenfasst und von denen einige im Folgenden beispielhaft genannt sind:

- **Anhänger als Zielfahrzeug**
Ein leichter, flacher Anhänger wird während der Fahrfahrt für den hinterherfahrenden Probanden überraschend abgekoppelt und verzögert. Als Hauptbewertungsgröße wird die Betätigungskraft am Bremspedal herangezogen.
- **Seitlicher Ausleger**
Ein seitlicher Ausleger ist an einem vorausfahrenden Fahrzeug montiert. Das Probandenfahrzeug folgt diesem Ausleger. Bei drohendem Aufprall in einer Bremssituation schwenkt der Ausleger nach oben, um eine Kollision zu verhindern.
- **Virtual Reality Testverfahren**
Dem Probanden werden Kollisionspartner per Head-Mounted-Display präsentiert. Ein künstlich erzeugtes Bild wird der realen Umgebung überlagert.

²³ Hoffmann, J.: Diss., EVITA (2008). a: -; b: S. 12 f.; c: S. 13; d: 13 ff.

²⁴ König, W. (2003), nach Hoffmann^{23b}

²⁵ Graham, R.: Auditory Icons (1999).

- **Fahrzeugmodell an Teleskopstange**

An einer Teleskopstange wird ein Fahrzeugmodell hinter einem Zugfahrzeug hergezogen. Die Teleskopstange schiebt sich im Fall eines aufprallenden Fahrzeugs zusammen.

- **Vorausfahrendes Fahrzeug:**

Ein plötzliches Bremsmanöver in einer Folgefahrtsituation wird durch einen hochtrainierten Fahrer in einem vorausfahrenden herkömmlichen Pkw realisiert.

Hoffmann selbst zieht das Fazit, dass keines der bekannten Testverfahren universell für die Untersuchung von in kritischen Situationen warnenden oder eingreifenden Systemen einsetzbar ist, wenn der Anspruch besteht, dem unvoreingenommenen Probanden eine entsprechende Situation darzubieten, ohne ihn in eine reale Gefahrensituation zu bringen. Auf dieser Basis entwickelt er ein eigenes Verfahren. Dabei besteht das Ziel darin, ein valides Testverfahren für die Bewertung von Wirksamkeit und Akzeptanz von Frontkollisionsschutzsystemen bereitzustellen, das insbesondere dazu geeignet ist, „die Wirkung beim Fahrzeugführer und den Nutzen der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen“^{26a}.

Das daraus resultierende Verfahren EVITA (Experimental Vehicle for Unexpected Target Approach) basiert auf einer Kombination aus einem Zugfahrzeug mit Seilwinde und einem Anhänger, auf dem ein Fahrzeugheck montiert ist („Dummy Target“). Während einer stationären Folgefahrt wird der Proband abgelenkt. Zeitgleich wird der Anhänger verzögert, während das Zugfahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit weiterfährt. Die Verbindung zwischen Zugfahrzeug und Anhänger ist durch die abrollende Seilwinde nach wie vor gegeben. Wird der drohende Aufprall durch das im Probandenfahrzeug eingesetzte Frontkollisionsschutzsystem nicht verhindert, wird der Anhänger durch Schließen der Seilwinde aktiv aus dem Gefahrenbereich gezogen. Damit stellt Hoffmann ein realistisches, aber dennoch für den Probanden risikofreies Bewertungsverfahren mit reproduzierbarem Versuchsablauf, das im Rahmen seiner Arbeit durch über 1500 Versuche ohne Fehlfunktion validiert wurde^{26b}.

Mithilfe seines Untersuchungsverfahrens vergleicht Hoffmann verschiedenartig gestaltete Frontkollisionsgegenmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit. Als Kriterium für die Beurteilung der Wirksamkeit zieht er den durch das jeweilige System erreichten Geschwindigkeitsabbau in einem festgelegten Beurteilungszeitraum heran^{26c}. Der Beurteilungszeitraum beginnt mit der Auslösung der Frontkollisionsgegenmaßnahme. Darauf folgt die Blickzuwendung des abgelenkten Probanden zum Vorderfahrzeug, das Umsetzen des Fußes zum Bremspedal und die Betätigung des Pedals. Mit Erreichen der maximalen Verzögerung (ermittelt anhand des Bremsdrucks, alternativ über den Bremspedalweg) ist die Gesamtreaktionszeit abgeschlossen. Das Ende des Beurteilungszeitraums wird so gewählt, dass es für alle Probanden nach Ende der Gesamtreaktionszeit liegt, gleichzeitig aber das Fahrzeug innerhalb des Zeitraums nicht zum Stillstand kommt. Die zur

²⁶ Hoffmann, J.: Diss., EVITA (2008). a: S. 19; b: S. 101; c: S. 69 ff.

Wirksamkeitsbewertung herangezogene Geschwindigkeitsdifferenz setzt sich zusammen aus der innerhalb der Gesamtreaktionszeit tatsächlich abgebauten Geschwindigkeit und der anschließend bis zum Ende des Beurteilungszeitraums extrapolierten Geschwindigkeitsdifferenz bei Vollverzögerung²⁷. Das Verfahren zur Bestimmung der Wirksamkeit ist in Abbildung 2-2 schematisch dargestellt.

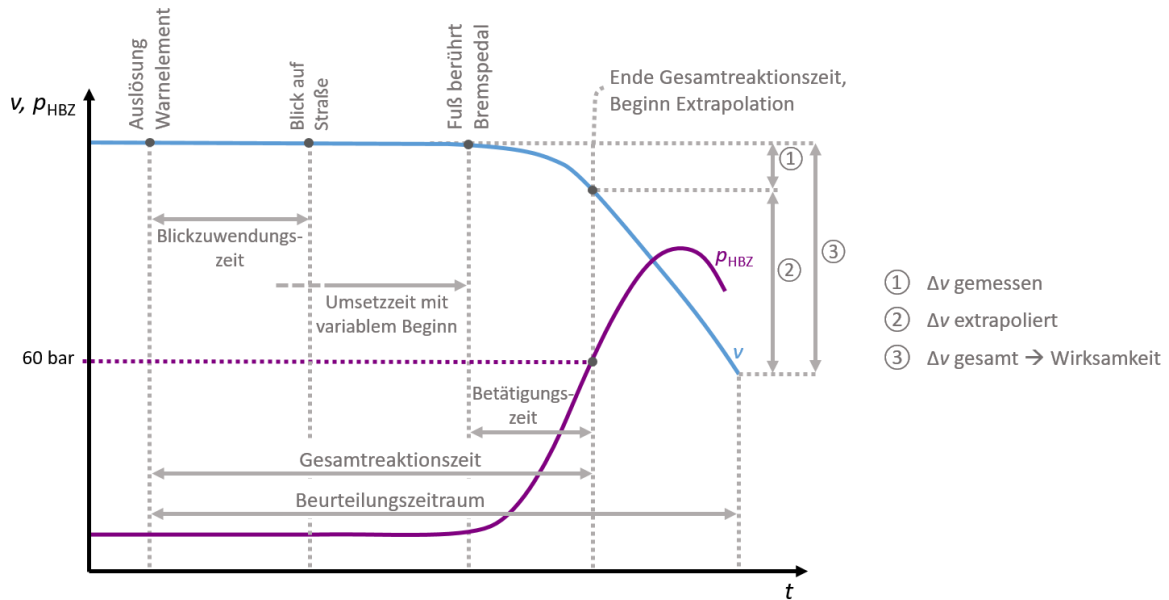


Abbildung 2-2: Versuchsablauf und Auswertefahren zur Bestimmung der Wirksamkeit von Frontkollisionsgegenmaßnahmen nach Hoffmann^{28a}

Anhand der nach dem beschriebenen Verfahren ermittelten Wirksamkeit werden die untersuchten Systeme einer Rangfolge zugeordnet, siehe Abbildung 2-3.

²⁷ Hoffmann, J.: Diss., EVITA (2008), S. 39 f.

²⁸ Eigene Darstellungen nach Hoffmann, J.: Diss., EVITA (2008). a: S. 36 & S. 40, b: S. 71

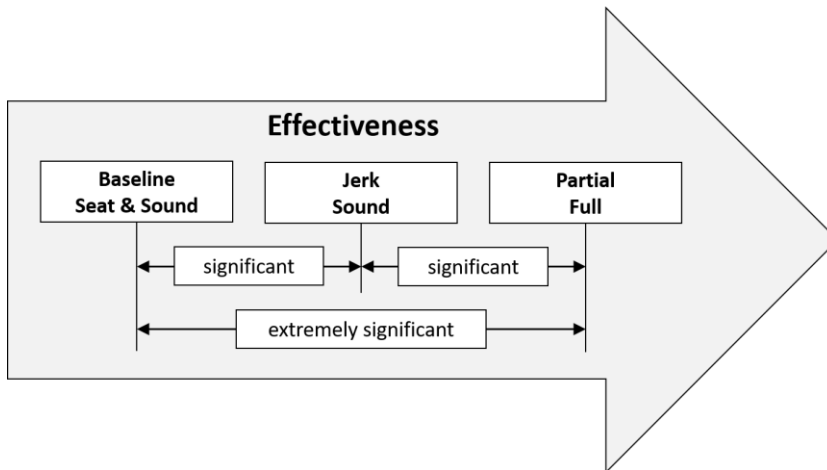


Abbildung 2-3: Wirksamkeit der untersuchten Frontkollisionsmaßnahmen im Rahmen der Dissertation von Hoffmann^{28b}

2.2 AEB für Motorräder

Während AEB im Pkw-Bereich bereits flächendeckend eingesetzt werden, sind noch keine Seriensysteme für Zweiräder bekannt. Dennoch gibt es auch in diesem Umfeld Bestrebungen zur Entwicklung entsprechender Systeme, was sich in einer Vielzahl an bereits existierenden vorbereitenden Arbeiten im Bereich der MAEB (Motorcycle Autonomous Emergency Braking) widerspiegelt.

Neben verschiedenen Untersuchungen zur Potentialabschätzung durch Unfallanalysen und zur Fahrerreaktion auf Bremsengriffe wurden bereits Themen wie Auslöselogiken betrachtet und prototypische Systeme umgesetzt. Im Folgenden wird ein Überblick über Grundlagen für MAEB und die bekannten Forschungsarbeiten gegeben.

2.2.1 Motorradspezifische Herausforderungen

Ein Einspurfahrzeug weist im Vergleich zum Zweispurfahrzeug einige Besonderheiten auf, aus denen sich Motorradspezifische Herausforderungen ergeben, die, insbesondere im Hinblick auf die für MAEB relevanten Bremsmanöver, hier erläutert werden.

2.2.1.1 Fahrstabilität

Das offensichtlichste Unterscheidungsmerkmal zwischen Ein- und Zweispurfahrzeug ist die Kippinstabilität des Einspursystems – vor allem im Niedriggeschwindigkeitsbereich und im Stand. Beim Motorrad handelt es sich um ein kippinstabiles System. Die wirkenden Kräfte während einer Motorradfahrt werden in Abbildung 2-4 gezeigt.

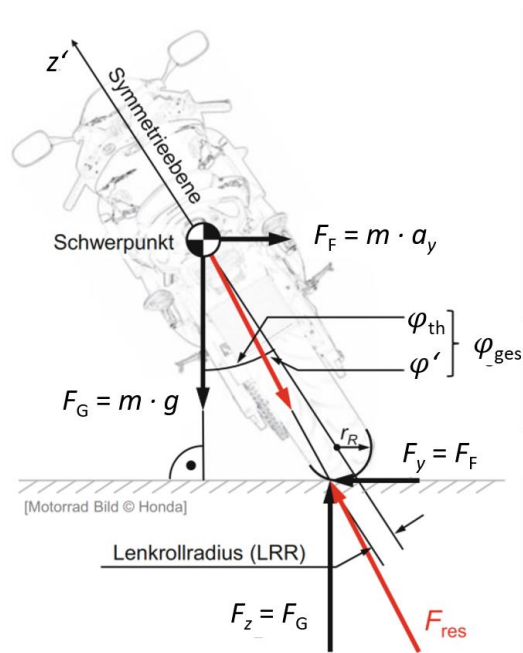


Abbildung 2-4: Kräftegleichgewicht bei der Motorradfahrt, Vereinfachung durch Modellierung des Aufsassens als Starrkörper ohne Relativbewegung zum Fahrzeug²⁹

Das System befindet sich nur dann in einer Gleichgewichtslage, wenn kein Rollmoment um die Radaufstandslinie (Verbindungsline zwischen Radaufstandspunkten an Vorder- und Hinterrad) vorliegt, also wenn die Resultierende aller auf den Schwerpunkt des Fahrer-Fahrzeug-Systems wirkenden Kräfte die Radaufstandslinie schneidet. D.h. also, dass der Schwerpunkt im Stand oder der Geradeausfahrt genau vertikal über dieser Linie liegen muss, damit das System sich im Gleichgewicht befindet. Daraus folgend erfordert die Kurvenfahrt mit einem Einspurfahrzeug den Aufbau eines Rollwinkels. Abbildung 2-4 zeigt die wirkenden Kräfte während einer stationären Kreisfahrt. Neben der Gewichtskraft F_G wirkt hier auch die Fliehkraft F_F . Aus Fliehkraft und Gewichtskraft resultiert mit der Systemmasse m , der Querbewegung a_y und der Erdbeschleunigung g der physikalische Rollwinkel φ_{th} gemäß Formel (2-1)³⁰.

$$\varphi_{th} = \tan^{-1} \frac{F_F}{F_G} = \tan^{-1} \frac{m \cdot a_y}{m \cdot g} = \tan^{-1} \frac{a_y}{g} \quad (2-1)$$

Dieses sogenannte labile Gleichgewicht ist sehr störanfällig. Vergleichbar mit einem inversen Pendel findet es bei kleinsten Auslenkungen nicht mehr alleine in seine Gleichgewichtslage zurück. Um ein (Um-)Kippen zu verhindern, muss das System stabilisiert werden. Das geschieht beim Motorradfahren durch verschiedene Mechanismen³⁰.

²⁹ Quelle: Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015), S. 769. (Formelzeichen angepasst)

³⁰ Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015), S. 768 f.

Im Niedriggeschwindigkeitsbereich bis ca. 30 km/h erfolgt die Stabilisierung durch Lenkeingaben. Diese erfolgen in erster Linie durch Lenkeinschläge, die neben einem Aufbau von Seitenkräften zu einer Verschiebung der Verbindungslinie der Radaufstandspunkte führt. Ferner kann das Balancieren durch eine Verschiebung des Fahrerschwerpunkts relativ zum Fahrzeug unterstützt werden.

Mit steigender Fahrgeschwindigkeit wird die Stabilisierung zunehmend durch die Kreiselwirkung der rotierenden Massen übernommen. Den wesentlichen Anteil hat hier das rotierende Vorderrad. Der Übergang zwischen den beiden Bereichen (Stabilisierung durch Lenkeingaben und Stabilisierung durch Kreiselkräfte) geschieht fließend.

2.2.1.2 Fahrereinfluss

Nicht nur aufgrund seiner Stabilisierungsaufgabe besitzt der Fahrer einen erheblichen Einfluss auf das System. Hierfür ist unter anderem sein großer Anteil an der Gesamtsystemmasse verantwortlich. Der Fahrer kann einen Anteil von über einem Drittel der Masse des Gesamtsystems besitzen. Im Fall von sehr leichten Fahrzeugen, z.B. Geländemotorrädern, kann der Anteil bis über die Hälfte ansteigen.

Auch die Anbindung des Fahrers an das Fahrzeug unterscheidet sich zu der im Pkw. Der Fahrer eines Motorrads fungiert als Koppelglied zwischen dem Hauptrahmen des Fahrzeugs und dem Lenksystem. Durch Veränderung seiner Position relativ zum Motorrad (und somit seiner Abstützung am Fahrzeug) wirkt er auf den Rahmen ein, durch Lenkeinschläge auf das Lenksystem. Beide Bewegungen sind kaum gänzlich voneinander trennbar. Durch die zusätzliche Kopplung von Rahmen und Lenksystem entsteht eine komplexe Wechselwirkung³¹ („Lenk-Roll-Kopplung“, Abbildung 2-5). Entsprechend hat der Fahrerkörper als integraler Systembestandteil einen wesentlich direkteren Einfluss auf das Fahrzeug, als es beim Pkw der Fall ist.

³¹ Pleß, R. et al.: Manöverumsetzung auf Motorrad Fahrsimulator (2016).

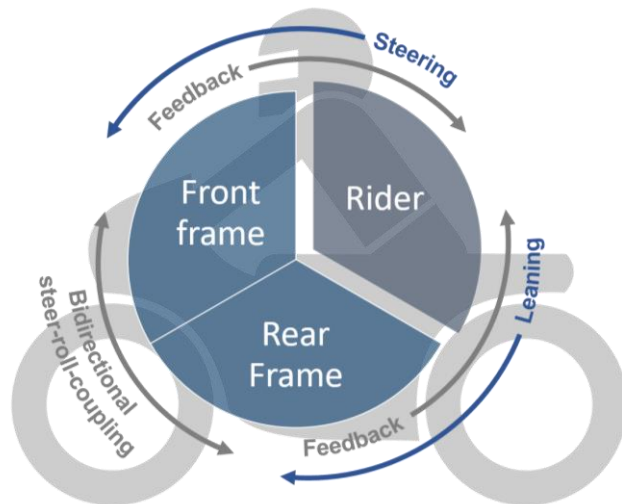


Abbildung 2-5: Motorradfahrer als integraler Bestandteil des Fahrer-Fahrzeug-Systems³²

Die Art der Anbindung an das Fahrzeug birgt im Hinblick auf automatische Notbremsmanöver eine weitere Herausforderung: Im Gegensatz zu Pkw sind Motorräder nicht mit einem Rückhaltesystem (Sicherheitsgurt) ausgestattet, das den Fahreroberkörper im Fall einer starken Verzögerung abfängt und weitestgehend in Position hält. Der Fahrer eines Motorrads muss die trägheitsbedingte Vorverlagerung seines Körpers selbst über Körperspannung und/oder Abstützen an der Lenkstange abfangen.

Die beschriebenen Besonderheiten in der Anbindung des Fahrers an das Fahrzeug und der Fahrer-Fahrzeug-Kopplung werden im Rahmen eines Notbremsmanövers insbesondere dann entscheidend für die Kontrollierbarkeit des Eingriffs, wenn durch einen überraschenden Eingriff eine unerwünschte Reaktion des Fahrers ausgelöst wird. Es besteht die Gefahr, dass der Fahrer nicht mehr in der Lage ist, seiner Stabilisierungsaufgabe nachzukommen, oder dass er das System durch eine unwillkürliche falsche Reaktion sogar bis hin zum Sturz destabilisiert.

2.2.1.3 Bremsstabilität

Auch die Bremsmanöver selbst unterscheiden sich aus fahrdynamischer Sicht bedingt durch die Fahrzeuggeometrie des Motorrads und das einspurpezifische Verhalten von denen im Pkw.

Der hierfür entscheidende geometrische Unterschied liegt im Verhältnis zwischen Schwerpunkthöhe und Radstand. Dieses ist beim Motorrad bedeutend größer als beim Pkw. Daraus resultiert eine stärkere Radlastverschiebung während der Verzögerung. Zusammen mit modernen Reifen, die einen Reibwert von $\mu \geq 1$ zwischen Reifen und Fahrbahn

³² Eigene Darstellung nach Pleß, R. et al.: Manöverumsetzung auf Motorrad Fahrsimulator (2016).

ermöglichen, kann es zum Abheben des Hinterrads und damit zum Erreichen des Bremsüberschlagspunkts kommen. Somit wird die Verzögerung häufig nicht durch Reifen und Bremssystem, sondern durch die Fahrzeuggeometrie (Schwerpunktlage) begrenzt³³.

Durch den gleichen Effekt ergibt sich eine ideale Bremskraftverteilung für Motorräder, die sich in ihrer Charakteristik von der von Pkw unterscheidet. Trägt man die Bremskraft am Hinterrad über die Bremskraft am Vorderrad (jeweils bezogen auf die Gewichtskraft des Fahrzeugs) auf, schneidet die sich ergebende Kurve des Motorrads die x-Achse bereits nahe 1, was einer Verzögerung von 1 g entspricht, siehe Abbildung 2-6. Höhere Bremskräfte könnten nur noch mit abhebendem Hinterrad und somit in einem instabilen Fahrzustand realisiert werden³³.

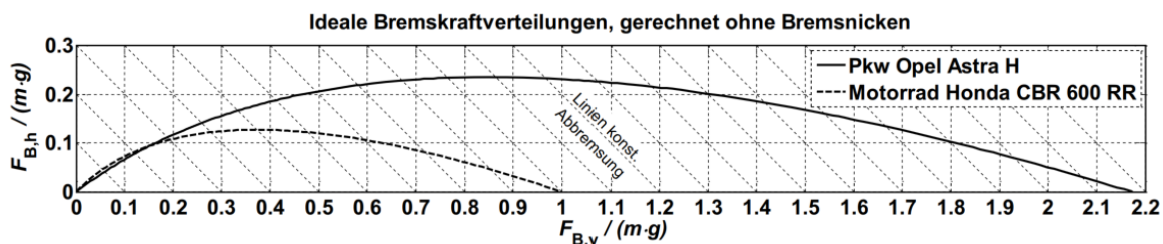


Abbildung 2-6: Ideale Bremskraftverteilung für Pkw und Motorrad im Vergleich³⁴

Eine weitere Gefahr für die Stabilität des Fahrzeugs während des Bremsvorgangs liegt in der Vorderradblockade. Durch ein Blockieren des Vorderrads kommt es zu einer Unterbrechung der stabilisierenden Kreiselwirkung. Hinzu kommt die kinematische Instabilität des Fahrzeugs. Bereits bei kleinen Schwimm- oder Rollwinkelauslenkungen kommt es zu einer Selbstverstärkung der Gier- oder Rollbewegung. Das blockierte Rad (Schlupf $s = 1$) überträgt nur noch eine durch den Gleitreibwert μ_{gleit} und die Radlast bestimmte Kraft entgegen seiner Bewegungsrichtung, jedoch keine Seitenführungskraft mehr. Besitzt die wirkende Kraft einen Hebelarm um den Fahrzeugschwerpunkt, wie es durch die genannten Schwimm- bzw. Rollwinkelauslenkungen der Fall ist, kommt es zu einer Schwimm- oder Gierdrehung. Wird dadurch der Hebelarm vergrößert, liegt eine instabile Bewegung vor. Bedingt durch die Tatsache, dass das Motorrad als instabiles System ständig durch Kreiselwirkung und Lenkbewegungen stabilisiert wird, liegt immer eine anliegende Querkraft in den Radaufstandspunkten vor. Dadurch bewirkt jede Bremskraft am Vorderrad eine selbstverstärkende Gierbewegung. Unter Blockade des Vorderrads und damit einhergehendem Wegfall der Kreiselstabilisierung kommt es unweigerlich zum Sturz³³. Die Instabilitäten von Gier- und Rollbewegung werden in Abbildung 2-6 verdeutlicht.

³³ Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015), S. 772 f.

³⁴ Quelle: Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015), S. 773.

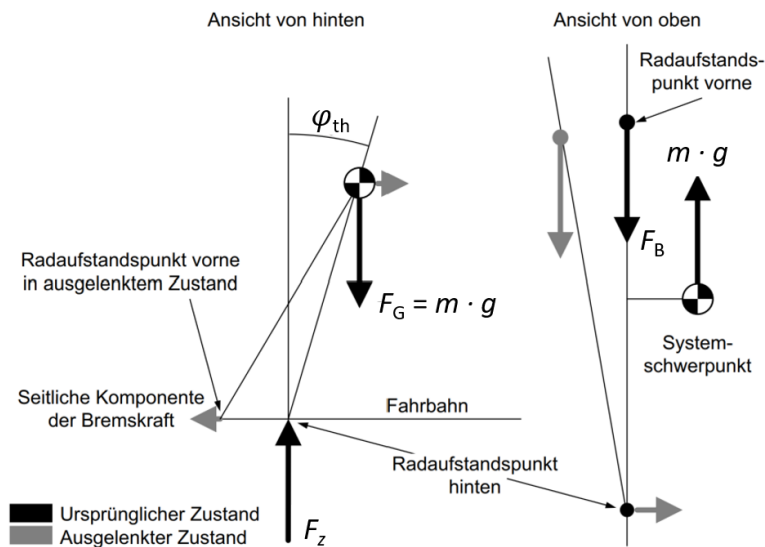


Abbildung 2-7: Kinematische Instabilitäten von Gier- und Rollbewegung des Motorrads³⁵

Die beschriebenen Effekte der Bremsstabilität müssen bei der Entwicklung und Auslegung eines MAEB beachtet werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein Motorrad, das mit einem solchen System ausgestattet ist, auch weitere Fahrdynamikregelsysteme besitzt, die die genannten Effekte schon adressieren, wie bspw. ein schräglagentaugliches ABS, das für einen automatischen Bremsengriff unter Rollwinkel notwendig wäre.

Ein weiterer Effekt, der ebenfalls auf die Kurvenfahrt unter Rollwinkel zurückzuführen und für automatische Bremsungen mit dem Motorrad nicht zu vernachlässigen ist, ist das sogenannte Bremslenkmoment. Die Lenkachse eines Motorrads verläuft durch die Symmetrieebene des Vorderrads. Unter Rollwinkel findet die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn jedoch außerhalb dieser Ebene, um den Lenkrollradius versetzt statt (siehe Abbildung 2-8). Der Aufbau von Bremskraft am Vorderrad bewirkt also ein Moment um die Lenkachse, das zu einem Eindrehen des Lenksystems nach Kurveninnen führt. Wirkt der Fahrer diesem Moment nicht (ausreichend) entgegen, stellt das Fahrzeug sich durch den Einfluss der Kreiselwirkung (Kopplung von Lenk- und Rollbewegung) auf und es kommt zu einem Verlassen der geplanten Trajektorie³⁶. Da der Aufbau des Bremslenkmoments nahezu ohne Zeitverzug zum Bremsdruckaufbau erfolgt³⁷, bleibt dem Fahrer wenig Reaktionszeit, um dem Verlassen der Trajektorie entgegenzuwirken. Im Fall eines (überraschenden) Notbremsengriffs bedeutet das, dass der Eingriff so zu gestalten ist, dass keine neue kritische Situation durch eine Trajektorienänderung provoziert wird. Das kann

³⁵ Quelle: Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015), S. 772. (Formelzeichen angepasst)

³⁶ Schröter, K. et al.: Bremslenkmomentoptimierte Kurvenbremsung (2013), S. 437.

³⁷ Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015), S. 771.

bspw. erreicht werden, indem der Notbremseingriff schwerpunktmäßig über das Hinterrad erfolgt.

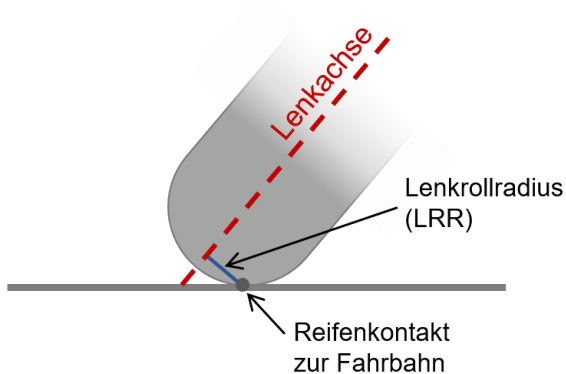


Abbildung 2-8: Lenkrollradius, der bei Bremsung zu einem nach kurveninnen drehenden Moment um die Lenkachse führt

2.2.2 Potential

Die ersten Arbeiten der MAEB-Forschung analysieren das Potential und den damit erreichbaren Sicherheitsgewinn durch Motorrad-Notbremssysteme. So wurden bspw. im Projekt PISa (Powered Two-wheelers Integrated Safety, 2006-2010) erfolgversprechende Assistenzsysteme für ein integriertes Fahrzeugsicherheitskonzept ermittelt^{38 a}. Hierzu wurden aus verschiedenen Unfalldatenbanken relevante (häufigste und schwerste Unfallarten) Fälle extrahiert, die in einer Matrix potentiellen Sicherheitssystemen gegenübergestellt wurden. In dieser Matrix wurde durch Experten eine Bewertung vorgenommen, inwiefern durch die jeweiligen Systeme ein Sicherheitsgewinn für die einzelnen Unfälle zu erwarten ist. Aus der Bewertungsmatrix wird eine priorisierte Liste von Assistenzsystemen abgeleitet, die für ein integriertes Fahrzeugkonzept als vielversprechend angesehen werden^{38b}. In dieser Liste steht das MAEB vor Warnsystemen und weiteren Bremssystemen (EBS – Enhanced Braking System, CBS – Combined Braking System und ACC an erster Stelle^{38c}.

Die DEKRA analysiert in ihrem „Verkehrssicherheitsreport Motorrad“^{39a} unter anderem den Sicherheitsgewinn durch den Einsatz von ABS im Motorrad. Aus einer Simulationsstudie auf Basis von 87 dokumentierten Motorradunfällen geht hervor, dass durch eine Ausstattung mit ABS 25 bis 35 % der betrachteten Unfälle vermeidbar gewesen wären, durch den Einsatz eines Integralbremssystems durch schnelleres Ansprechen sogar 50 bis 60 %^{39b}. Das zeigt, dass bereits durch moderne Bremssysteme unfallverursachende Bremseffekte, wie z.B. die Vorderradblockade, vermieden und ein erheblicher Sicherheitsgewinn erzielt werden

³⁸ Grant, R. et al.: PISa (2008). a: -; b: S. 333 f.; c: S. 334 f.

³⁹ DEKRA: Verkehrssicherheitsreport Motorrad 2010 (2010). a: -; b: S. 41; c: S. 42 f.

können. Die Autoren kommen aber auch zu dem Schluss, dass zu lange Anhaltewege häufig aus einem zu zaghaften Bremsen resultieren. Zudem geht Potential zur Verkürzung des Anhaltewegs durch die Reaktionszeit des Fahrers verloren. Als Konsequenz wird ein Bremsassistent (PBA - Predictive Brake Assist) empfohlen, der durch frühzeitiges Erhöhen des Bremsdrucks die Schwellzeit der Bremsanlage verkürzt und den vom Fahrer gestellten Bremsdruck erhöht^{39c}.

Ebenfalls basierend auf Unfalldaten der DEKRA zeigen Roll et al. den Sicherheitsgewinn durch verschiedene Bremsregelsysteme. Neben den bekannten Systemen ABS und Integralbremse werden hier auch auf Umfeldsensorik basierende Systeme einbezogen, die ohne Fahrerreaktion selbsttätig bremsen können^{40a,41a}. Die Autoren analysieren das typische Verhalten von Motorradfahrern in Schrecksituationen bei der Nutzung konventioneller Bremssysteme^{41b} und stellen dem berechnete Verläufe mit potentiellen Bremsregelsystemen gegenüber, siehe Abbildung 2-9.

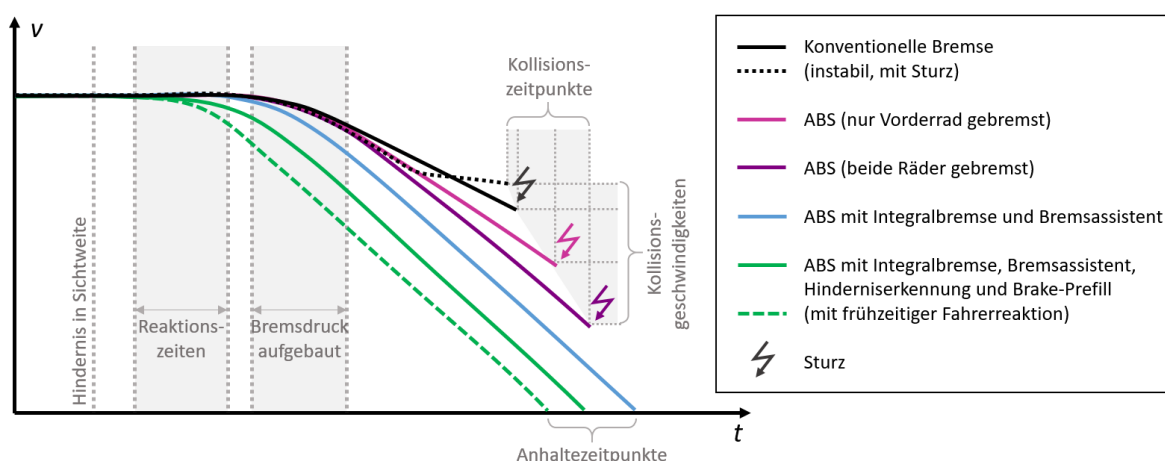


Abbildung 2-9: Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsverläufe bei Schreckbremsung mit verschiedenen Bremsregelsystemen und mit herkömmlicher Bremsanlage⁴²

Im Ergebnis der Simulationen zeigt sich, dass mit der höchsten untersuchten Systemausprägung (ABS, Integralbremse, Brake-Assist und Pre-Fill) 39 von 51 Kollisionen verhindert worden wären. Bei den nicht verhinderten Unfällen betrug die Kollisionsgeschwindigkeit im Mittel noch 7,82 km/h, was bedeutet, dass im Vergleich zu den Originaldaten (53,12 km/h) eine Reduktion der Kollisionsenergie auf durchschnittlich verbleibende 2,17 % erreicht wird. Die weiteren Ergebnisse sind in Tabelle 2-4 zusammengefasst. Damit zeigen die Autoren auch hier das große Potential moderner Bremsregelsysteme schon ohne automatisches Notbremssystem.

⁴⁰ Roll, G. et al.: Effectiveness of ABS for Motorcycles (2009). a: -; b: S. 11

⁴¹ Roll, G.; Hoffmann, O.: Sicherheitsgewinn durch Bremsenregelsysteme (2010). a: -; b: S. 434 ff.

⁴² Darstellung nach Roll, G. et al.: Effectiveness of ABS for Motorcycles (2009), S. 11.

Tabelle 2-4: Ergebnisse der Gegenüberstellung verschiedener Bremsregelsysteme hinsichtlich Unfallverhinderung und Minderung der Unfallfolgen^{40b}

	Kein Bremsregelsystem, Originaldaten	ABS, Bremsung am Vorderrad	ABS, beide Räder gebremst (Hinterrad verzögert)	ABS, beide Räder zeitgleich gebremst	ABS, Integralbremse und Brake-Assist	ABS, Integralbremse, Brake-Assist und Automatic Pre-Fill
Anzahl der verhinderten Unfälle (von 51)	0	12	17	27	29	39
Fälle mit deutlich geminderten Unfallfolgen (von 51)	0	10	11	2	4	7
Mittlere Kollisionsgeschwindigkeit in km/h	53,12	34,93	27,66	22,45	18,92	12,68
Kinetische Energie bezogen auf die Originaldaten	100 %	43,23 %	27,11 %	17,87 %	12,68 %	2,17 %

Auch Hummel von der UDV untersuchte im Rahmen des Projekts „Fahrerassistenzsysteme“ (2007-2010) im Auftrag der Kommission Kraftfahrt Schadenverhütung des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) das Sicherheitspotential von FAS. Neben Pkw, Lkw und Bussen werden hier auch motorisierte Zweiräder betrachtet. Auf Basis von dem GDV gemeldeten Kraftfahrzeug-Haftpflicht-Schadensfällen wird hier in einem Hochrechnungsfall das Sicherheitspotential verschiedener FAS für die einzelnen Fahrzeugklassen in einem mehrstufigen Verfahren ermittelt^{43a}. Als Fazit des Projekts zeigt sich über alle betrachteten Systeme hinweg, dass allgemein eine positive Beeinflussung des Schaden- bzw. Unfallgeschehens durch moderne FAS zu erwarten ist^{43b}. Aber auch für Motorräder im Speziellen prognostiziert der Autor einen zu erwartenden Sicherheitsgewinn durch FAS und nennt hierbei insbesondere das Notbremssystem als vielversprechende Perspektive^{43c}.

Alle vorgestellten Arbeiten bestätigen, dass aktive Bremssysteme für Motorräder einen Sicherheitsgewinn in relevanten Unfallszenarien im Hinblick auf die Minderung der Unfallschwere bis hin zur Unfallvermeidung bieten könnten und motivieren damit weitere Forschung auf dem Gebiet. Schröter et al. zeigen jedoch auf, dass bei allem Potential eines Bremssystems selbst die Fahrer-Fahrzeug-Kopplung und damit fahrdynamische

⁴³ Hummel, T. et al.: Ermittlung des Sicherheitspotentials (2011). a: S. 7 ff.; b: S. 55; c: S. 46

Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Regelsystem nicht außer Acht gelassen werden dürfen⁴⁴.

2.2.3 Fahrerreaktion

Durch die Rolle des Fahrers als integraler Systembestandteil und wesentlicher Faktor für die Stabilisierung des Fahrzeugs ist seiner Reaktion auf automatische Eingriffe bei der Entwicklung und Auslegung von MAEB besondere Beachtung zu schenken. Auch hier gibt es in den bekannten Vorarbeiten bereits Betrachtungen.

Im Rahmen des bereits in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten Projekts PISa wurde so bspw. untersucht, ob die Stabilität des auf dem Motorrad sitzenden Fahrers durch eine unerwartete Verzögerung negativ beeinflusst wird. Die Untersuchungen fanden unter Laborbedingungen statt. Dazu wurde ein Motorrad-Mockup auf ein Schlittensystem montiert. Das Mockup ist über einen Umlenkmechanismus mit einer Masse verbunden. Durch das Fallenlassen dieser Masse wird eine Bewegung entgegen der Blickrichtung des auf dem Mockup sitzenden Probanden ausgelöst. Der Aufbau ist in Abbildung 2-10 dargestellt. Die Rückwärtsbewegung aus dem Stillstand simuliert eine plötzlich auftretende Verzögerung aus der Konstantfahrt^{45 a}. Hierbei werden durchschnittliche rückwärts gerichtete Beschleunigungen von $0,35 g$ erreicht^{45 b}.

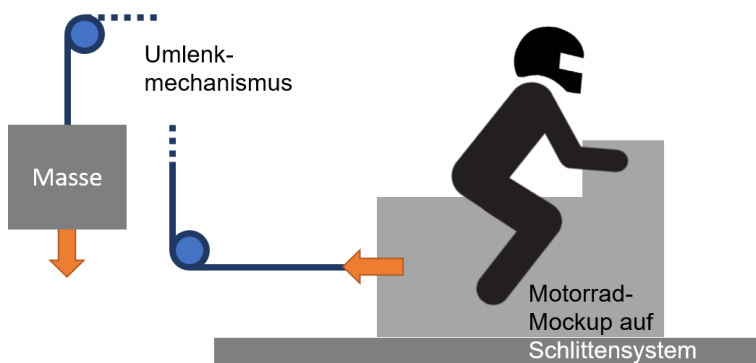


Abbildung 2-10: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus beim Labortest zur Fahrerreaktion bei unvorhergesehenen Verzögerungen

In der Studie wurden drei verschiedene Szenarien untersucht:

- durch den Fahrer selbst hervorgerufene Verzögerung (Trigger über Bremshebel)
- extern ausgelöste Verzögerung mit vorheriger Warnung des Fahrers (Warnung durch Vibration 300 ms vor der Verzögerung)

⁴⁴ Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015), S. 786.

⁴⁵ Symeonidis, I. et al.: Stability of PTW riders (2012). a: S. 213; b: S. 216; c: S. 215, d: S. 216 ff.

- extern ausgelöste Verzögerung ohne Warnung^{45c}

Die Stabilität der Fahrer wurde durch 3D-Rekonstruktion der Oberkörperbewegung anhand gemessener Beschleunigungsdaten bewertet. Als Kriterien werden insbesondere die horizontale Verschiebung des Kopfes in Fahrtrichtung, die horizontale Verschiebung des Brustbeins in Fahrtrichtung sowie die (Nick-)Rotation des Kopfes herangezogen. Basierend auf einer Stichprobe von acht Probanden (je 2x Fahrerbremsung, 3x extern ausgelöste Verzögerung mit Warnung, 2x extern ausgelöste Verzögerung ohne Warnung) kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass die Körperbewegung, die als Reaktion auf die Verzögerung folgt, sich zwischen den verschiedenen Szenarien nicht signifikant unterscheidet und ziehen daraus den Schluss, dass eine leichte automatische Verzögerung (hier 0,35 g) sich nicht in relevantem Maß negativ auf die Stabilität des Fahrers in seiner Sitzposition auf dem Fahrzeug auswirkt^{45d}.

Ebenfalls im PISa-Projekt wurden über die Laborversuche hinaus Realfahrversuche durchgeführt. Hierbei stand nicht die körperliche Fahrerreaktion im Fokus. Der Kern der Studie besteht in einer Subjektivbewertung verschiedener Auslösezeitpunkte. Die Probanden fahren dabei mit einer Zielgeschwindigkeit von 10 m/s auf eine Mauer aus Schaumstoffklötzen zu, die ein stehendes Hindernis symbolisieren^{46a}. Das prototypische MAEB wird ausgelöst, wenn eine bestimmte Verzögerung überschritten ist, die nötig wäre, um eine Kollision noch zu verhindern. Die untersuchten Triggerpunkte liegen bei einer Überschreitung von 3, 5, 7 und 9 m/s² notwendiger Verzögerung. Die ausgelöste automatische Verzögerung liegt bei ca. 3 m/s²^{46a}. Die Probanden bewerten anschließend den Auslösezeitpunkt auf einer Skala von 0 (viel zu früh) bis 100 (viel zu spät). Eine Auslösung zum für den Fahrer als korrekt wahrgenommenen Zeitpunkt würde also eine Bewertung von 50 erhalten. Diese Bewertung wird nahezu erreicht, wenn die Auslösung zu einem Zeitpunkt erfolgt, zu dem eine mittlere Verzögerung von 5 m/s² nötig wäre, um die Kollision zu verhindern, was mit dem im Versuch genutzten System (Verzögerung 3 m/s²) jedoch nicht realisierbar ist. Das Gesamtergebnis der Bewertung ist in Tabelle 2-5 zusammengefasst.

Tabelle 2-5: Bewertung verschiedener Auslösezeitpunkte eines prototypischen MAEB durch Probanden, Skala von 0 (viel zu früh) bis 100 (viel zu spät)^{46b}

	Auslösepunkt			
	3 m/s ²	5 m/s ²	7 m/s ²	9 m/s ²
Mittlere Bewertung des Auslösezeitpunkts	28,8	48,8	77,5	83,3

Außerdem wird im Fazit erwähnt, dass die Verzögerungen von allen Testpersonen toleriert und als kontrollierbar wahrgenommen wurden. Hiermit ist ein erster Hinweis auf die Akzeptanz von MAEB für die hier genutzten schwachen Verzögerungen (ca. 3 m/s²)

⁴⁶ Savino, G. et al.: Decision logic of MAEB (2012). a: S. 1032, b: S. 1033

gegeben. Die Erkenntnis unterliegt allerdings der Einschränkung, dass es sich um „skilled riders“^{46b}, also geübte Fahrer (keine nähere Angabe zu den Kriterien), handelt, die bewusst auf ein stehendes Hindernis zufahren und somit den Eingriff erwarten. Die Ergebnisse sind also ggf. nicht auf alle Fahrer (ungeübte einschließend) übertragbar, vor allem dann nicht, wenn diese von einem automatischen Bremseneingriff überrascht werden.

Eine weitere Untersuchung aus dem gleichen Autoremfeld wurde mit Normalfahrern, also Probanden, an die keine besonderen Anforderungen bezüglich ihrer Fahrerfahrung gestellt wurden, durchgeführt^{47a}. Hier kam ein Fahrzeug zum Einsatz, bei dem eine automatische Verzögerung durch ferngesteuertes Schließen der Drosselklappe („Motorbremse“) erreicht wird^{47b}. Die so erreichten Verzögerungen liegen bei durchschnittlich etwa $1,5 \text{ m/s}^2$ ^{47c}. Während der Versuchsfahrten fuhren die Probanden mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit die Versuchsstrecke (Geradeausfahrt) entlang. Innerhalb eines bestimmten Bereichs wurde an einer für den Fahrer unbekannt Stelle die Verzögerung ausgelöst. Der Fahrer wusste also, dass eine Verzögerung erfolgen kann, aber nicht, an welcher Stelle genau. Die Auslösung erfolgte bei ca. 50 % der Fahrten, so dass es auch immer wieder zu Läufen ohne automatische Verzögerung kam. Die Fahrerreaktion wurde hier mit am Fahrzeug montierten und extern aufgestellten Kameras aufgezeichnet, außerdem erfolgte eine Subjektivbewertung^{47d}. Als Ergebnis wird festgehalten, dass kein relevanter Kontrollverlust durch die automatischen Eingriffe beobachtet wird. Die Videos zeigen eine kurze Vorverlagerung des Oberkörpers und eine daraus folgende Kopfbewegung. Teilweise werden kleine Lenkbewegungen beobachtet, die jedoch als nicht weiter relevant eingestuft werden. In einer abschließenden Subjektivbewertung ordneten die Probanden den Aufwand zum Kontrollieren des Fahrzeugs während des Eingriffs auf einer Skala von 0 („absolutely no effort“ – kein Aufwand) bis 10 („extreme effort“ – extrem hoher Aufwand) ein. Als Ergebnis wird im Durchschnitt eine Bewertung von 2,2 (geringer Aufwand) erreicht^{47c}.

Auch wenn die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass die Stabilität von Motorradfahrern auf dem Fahrzeug durch automatische Eingriffe nicht in einem kritischen Maß negativ beeinflusst wird und dass die Eingriffe im Allgemeinen akzeptiert und als kontrollierbar wahrgenommen werden, haben die Untersuchungen gemein, dass sie mit eher niedrigen Verzögerungswerten ($1,5$ bis $3,5 \text{ m/s}^2$) arbeiten und keine realistischen Szenarien zeigen. In allen Fällen ist den Probanden bekannt, dass das Fahrzeug automatisch verzögert wird, wenn auch nicht zu welchem Zeitpunkt. Auch die Fahrsituationen (bewusstes Zufahren auf ein stehendes Hindernis, gebremst werden bei freier Geradeausfahrt) bilden nicht den realistischen Einsatzfall von MAEB dar. Es bleibt also das „natürliche“ Fahrerverhalten zu untersuchen, das zu erwarten ist, wenn der Fahrer nicht vorgewarnt ist und tatsächlich unerwartet mit einer Notbremssituation konfrontiert wird, die das Eingreifen eines MAEB erfordert.

⁴⁷ Savino, G. et al.: Acceptability of unexpected decelerations (2016). a: -; b: S. 3; c: S. 5; d: S. 5

2.2.4 Technische Umsetzung

Auf technischer Seite setzt ein MAEB verfügbare Lösungen in drei Bereichen voraus. Eine geeignete Umfelderkennung wird benötigt, um Objekte in der Umgebung zu detektieren. Die gesammelten Informationen müssen verarbeitet werden, um die Notwendigkeit einer Notbremsung zu erkennen und mittels einer geeigneten Auslöselogik den automatischen Bremseneingriff zu initiieren. Zur Umsetzung des Eingriffs ist es erforderlich, ohne Zutun des Fahrers die Bremsen aktivieren zu können.

Umfelderfassung

Hinsichtlich der Sensorik gibt es bereits Lösungen verschiedener Hersteller zur Realisierung von Assistenzfunktionen. So setzt bspw. die Robert Bosch GmbH als Zulieferer „Mittelbereichsradarsensoren“ für Front- und Heckanwendungen ein, um Funktionen wie ACC, Kollisionswarner und Totwinkelassistenten zu realisieren⁴⁸. Auch Continental bietet unter dem Begriff „ARAS“ (Advanced Rider Assistance Systems) ähnliche Assistenzsysteme (z.B. „Intelligenter Abstandsregeltempomat“⁴⁹) an, die auf einem Long Range Radar Sensor basieren. Auf Seiten der Motorradhersteller haben bspw. BMW und KTM bereits Modelle, die mit ACC und somit mit entsprechender Sensorik (Radar, Inertialmesseinheit – IMU) ausgestattet sind, auf dem Markt^{50,51}.

Aktorik/Beeinflussung der Fahrdynamik

Diese auf dem Markt befindlichen Systeme erfordern neben den notwendigen Sensordaten außerdem die Möglichkeit, in die Längsdynamik des Fahrzeugs einzugreifen. Die Eingriffe finden dort statt, wo auch für die Realisierung einer MAEB Einfluss genommen werden muss. Zugriff auf das Bremssteuergerät ermöglicht den Aufbau von Bremsdruck, um das Fahrzeug zu verzögern, gleichzeitig kann per Motorsteuerung die Drosselklappenstellung angepasst werden⁵².

Bei den genannten Systemen werden zwar Eingriffe in die Längsdynamik vorgenommen, die Stabilisierungsaufgabe liegt aber weiter vollständig beim Fahrer. Dass es grundsätzlich möglich ist, ein Motorrad vollständig automatisiert zu steuern und gleichzeitig zu stabilisieren, zeigen verschiedene Hersteller mit selbstfahrenden Motorrädern. So stellte z.B. Honda auf der Consumer Electronics Show 2017 in Las Vegas den „Honda Moto Riding Assist vor“. Das Konzeptmotorrad ist in der Lage, sich im Stillstand und bei fahrerloser Fahrt

⁴⁸ Robert Bosch GmbH: Radarbasierte Assistenzsysteme (2020).

⁴⁹ Continental Teves AG & Co.oHG: Abstandsregeltempomat (2021).

⁵⁰ BMW Group: BMW ACC Pressematerial (2020).

⁵¹ KTM Sportmotorcycle GmbH: Super Adventure Pressematerial (2021).

⁵² Pfeiffer, C.: Motorrad-Notbremsassistent (2019), S. 67.

im Niedriggeschwindigkeitsbereich selbst zu stabilisieren⁵³. Auch Yamaha („Motobot“ – humanoider Roboter steuert das Fahrzeug⁵⁴) und BMW (menschliche Stellgrößen – Gas geben, bremsen, lenken, schalten, kuppeln – werden über Aktoren nachgestellt⁵⁵) haben bereits selbstfahrende Motorräder präsentiert.

Den beschriebenen selbstfahrenden Fahrzeugkonzepten folgend sind aktive Eingriffe in die Fahrdynamik inklusive der Stabilisierung des Fahrzeugs also durchaus möglich. In den gezeigten Beispielen handelt es sich jedoch um Fahrzeuge, die rein maschinell gesteuert sind. Ein Zusammenspiel mit einem Fahrer, der zusätzliche Eingaben macht (und damit ggf. sogar einen Störfaktor hinsichtlich der Stabilisierung darstellt), ist damit nicht abgedeckt.

Inwiefern ein MAEB neben Eingriffen in die Längsdynamik auch die Möglichkeit zur Fahrzeugstabilisierung im Zusammenspiel mit dem Fahrer bieten muss, ist zu klären.

Auslöselogik

Um aus den erfassten Umfelddaten die Notwendigkeit eines Eingriffs abzuleiten und diesen mit Hilfe der entsprechenden Aktorik einzuleiten, ist eine Auslöselogik nötig. Auch in diesem Bereich gibt es forschungsseitig umfangreiche Vorarbeiten. So diskutieren beispielsweise Kuschefski et al., unter welchen Voraussetzungen ein Notbremsmanöver einzuleiten und in welchen Fällen ein Ausweichmanöver zu bevorzugen ist (für Motorräder allgemein)⁵⁶. Mit der gleichen Fragestellung beschäftigen sich auch Giovannini et al. (MAEB-spezifisch)⁵⁷. Auch im zuvor beschriebenen Projekt PISA werden Logiken zu Aktivierung von MAEB, Auslösung von Warnungen und Übersteuerung durch den Fahrer diskutiert⁵⁸.

Darüber hinaus sind aus dem Pkw-Bereich bewährte Eingriffsstrategien bekannt, die eine Basis für motorradspezifische Modifikationen bilden können.

2.2.5 Patente

Neben den Vorarbeiten in der Forschung bestehen verschiedene Patente zu MAEB, bspw. für ein automatisches Notbremssystem mit Fahrerwarnung⁵⁹ oder ein radarbasiertes Not-

⁵³ Honda Deutschland: Honda Moto Riding Assist (2017).

⁵⁴ Yamaha Motor Co., Ltd.: What is Motobot? (2015).

⁵⁵ Hans, S. et al.: Motorradsicherheit durch Automatisierung (2018), S. 201.

⁵⁶ Kuschefski, A. et al.: Bremsen oder Ausweichen (2016).

⁵⁷ Giovannini, F. et al.: Minimum swerving distance for MAEB (2013).

⁵⁸ Savino, G. et al.: Decision logic of MAEB (2012).

⁵⁹ Chung, D.: Honda MAEB Patent (2017).

bremssystem von Harley Davidson mit Warnelementen und Überwachung des Fahrerzustands⁶⁰. Bis zur Fertigstellung der vorliegenden Arbeit ist jedoch von keinem Hersteller eine Umsetzung eines MAEB bekannt.

⁶⁰ Ginther, B. et al.: Harley MAEB Patent (2018).

3 Forschungsbedarf und Zielsetzung

Der Sicherheitsgewinn durch ein Notbremssystem basiert auf zwei Säulen. Zum einen kann die Phase, bis überhaupt eine Verzögerung einsetzt, verkürzt werden, wenn die Fahrerreaktion zu langsam ist, zum anderen wird die Verzögerungsstärke angepasst, wenn der Fahrer die Bremse nicht oder zu zaghaft betätigt, siehe Abbildung 3-1.

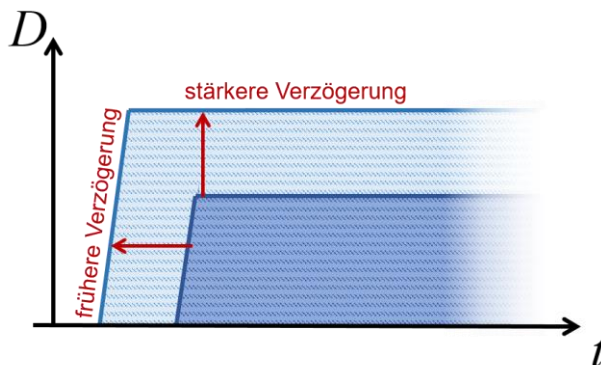


Abbildung 3-1: Ansätze zur Effektivitätssteigerung von Notbremssystemen

Um die Effektivität eines Notbremsmanövers zu maximieren, ist ein maximal möglicher Abbau von kinetischer Energie vor der Kollision anzustreben. Es gilt also zwei Ziele zu verfolgen:

- Möglichst schneller Aufbau der Verzögerung
- Maximierung der Verzögerung

Mit diesen beiden Schritten wird erreicht, dass die Fläche unter der Verzögerungskurve, die die abgebaute Geschwindigkeit (und damit kinetische Energie) repräsentiert, maximiert wird.

Bei allen Bestrebungen zur Maximierung des Geschwindigkeitsabbaus darf die Stabilität des Fahrer-Fahrzeug-Systems nicht außer Acht gelassen werden. Eingriffe müssen so ausgelegt werden, dass der Fahrer nach wie vor in der Lage ist, seiner Stabilisierungsaufgabe nachzukommen. Die Kontrollierbarkeit des Eingriffs durch den Fahrer begrenzt also dessen Gestaltung. Basierend auf den vorgestellten bisherigen Forschungsergebnissen ergibt sich der im Folgenden abgeleitete Forschungsbedarf.

3.1 Abgeleiteter Forschungsbedarf

Aus den bisherigen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der MAEB sind bereits viele wichtige Erkenntnisse vorhanden. So wurde das Potential von MAEB hinsichtlich eines Sicherheitsgewinns für Motorradfahrer ausführlich auf Basis von Unfalldatenbanken und Simulationen analysiert und nachgewiesen. In Laborversuchen wurde gezeigt, dass Fahrer

in ihrer Position auf dem Fahrzeug durch eine unvorhergesehene Verzögerung nicht maßgeblich destabilisiert werden und die leichten Verzögerungen (bis $3,5 \text{ m/s}^2$) tolerieren. Diese Vorkenntnisse wurden jedoch in eher synthetischen Versuchen (Schlittenversuch, bewusstes Zufahren auf ein stehendes Hindernis, automatische Bremsung in freier Geradeausfahrt mit über den Versuchszweck aufgeklärten Fahrern → Abschnitt 2.2.1.2) gewonnen. Es bleibt nachzuweisen, ob die Ergebnisse unter realistischen Bedingungen, also wenn Fahrer nicht mit einer Notbremssituation bzw. einem Eingriff rechnen, bestätigt werden.

Im Hinblick auf die Maximierung der Effektivität automatischer Notbremssysteme reicht die Erkenntnis, dass Fahrer schwache Verzögerungen kontrollieren können und diese akzeptieren, jedoch nicht aus. Es gilt die Grenze zu ermitteln, bis zu der automatische Notbremsmanöver für Motorradfahrer noch kontrollierbar sind, um das vorhandene Potential von MAEB voll ausschöpfen zu können. Zudem ist zu untersuchen, ob entsprechende Eingriffe für Fahrer nicht nur kontrollierbar sind, sondern von diesen nach wie vor akzeptiert werden. Ohne die Akzeptanz durch die Fahrer ist eine Etablierung von MAEB nicht realisierbar.

Um im Hinblick auf die Umsetzung von MAEB verwertbare Ergebnisse zu erhalten, reicht es nicht aus, wie in den meisten bekannten Arbeiten, vorgewarnte Fahrer mit automatischen Bremsmanövern zu konfrontieren. Es ist anzunehmen, dass Fahrer, die mit dem Eingriff rechnen (auch wenn sie nicht genau wissen, wann dieser erfolgt), nicht in gleicher Weise reagieren, wie solche, die die Situation unvorbereitet erleben. Für die Untersuchung, ob Motorradfahrer einen automatischen Bremsingriff kontrollieren und das Fahrzeug weiterhin stabilisieren können, kommen also nur Probanden in Frage, die vorher nicht über das Untersuchungsziel aufgeklärt werden.

Die Ermittlung maximal kontrollierbarer Verzögerungen zur Erzielung einer möglichst großen Effektivität des Eingriffs widerspricht diesem Bestreben, natürliche Fahrerreaktionen untersuchen zu wollen. Das Identifizieren von Kontrollierbarkeitsgrenzen bringt es mit sich, dass Eingriffe bis in kritische Bereiche gesteigert werden und birgt dabei die Gefahr von Kontrollverlusten, also Destabilisierung, ggf. sogar Stürzen, und ist somit aus ethischer Sicht nicht vertretbar.

Es gilt also ein geeignetes Vorgehen zu entwickeln, das die Ziele „Identifikation von Kontrollierbarkeitsgrenzen“ und „Untersuchung natürlicher Fahrerreaktionen“ voneinander entkoppelt und es so ermöglicht, beide Fragestellungen zu adressieren, ohne Probanden einer nicht vertretbaren Gefährdung auszusetzen.

3.2 Konkretisierung der Zielsetzung

Aus dem Forschungsbedarf leitet sich das Ziel ab, die Grenzen zu ermitteln, die die Kontrollierbarkeit durch den Fahrer der Anwendbarkeit von MAEB setzt. Nur wenn diese

Grenze bekannt ist, kann das Potential von MAEB innerhalb der Grenze ausgenutzt werden, ohne einen unnötig großen Abstand zu ihr zu halten.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll geklärt werden, wie ein geeigneter Eingriff gestaltet werden kann, damit er für den Fahrer kontrollierbar bleibt und trotzdem möglichst effektiv hinsichtlich einer Geschwindigkeitsreduktion ist. Dazu zählt neben der Höhe kontrollierbarer Verzögerungen insbesondere auch die Art und Weise, wie diese Verzögerungen aufgebaut werden. Daher wird untersucht, was einem unvorbereiteten Fahrer maximal zugemutet werden kann, ohne ihn zu überfordern. Dabei steht die Reaktion des Fahrers auf den für ihn überraschenden Eingriff im Fokus. Neben der Kontrollierbarkeit spielt auch die Akzeptanz eine Rolle.

Sind die Anwendbarkeitsgrenzen ermittelt, ist zu evaluieren, welches Sicherheitspotential ein automatischer Bremseneingriff innerhalb dieser Grenzen bietet.

Zusammengefasst soll die vorliegende Arbeit folgende Fragen beantworten:

- Wie sieht ein geeigneter Eingriff aus?
- Was kann dem Fahrer zugemutet werden? Was ist für den Fahrer kontrollierbar?
- Wie reagiert der Fahrer? Was akzeptiert der Fahrer?
- Welche Wirksamkeit wird erzielt, wenn ein Eingriff die Kontrollierbarkeits- und Akzeptanzgrenzen ausnutzt?

Zur Beantwortung der Fragen ist, wie im vorherigen Abschnitt bereits erläutert, ein geeignetes Vorgehen nötig, um die notwendigen Untersuchungen adäquat durchführen zu können, ohne dabei Fahrer Gefahren auszusetzen, die die üblichen Gefahren beim Motorradfahren übersteigen. Die Entwicklung der entsprechenden Methodik ist ein zentrales Element der Arbeit. Die erarbeitete Methodik wird im Rahmen der beschriebenen Untersuchungen auf ein konkretes prototypisches System angewendet, um ihre Anwendbarkeit nachzuweisen. Ziel ist jedoch, die Methode auch auf andere Motorradtypen übertragen zu können.

Die Fahrerreaktion steht klar im Fokus der vorliegenden Arbeit. Es geht darum, zu untersuchen, wie das Potential von MAEB hinsichtlich der durch den Fahrer gesetzten Grenzen voll ausgeschöpft werden kann. Die Arbeit befasst sich explizit nicht mit der Detektion von Situationen, die Notbremsmanöver erfordern, weder mit der dazu benötigten Sensorik noch mit den entsprechenden Auslöselogiken.

Es geht also nicht um die technische Umsetzung eines konkreten Systems, sondern darum, welche Grenzen der Entwicklung solcher Systeme durch das Zusammenspiel zwischen Fahrer und Fahrzeug gesetzt sind.

4 Untersuchungsmethodik

Wie zuvor beschrieben ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung von MAEB die Kontrollierbarkeit automatischer Bremsengriffe durch den Fahrer. Ziel der vorliegenden Arbeit ist, zu untersuchen, wann Eingriffe für Fahrer kontrollierbar sind und wie geeignete Eingriffe aussehen. Dabei wird für die Untersuchungen die Annahme getroffen, dass die Kontrollierbarkeit eines Eingriffs ein gewisses Maß an Bereitschaft zur Stabilisierung des Fahrzeugs während des sich ändernden Fahrzeugzustands beim Fahrer voraussetzt. Dabei handelt es sich bei dieser Bereitschaft für den Bremsengriff nicht notwendigerweise um eine bewusste Bereitschaft. Vielmehr muss der Fahrer sich in einem Zustand befinden, in dem eine – ggf. auch unbewusste – körperliche Reaktion auf einen überraschenden Bremsengriff nicht zur Destabilisierung des Fahrer-Fahrzeug-Systems führt.

Auf die Bremsbereitschaft des Fahrers und das sich daraus ableitende Vorgehen bei den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird im Folgenden eingegangen.

4.1 Fahrerbereitschaft und Transition

Wie zuvor erläutert, stellt der Fahrer eines Einspurfahrzeugs im Gegensatz zum Fahrer eines Zweispurfahrzeugs einen integralen Teil des ohne Fahrer instabilen Systems dar. Sein Zustand hat also während einer Bremsung einen entscheidenden Einfluss auf die Systemstabilität und somit auf den erfolgreichen Verlauf eines potenziellen Notbremsmanövers. Bei einer unvorhergesehenen Reaktion des Fahrers könnte das System (bis zum Sturz) destabilisiert werden, wodurch die Unfallfolgen im ungünstigen Fall sogar verschlimmert würden.

4.1.1 Transition⁶¹

Ein automatisches Notbremsmanöver mit dem Motorrad setzt also voraus, dass der Fahrer sich in einem bremsbereiten Zustand befindet. Die Bremsbereitschaft zeichnet sich in erster Linie dadurch aus, dass der Fahrer im gegebenen Moment in der Lage ist, die auf ihn wirkende Trägheitskraft abzustützen und im Verlauf des Bremsvorgangs insbesondere im Niedriggeschwindigkeitsbereich seiner Stabilisierungsaufgabe nachzukommen. Das Abstützen der Trägheitskräfte und der daraus resultierenden Relativbewegung zum Fahrzeug ist notwendig, da im Vergleich zum Pkw das Rückhaltesystem in Form eines Sicherheitsgurts fehlt, das den Fahrer weitestgehend in Position hält.

⁶¹ Teile des Abschnitts wurden übernommen aus Merkel, N. L. et al.: MAEB Expertenstudie (2018).

Um ein automatisches Notbremsmanöver mit höchstmöglicher Verzögerungsstärke einleiten zu können, muss also sichergestellt sein, dass der Fahrer sich in einem bremsbereiten Zustand befindet, in dem keine Destabilisierung zu erwarten ist. Der Eingriff erfordert also beim Fahrer ein gewisses Maß an Aufmerksamkeit, körperlicher Bereitschaft (Körperspannung, Hände am Lenker) und Situationsverständnis. Dieser Zustand kann nicht immer sichergestellt werden. Neben Ablenkung durch technische Systeme (Bordcomputer, Navigation) und Umgebung können auch ein- oder freihändige Fahrt sowie mangelnde Körperspannung die Bremsbereitschaft beeinträchtigen. Ist das der Fall und ein Notbremsmanöver wird notwendig, ist dafür zu sorgen, dass ein bremsbereiter Zustand hergestellt wird. Der Übergang von einem beliebigen Fahrerzustand in den bremsbereiten Zustand wird hier als Transition bezeichnet. Die Transition zeichnet sich dadurch aus, dass der Fahrer nach ihrem Abschluss sowohl physisch (Körperspannung, beide Hände am Lenker) als auch mental (Situationsbewusstsein) auf das anschließende Manöver vorbereitet ist. Der Ablauf ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Die Transition ist spätestens dann abgeschlossen, wenn der Fahrer selbst die Bremse betätigt.



Abbildung 4-1: Phasen des Fahrerzustands vor einem Notbremsmanöver

Soll der Fahrer dazu gebracht werden, den bremsbereiten Zustand einzunehmen, muss ihm unmissverständlich klargemacht werden, dass eine Bremsung erfolgt. Nur so ist sichergestellt, dass nach der Transition so früh wie möglich mit maximal möglicher Stärke verzögert werden kann. Eine Warnung, die vom Fahrer erst interpretiert werden muss (bspw. Warnton oder Anzeige im Display), würde die Transitionsphase u.U. verlängern und könnte den Fahrer sogar zusätzlich von der Fahrsituation ablenken, wenn z.B. der Blick auf der Suche nach zusätzlichen Informationen zum Display gelenkt wird.

Eine Studie von Graham^{62a} zeigt anhand sogenannter „Auditory Icons“, dass akustische Warnelemente, die intuitiv mit einer Gefahrensituation verknüpft werden (Hupton, Bremsenquietschen), zu schnelleren Reaktionen führen als generische Warnungen („Piepton“, gesprochene Warnung)^{62b}. Da akustische Warnungen auf dem Motorrad nur mit

⁶² Graham, R.: Auditory Icons (1999). a: -; b: S. 1241 ff.

fahrzeugunabhängiger zusätzlicher Technik umzusetzen sind (Lautsprecheresystem im Helm des Fahrers), wird nach einer Lösung gesucht, die ohne solche Zusatztechnik auskommt. Eine Möglichkeit, eine intuitive Assoziation mit einer Bremsung hervorzurufen, besteht darin, vor der Notbremsung eine vorbereitende Teilbremsung durchzuführen. Durch eine leichte Verzögerung ist für den Fahrer unmittelbar klar, dass es sich um eine Bremsituation handelt. Die Einleitung der Transition in den bremsbereiten Zustand wird hier durch die unwillkürliche körperliche Reaktion auf die Verzögerung „erzwungen“. Die wirkenden Trägheitskräfte führen zu einer Vorverlagerung des Fahreroberkörpers relativ zum Fahrzeug, aus der als Reaktion ein „Abfangen“ (Aufbau von Körperspannung, Abstützen an der Lenkstange) resultiert, was dem Einnehmen des bremsbereiten Zustands entspricht. Eine solche Teilbremsung ist dabei so auszulegen, dass sie das Fahrzeug nicht destabilisiert, aber dennoch den Fahrer zuverlässig und schnell zum Übergang in den bremsbereiten Zustand bewegt. Trotzdem sollte schon in der Phase der Teilbremsung so stark wie möglich verzögert werden, um möglichst früh möglichst viel Geschwindigkeit abzubauen, eine frühe Vollbremsung nach der Transition einzuleiten und somit die kinetische Energie bei einer potentiellen Kollision zu verringern.

Neben dem Vorteil, dass die Teilbremsung bereits die physische Transition einleitet, wird ihre Bevorzugung als Transitionsinitiator vor optischen oder akustischen Warnelementen auch durch die Ergebnisse der Untersuchungen von Hoffmann gestützt. Er zeigt in Bezug auf Notbremsituationen mit Pkw, dass die Wirksamkeit (definiert durch die erzielte Geschwindigkeitsänderung) der Maßnahme „*Partial Braking*“ (Teilbremsung) signifikant höher als die von „*Seat Vibration and Symbol*“ (haptische und optische Warnung) oder „*Sound*“ (akustische Warnung) liegt⁶³.

Das Prinzip der vorbereitenden Teilbremsung zur Einleitung der Transition ist in Abbildung 4-2 beispielhaft dargestellt. Bei Detektion eines Ereignisses, das ein Notbremsmanöver zum Zeitpunkt $t = 0$ erfordert, wird unmittelbar eine leichte Verzögerung aufgebaut, um den Fahrer dazu zu bewegen, den bremsbereiten Zustand einzunehmen. Sobald die Transitionsphase abgeschlossen ist und der Fahrer diesen Zustand erreicht hat, kann die Verzögerung auf ein maximal mögliches Level erhöht werden, um vor einer Kollision möglichst viel kinetische Energie abzubauen.

⁶³ Hoffmann, J.: Diss., EVITA (2008), S. 69 ff.

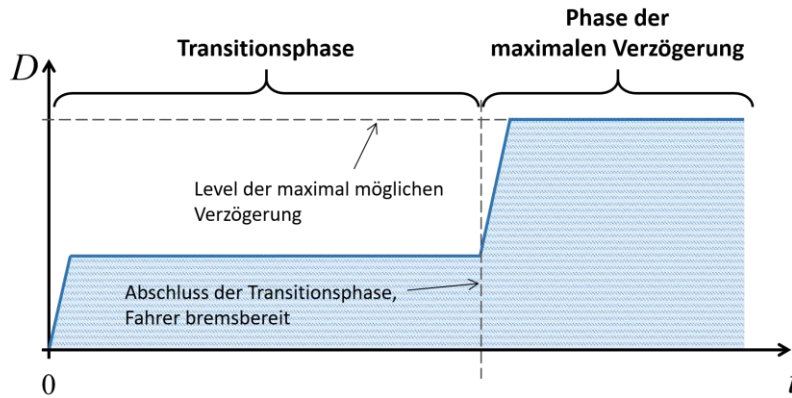


Abbildung 4-2: Prinzip der vorbereitenden Teilbremsung vor Einleitung der maximalen Verzögerung

Die Transitionsphase, also die Zeit vom Auftreten eines Ereignisses bis zum Erreichen des bremsbereiten Zustands, steht im Mittelpunkt der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen. Dabei sollen folgende Fragen beantwortet werden:

Wie kann die Transition in den bremsbereiten Zustand eingeleitet werden?

geeignete Gestaltung des Eingriffs

Was passiert während der Transitionsphase?

Fahrerreaktion/Fahrerverhalten

Wie kann der Abschluss der Transition festgestellt werden?

Maße für die Fahrerbereitschaft

Abbildung 4-3: Fragestellungen der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen

4.1.2 Zielkonflikt

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, liegt das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der Transitionsphase und darauf, wie eine Teilbremsung in dieser Phase zu gestalten ist, um einerseits das Fahrer-Fahrzeug-System nicht zu destabilisieren und andererseits trotzdem in dieser frühen Phase möglichst viel kinetische Energie abzubauen. D.h., es gilt herauszufinden, wie viel Verzögerung einem vom Eingriff überraschten Fahrer bereits in der Transitionsphase zugemutet werden kann, ohne ihn zu überfordern, um das volle Potential zur Energiereduktion während der Transitionsphase auszunutzen.

Beim Herantasten an die Kontrollierbarkeitsgrenze ist nahezu unvermeidbar, dass diese Grenze auch überschritten wird. Das bedeutet, dass es zu Situationen kommen kann, in denen die Kontrollierbarkeit für den unvorbereiteten Fahrer nicht hinreichend gegeben ist.

Ein Vorgehen, bei dem Probanden bewusst mit einem Kontrollierbarkeitsverlust konfrontiert werden, verbietet sich jedoch aus ethischer Sicht.

Gleichzeitig besteht ein weiteres Ziel der Arbeit darin, herauszufinden, wie sich der Fahrer während der Transitionsphase verhält. Um hier eine natürliche Fahrerreaktion zu erhalten, ist unerlässlich, dass die Fahrer unvorbereitet sind, d.h., dass sie nicht mit dem automatischen Bremseneingriff rechnen. Ein Fahrer, der weiß, dass ihm ein automatisches Bremsmanöver bevorsteht, könnte sich ggf. unbewusst durch Körperspannung und aufmerksames Beobachten der Fahrsituation auf den Eingriff vorbereiten und so ein anderes Verhalten zeigen als ein Fahrer, der in einer realen Fahrsituation von einem Bremseneingriff überrascht wird.

Es ergibt sich also ein Zielkonflikt zwischen dem Bestreben, die Kontrollierbarkeitsgrenze zu identifizieren, um das Verzögerungspotential vor Erreichen der Bremsbereitschaft voll ausnutzen zu können, und dem Wunsch, die Reaktion eines unvorbereiteten Fahrers auf einen unerwarteten Eingriff zu analysieren. Beide Ziele können folglich nicht im Rahmen einer einzigen Untersuchung erreicht werden. Um dennoch beide Bereiche abzudecken, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein mehrstufiges Vorgehen entwickelt, das im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

4.2 Abgeleitetes Vorgehen

Basierend auf der Annahme, dass eine vorbereitende Teilbremsung ein geeignetes Mittel ist, um den Fahrer zur Transition in den bremsbereiten Zustand anzuregen, wurden in Abschnitt 4.1.1 die zentralen Fragestellungen dieser Arbeit eingeführt:

1. Wie kann die Transition in den bremsbereiten Zustand eingeleitet werden? Wie sieht eine geeignete Gestaltung des Eingriffs aus?
2. Was passiert während der Transitionsphase? Wie verhält sich der unvorbereitete Fahrer?
3. Wie kann der Abschluss der Transition festgestellt werden? Welche Maße sind zur Feststellung der Bremsbereitschaft beim Fahrer geeignet?

Da die vorliegende Arbeit sich explizit mit der vorbereitenden Teilbremsung als Transitionsinitiator beschäftigt, ist die grundlegende Strategie zur Einleitung der Transition bereits festgelegt. Zur ersten Fragestellung gehören daher insbesondere zwei Aufgaben. Zum einen ist die am besten geeignete qualitative Gestaltung der Teilbremsung zu ermitteln. Die qualitative Gestaltung bezieht sich auf den Verlauf der Verzögerung, d.h. auf die Art des Verzögerungsaufbaus und den weiteren Verlauf. Zum anderen ist die Teilbremsung zu parametrieren. Die Eignung eines Verzögerungsverlaufs als Transitionsinitiator misst sich

daran, wie schnell die daraus resultierende Transitionsphase abgeschlossen ist⁶⁴. Die Parametrierung ist so zu wählen, dass der Eingriff für den unvorbereiteten Fahrer kontrollierbar bleibt, aber trotzdem das Potential zur Geschwindigkeitsreduktion bereits in der Transitionsphase so weit wie möglich ausgenutzt wird, um eine möglichst hohe Wirksamkeit zu erreichen. Der Eingriff soll sich also so nah wie möglich an der Kontrollierbarkeitsgrenze bewegen, ohne diese zu überschreiten. Die Kontrollierbarkeit muss für alle, also auch für ungeübte Fahrer, gegeben sein und der Kontrollierbarkeit alltäglicher Fahrsituationen entsprechen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden drei unterschiedliche Teilbremsprofile in die Untersuchungen einbezogen. Es handelt sich um einen *Bremsimpuls*, bei dem nur für einen kurzen Zeitraum Verzögerung auf- und direkt wieder abgebaut wird. Dieses Profil dient als kurzes „Wachrütteln“, mit dem Ziel, den Fahrer möglichst schnell dazu zu bewegen, das Fahrzeug selbst zu verzögern. Die Parametrierung besteht hier in der Bestimmung des Verzögerungsmaximums, das für unvorbereitete Fahrer noch kontrollierbar ist. Das zweite Profil besteht in einem langsamen Verzögerungsaufbau, bis ein Ziellevel erreicht ist und wird als *Bremsrampe* bezeichnet. Der Hintergedanke bei diesem Profil besteht darin, den unvorbereiteten Fahrer langsam mit der unvorhergesehenen Bremsung zu konfrontieren, um ihn nicht zu überfordern. Im Rahmen der Parametrierung ist hier der geeignete Verzögerungsgradient zu bestimmen. Beim letzten Profil, der *Blockbremsung* wird die Verzögerung möglichst schnell (so schnell wie systembedingt möglich) auf ein bestimmendes kontrollierbares Level gebracht. Die drei Bremsprofile sind in Abbildung 4-4 dargestellt.

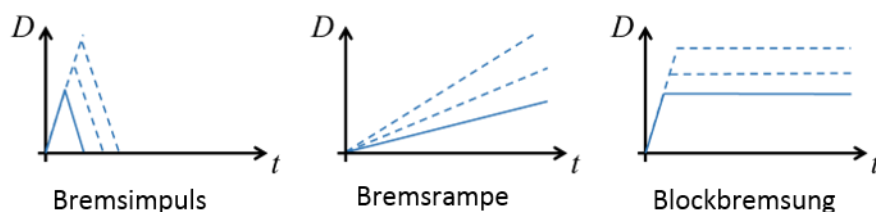


Abbildung 4-4: Verzögerungsprofile für vorbereitende Teilbremsung

Da ein Ermitteln der Kontrollierbarkeitsgrenzen wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben aus Sicherheitsgründen nicht mit Probanden (im Sinne von Alltagsfahrern) stattfinden kann, erfolgt die Parametrierung der Teilbremsprofile im Rahmen einer Expertenstudie. Die weiteren Fragestellungen können im Anschluss mit unvorbereiteten Probanden adressiert werden.

⁶⁴ Ziel ist, den Fahrer so schnell wie möglich in den bremsbereiten Zustand zu überführen, um möglichst früh stärker verzögern zu können.

Die entwickelte Methodik wird im Folgenden beschrieben. Es erfolgt zunächst nur die prinzipielle Darstellung. Die konkrete Dokumentation der Ausgestaltung der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Studien erfolgt in Kapitel 5.

4.2.1 Kontrollierbarkeitsgrenzen – Expertenstudie⁶⁵

Primäres Ziel der Expertenstudie ist, wie zuvor beschrieben, Verzögerungsgrenzen für die einzelnen Teilbremsprofile zu ermitteln, innerhalb derer automatische Eingriffe für unvorbereitete Normalfahrer kontrollierbar sind, ohne dass die Gefahr besteht, dass das Fahrer-Fahrzeug-System ungewollt destabilisiert wird. Hierbei ist wichtig, dass es sich bei den Fahrern, die die Bremsingriffe bewerten, einerseits um sehr routinierte Fahrer handelt, die die automatischen Manöver bis zum ersten Überschreiten der subjektiven Kontrollierbarkeitsgrenze beherrschen können. Gleichzeitig müssen sie in der Lage sein, einzuschätzen, ob die jeweiligen Eingriffe auch mit den Fahrfertigkeiten eines Normalfahrers zu beherrschen sind. Insbesondere letztere Bedingung ist für das weitere Vorgehen von zentraler Bedeutung. Eine Fehleinschätzung könnte in den anschließenden Probandenstudien mit Normalfahrern zu gefährlichen Situationen führen.

Aus den genannten Gründen werden als Experten für diese Studie Fahrlehrer und Fahrtrainer eingesetzt. Für diesen Personenkreis besteht ein wesentlicher Bestandteil ihrer Tätigkeit darin, die Fähigkeiten ungeübter Fahrer einzuschätzen. Daher wird ihre Fähigkeit zur Einschätzung der Kontrollierbarkeit von automatischen Bremsingriffen für Normalfahrer trotz ihrer zu erwartenden überdurchschnittlichen Fahrfertigkeiten als besonders gut angenommen.

Ablauf und Auswertung

Die Experten fahren mit einer vorgegebenen Versuchsgeschwindigkeit und werden – zunächst mit einer niedrigen Verzögerung (bzw. im Fall der *Rampe* mit einem niedrigen Verzögerungsgradienten) – ferngesteuert gebremst. Das Manöver wird im Anschluss durch den Experten hinsichtlich seiner Kontrollierbarkeit für Normalfahrer bewertet. Schätzt er die Bremsung als für den unvorbereiteten Normalfahrer kontrollierbar ein, wird die Verzögerung (bzw. im Fall der *Rampe* der Verzögerungsgradient) für das nächste Manöver erhöht. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis der Experte das Manöver als für Normalfahrer nicht mehr zumutbar einordnet. Das nächstniedrige Verzögerungslevel stellt dann das für unvorbereitete Normalfahrer kontrollierbare Niveau dar. Der Ablauf wird für verschiedene Ausgangsgeschwindigkeiten wiederholt. Das Vorgehen ist in Abbildung 4-5 schematisch dargestellt.

⁶⁵ Dieser Abschnitt basiert weitgehend auf Merkel, N. L. et al.: MAEB Expertenstudie (2018). und Merkel, N. L. et al.: Abschlussbericht BAST MAEB (2022).

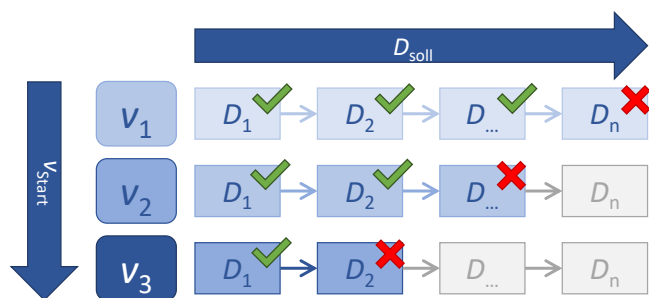


Abbildung 4-5: Schema der Expertenstudie: Steigern der Verzögerung ($D_1 \dots D_n$) innerhalb der durch ihre Ausgangsgeschwindigkeit ($v_1 \dots v_3$) definierten Versuchsreihen, Bewertung: „kontrollierbar“ (✓) oder „nicht kontrollierbar“ (✗)

In Anlehnung an die bereits in Abschnitt 2.2.3 beschriebene Studie von Savino et al.⁶⁶, bei der Verzögerungen von $2,8 \text{ m/s}^2$ von Probanden als problemlos kontrollierbar bewertet wurden, wird die untere Grenze der Verzögerungen auf 3 m/s^2 festgelegt. Wird eine Verzögerung als zumutbar bewertet, erfolgt für die nächste Bremsung eine Steigerung um 1 m/s^2 . Die Steigung der ersten *Rampe* beträgt 3 m/s^3 , was näherungsweise dem Aufbau der zuvor genannten niedrigsten Verzögerung von 3 m/s^2 in der mittleren Reaktionszeit eines Fahrers (1 s^{67}) entspricht.

Die Experten werden in permutierter Reihenfolge mit den verschiedenen Bremsprofilen (*Block*, *Rampe*, *Impuls*) konfrontiert. Dadurch werden Einflüsse in der Bewertung durch Gewöhnungseffekte durch die wiederholten automatischen Bremsmanöver reduziert.

Die in der Expertenstudie ermittelten Verzögerungsgrenzen dienen der Parametrierung der Teilbremsprofile, sodass diese dann für unvorbereitete Fahrer anwendbar sind.

⁶⁶ Savino, G. et al.: ITS development, implementation and testing (2010).

⁶⁷ 0,7 bis 0,75 s für erwartete Ereignisse, 1,25 s für unerwartete, aber übliche Ereignisse (z.B. aufleuchtende Bremslichter des Vorfahrenden) nach Green, M.: How Long Does It Take to Stop? (2000), S. 213.

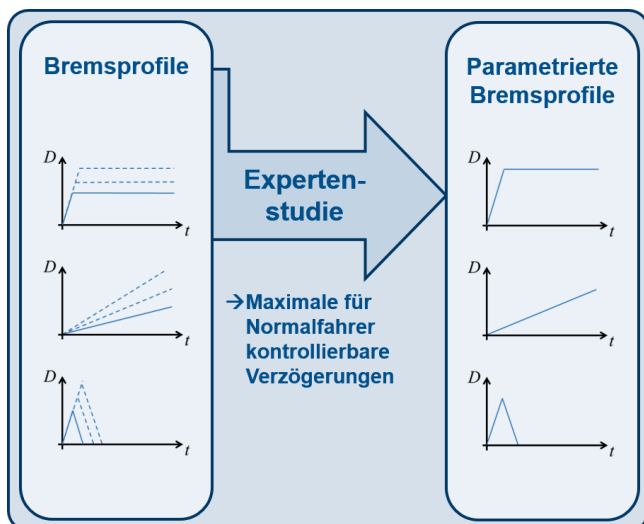


Abbildung 4-6: Vorgehen Expertenstudie: Ermitteln von Kontrollierbarkeitsgrenzen und Parametrierung der Teilbremsprofile

Um erste Eindrücke zur Kontrollierbarkeit automatischer Bremsengriffe unter Rollwinkel zu erhalten, werden mit den Experten außerdem einige Auslösungen während einer Kurvenfahrt durchgeführt. Da das Versuchsprogramm schon recht umfangreich ist und von den Experten ein hohes Maß an Konzentration erfordert, wird dieser Abschnitt jedoch auf eine Versuchsreihe reduziert. Es wird eine Kurve auf dem Versuchsgelände gewählt, die ausreichend Auslaufzonen bietet. Diese Kurve wird mit den Ausgangsgeschwindigkeiten 30 km/h und 50 km/h durchfahren und es wird, wie bei den Versuchen in Geradeausfahrt, mit leichten Verzögerungen begonnen, die so lange gesteigert werden, bis der Eingriff als für Normalfahrer nicht mehr kontrollierbar bewertet wird. Es kommt lediglich das *Blockprofil* zum Einsatz.

Mit diesem Vorgehen werden erste Daten für eine Abschätzung des Einflusses verschiedener Rollwinkel auf die Kontrollierbarkeit gesammelt. Es werden Rollwinkel von 15 bis 20° (bei 30 km/h) und von 30 bis 35° (bei 50 km/h) erreicht.

4.2.2 Potentialermittlung – Probandenstudie 1⁶⁸

Erst anhand der parametrisierten Teilbremsprofile kann deren Wirksamkeit untersucht werden, die durch die zweite Fragestellung adressiert wird. Hier ist zu untersuchen, wie unvorbereitete Fahrer auf die Teilbremsung reagieren und wie schnell sie dadurch in den

⁶⁸ Teile der Beschreibung des Vorgehens wurden übernommen aus Merkel, N. L. et al.: Abschlussbericht BAST MAEB (2022).

bremsbereiten Zustand versetzt werden. Das erfolgt in einer Probandenstudie mit Normalfahrern⁶⁹.

Zunächst ist die Frage zu klären, wie der Versuch gestaltet werden kann, um dem Probanden ein geeignetes Szenario zu präsentieren. Mit dem Ziel, eine Fahrerreaktion zu erhalten, die auf eine reale Notbremssituation übertragbar ist, zeichnet sich ein geeignetes Szenario dadurch aus, dass dem Fahrer der Eingriff nicht willkürlich oder als „false positive“⁷⁰ erscheint. Neben einem Einfluss auf die körperliche Reaktion wäre durch einen unplausibel erscheinenden Eingriff insbesondere eine Verzerrung der Akzeptanzbewertung zu erwarten.

Es ist also ein Vorgehen zu entwickeln, das die Notwendigkeit einer Notbremsung vortäuscht, jedoch keine reale Gefahr einer Kollision mit sich bringt. Für Einsatzzwecke genau dieser Art wurde am Fachgebiet Fahrzeugtechnik das Untersuchungswerkzeug „EVITA“⁷¹ entwickelt. Es handelt sich dabei um ein Dummy Target, das eingesetzt wird, um Auffahrsituationen zu simulieren, ohne den Probanden einem realen Kollisionsrisiko auszusetzen. Die Funktionsweise von EVITA wird in Abschnitt 4.4.2 erläutert.

Im Gegensatz zu den bei der Entwicklung und Validierung von EVITA von Hoffmann beschriebenen Versuchen, werden in der vorliegenden Arbeit keine real existierenden AEB untersucht. Während Hoffmann die Wirksamkeit unterschiedlich gestalteter Frontkollisionsgegenmaßnahmen untersucht, bei denen die entsprechenden Systeme auf die Verzögerung des Vorderfahrzeugs reagieren, liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der prinzipiellen Reaktion von Motorradfahrern auf automatische Verzögerungen. Hierzu ist der Einsatz eines realen Systems weder nötig noch – mangels Verfügbarkeit – möglich. Stattdessen wird eine prototypische Möglichkeit zum ferngesteuerten Bremsdruckaufbau umgesetzt (siehe Abschnitt 4.4.1 bzw. Anhang A.1.1).

Im Fall der vorliegenden Arbeit wird die Versuchsfahrt deshalb wie folgt gestaltet: Der Proband folgt während der Versuchsfahrt einem Vorderfahrzeug und wird angewiesen, einen vorgegebenen Abstand einzuhalten. Das Einhalten der Versuchsgeschwindigkeit wird durch das Vorderfahrzeug vorgegeben. Der Proband erhält die Information, dass der Versuch der Messung des Abstandsregelverhaltens von Motorradfahrern während der Folgefahrt dient. Dadurch soll erreicht werden, dass der Fahrer nicht mit der Notbremssituation oder mit automatischen Eingriffen in die Fahrdynamik rechnet.

Beim Vorderfahrzeug handelt es sich um das Dummy Target EVITA. Während der konstanten Geradeausfahrt bremst das Target für den Probanden unvorhergesehen ab. Beim Ursprünglichen EVITA-Versuchsverfahren nach Hoffmann erfolgt die Verzögerung des

⁶⁹ Als „Normalfahrer“ werden hier Motorradfahrer verstanden, die nicht nur im Besitz einer entsprechenden Fahrerlaubnis sind, sondern regelmäßig ein Zweirad im Straßenverkehr bewegen. Es erfolgen zunächst keine Einschränkungen bezüglich Fahrerfahrung und Fahrleistung.

⁷⁰ Eingriff als Reaktion auf ein nicht vorliegendes Ereignis

⁷¹ Hoffmann, J.: Diss., EVITA (2008).; Fecher, N. et al.: EVITA (2015).

Targets, während der Proband abgelenkt ist, wodurch ein Eingreifen des untersuchten Assistenzsystems notwendig wird. Bei den hier beschriebenen Versuchen mit einem Motorrad als Versuchsfahrzeug wird aus Sicherheitsgründen auf die Ablenkung verzichtet. Dennoch ist zu vermeiden, dass der Fahrer selbst durch einen Bremsengriff auf die Verzögerung des Vorderfahrzeugs reagiert, da so eine Untersuchung der Reaktion auf einen automatischen Eingriff verhindert würde. Daraus folgt, dass die ferngesteuerte Einleitung des Bremsengriffs am Versuchsfahrzeug zeitgleich mit der Auslösung des Dummy Targets erfolgt. So hat der Fahrer keine Möglichkeit, selbst auf die Auffahrsituation zu reagieren, dennoch wird der automatische Eingriff durch das bremsende Vorderfahrzeug plausibilisiert und somit nicht als „false positive“ wahrgenommen.

Ablauf

Nach einer Übungsphase, in der der Proband die Gelegenheit hat, sich an die Aufgabe der Folgefahrt (Einhalten des Abstands zum Vorderfahrzeug im vorgegebenen Rahmen) zu gewöhnen, erfolgt die erste Auslösung (Verzögerung des Vorderfahrzeugs und automatischer Bremsengriff). Nach dem ersten Manöver erfolgen die Aufklärung des Probanden und eine Befragung zur subjektiven Bewertung der Situation. Anschließend wird der Proband informiert, dass der Hauptteil des Versuchs nun zu Ende ist und nochmal eine Messung zum Abstandsverhalten in der konstanten Geradeausfahrt erfolgt, um zu analysieren, ob sich durch die erlebte Situation Veränderungen zeigen.

Nach einigen Runden, in denen der Fahrer den Eindruck erlangt, dass wirklich keine Auslösung mehr erfolgt, wird er ein zweites Mal während der konstanten Geradeausfahrt mit einem automatischen Notbremsmanöver konfrontiert. Dabei kommt ein anderes Teilbremsprofil als beim ersten Versuch zum Zuge. Es erfolgt wieder eine Subjektivbewertung. Neben den Teilbremsprofilen *Block*, *Rampe* und *Impuls* werden auch Referenzmanöver gefahren, in denen der Fahrer selbst auf das verzögernde Vorderfahrzeug reagieren muss. Die Reihenfolge der Teilbrems- bzw. Referenzmanöver, die die Probanden erleben, folgen einem Permutationsplan, sodass sie gleichmäßig als Erst- und Zweitkontakt und in unterschiedlichen Kombinationen auftreten.

Nach der zweiten Auslösung ist der Versuch abgeschlossen, da zu erwarten ist, dass der Fahrer bei Fortführung zu sehr mit einem weiteren Manöver rechnen würde und somit keine natürliche Reaktion mehr zu erwarten wäre.

Auswertung

Die Probandenstudie dient der Überprüfung, inwiefern die Bremsprofile *Block*, *Rampe* und *Impuls* als vorbereitende Teilbremsung geeignet sind, um den Fahrer zur Transition in den bremsbereiten Zustand anzuregen. Hierbei ist es einerseits wichtig, den Fahrer möglichst schnell in die Bremsbereitschaft zu bringen, andererseits soll aber auch schon während der Transitionsphase möglichst viel Geschwindigkeit abgebaut werden.

Zum Vergleich der Bremsprofile untereinander wird ähnlich wie beim in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Verfahren von Hoffmann analysiert, wie viel Geschwindigkeit in einem

bestimmten Betrachtungszeitraum bei den verschiedenen Manövern abgebaut wird. Durch Abweichungen in der Versuchsmethodik der vorliegenden Arbeit kann das Vorgehen von Hoffmann jedoch nicht unverändert übernommen werden. Hoffmann testet reale Frontkollisionsgegenmaßnahmen, die auf die Verzögerung von EVITA reagieren, während der Proband abgelenkt ist. Der Beurteilungszeitraum beginnt hier mit der Auslösung der Frontkollisionsgegenmaßnahme. Das Ende des Beurteilungszeitraums ergibt sich aus dem Zeitpunkt der theoretischen Kollision des ungebremsten Versuchsfahrzeugs auf das konstant verzögernde Dummy Target^{72,73}.

Während Hoffmann reale Frontkollisionsgegenmaßnahmen testet, werden die automatischen Eingriffe in der vorliegenden Arbeit ferngesteuert zeitgleich mit Auslösung des Dummy Targets eingeleitet, was dem Eingriff eines theoretischen, idealen Systems zum frühestmöglichen Zeitpunkt entspricht. Der Betrachtungszeitraum beginnt hier somit bereits mit dem Verzögerungsbeginn des Dummy Targets ($t = 0$). Als Ende des Betrachtungszeitraums wird die mittlere Transitionszeit der Fahrer in den Referenzmanövern herangezogen. Die Transition gilt in den Referenzmanövern als abgeschlossen, sobald der Fahrer beginnt, durch Einleiten einer Verzögerung (Betätigung von Brems- und/oder Kupplungshebel) auf das verzögernde Vorderfahrzeug zu reagieren (Diagramm oben links in Abbildung 4-7). Als Bewertungsgrundlage für die Teilbremsprofile *Block*, *Rampe* und *Impuls* wird anschließend ermittelt, wie viel Geschwindigkeit durch die automatischen Eingriffe im entsprechenden Referenzzeitraum bereits abgebaut werden kann. Abbildung 4-7 zeigt diesen Vergleich beispielhaft. Zu Beginn ($t = 0$) findet ein Ereignis statt, das eine Bremsung erfordert (bei den hier beschriebenen Versuchen das Verzögern des vorausfahrenden Fahrzeugs). Im Fall des Referenzmanövers im oberen Diagramm vergeht eine gewisse Zeit (Transitionszeit t_{trans}), bis der Fahrer beginnt, eine Verzögerung einzuleiten. In den weiteren drei Diagrammen sind die vorbereitenden Teilbremsungen dargestellt, die in einem idealen System direkt mit Auftreten des Ereignisses ($t = 0$) eingeleitet würden. t_{trans} markiert den Zeitpunkt, zu dem beim jeweiligen Eingriff die Transition abgeschlossen und die Bremsbereitschaft beim Fahrer hergestellt ist. Es wird angenommen, dass zu diesem Zeitpunkt die maximale Verzögerung durch das automatische Notbremssystem aufgebaut werden kann, ohne das Fahrer-Fahrzeug-System zu destabilisieren. Es ist außerdem anzunehmen, dass sich die Bremsprofile unterschiedlich auswirken und sich der Zeitpunkt, ab dem Bremsbereitschaft herrscht, je nach Art der Teilbremsung unterscheidet. Um die Teilbremsprofile untereinander auf Basis des Geschwindigkeitsabbaus zu vergleichen, ist der Zeitpunkt der abgeschlossenen Transition alleine jedoch nicht entscheidend, da bereits im Zeitraum vor Abschluss der Transition durch die Teilbremsung Geschwindigkeit abgebaut wird. Basierend auf der Annahme, dass ab

⁷² Hoffmann, J.: Diss., EVITA (2008), S. 32 ff.

⁷³ Es handelt sich um einen „gedachten“ Aufprall, da durch den Sicherheitsmechanismus von EVITA eine echte Kollision durch rechtzeitiges Beschleunigen des Dummy Targets aus dem Gefahrenbereich vermieden wird⁷².

abgeschlossener Transition die maximale Verzögerung aufgebaut werden kann, wird für *Block*, *Rampe* und *Impuls* ausgewertet, wie viel Geschwindigkeit durch ein ideales System im Referenzzeitraum abgebaut werden kann. Die abgebaute Geschwindigkeit (und damit abgebaute kinetische Energie) wird in Abbildung 4-7 durch die Fläche unter der Verzögerungskurve repräsentiert.

Für den reinen Vergleich der Teilbremsprofile untereinander kann der Referenzzeitraum frei gewählt werden, solange er mindestens so groß wie die längste Transitionszeit der Teilbremsprofile ist und das Fahrzeug beim angenommenen (Voll-)Verzögerungsverlauf nach Abschluss der Transition innerhalb des Zeitraums nicht zum Stehen kommt. Solange diese Anforderungen erfüllt sind, ändert sich die abgebaute Geschwindigkeit bei Variation des Referenzzeitraums für alle Profile um den gleichen Betrag. Das hier gewählte Vorgehen, den Referenzzeitraum anhand der Fahrerreaktion im Referenzmanöver festzulegen, hat das Ziel, auch den absoluten Sicherheitsgewinn der Teilbremsprofile gegenüber einem Bremsmanöver ohne Notbremssystem ermitteln zu können.

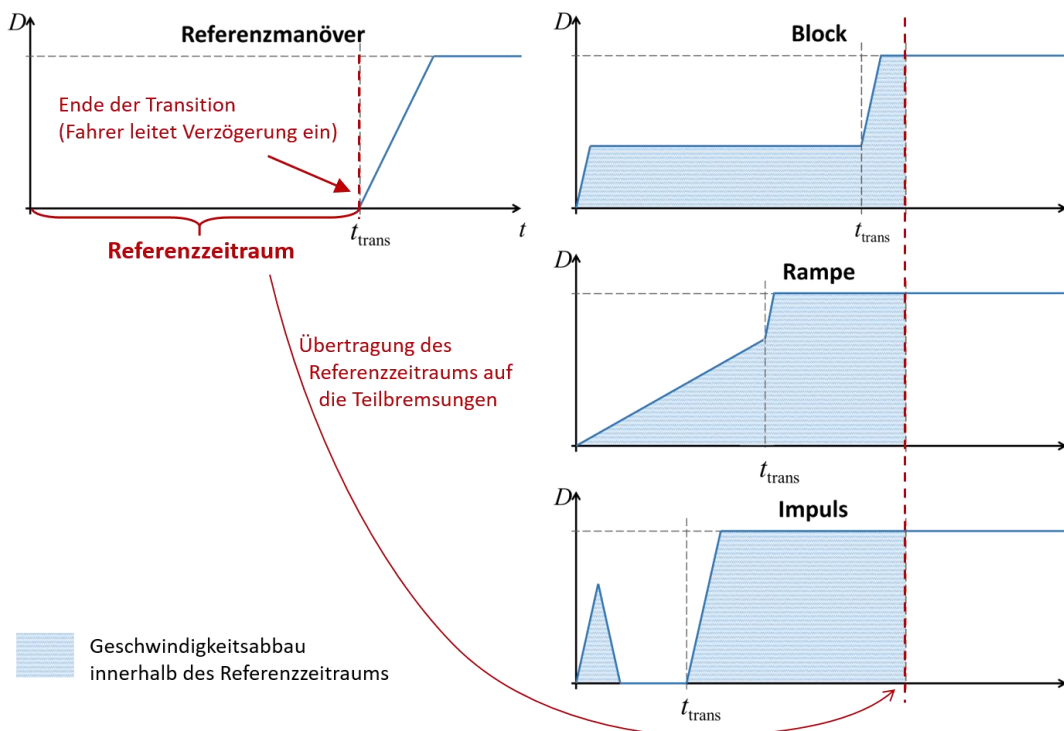


Abbildung 4-7: Vorgehen zur Ermittlung der abgebauten Geschwindigkeit im Referenzzeitraum

Trägt man die Verläufe der abgebauten Geschwindigkeit Δv in einem Diagramm auf, kann für jeden Zeitpunkt ab Auftreten des Ereignisses ein Vergleich der Effektivität der verschiedenen Eingriffsstrategien vorgenommen werden (siehe Abbildung 4-8, unten links). Der effektivste Eingriff zum betrachteten Zeitpunkt ist der, bei dem am meisten Geschwindigkeit abgebaut wurde. Im fiktiven Beispiel in Abbildung 4-8 ist das zu jedem Zeitpunkt das *Blockprofil*.

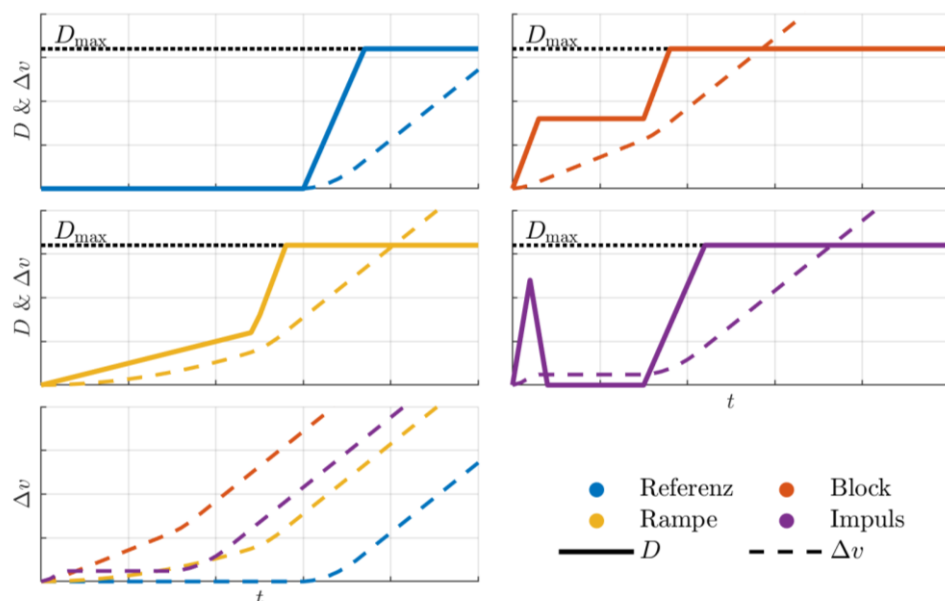


Abbildung 4-8: Geschwindigkeitsabbau während eines Notbremsmanövers anhand von skizzierten Geschwindigkeits- bzw. Verzögerungsverläufen für die verschiedenen (Teil-)Bremsprofile

Subjektivbewertung

Neben der Wirksamkeit im Sinne des Geschwindigkeitsabbaus spielt auch die Akzeptanz der Bremsingriffe eine wichtige Rolle. Ein Bremsprofil, das bei objektiver Kontrollierbarkeit einen hohen Geschwindigkeitsabbau verspricht, aber vom Fahrer nicht akzeptiert und daher nicht genutzt wird, bietet kein Sicherheitspotential. Das Sicherheitspotential setzt sich also aus Wirksamkeit des Eingriffs und Akzeptanz beim Fahrer zusammen. Aus diesem Grund ist parallel zur Untersuchung der Wirksamkeit der parametrisierten Teilbremsprofile auch eine Untersuchung der Akzeptanz in Form einer Subjektivbewertung notwendig.

Dazu werden die Probanden im direkten Anschluss an jedes Manöver zu ihrer Einschätzung des Eingriffs befragt. Hierbei wird die Kontrollierbarkeit nach der Skala zur Bewertung der Kritikalität nach Neukum et al.⁷⁴ eingeordnet, die in Abbildung 4-9 dargestellt ist. Diese Skala ermöglicht zunächst eine grobe Einordnung in fünf Kategorien auf einer Ordinalskala (linke Seite in Abbildung 4-9), um anschließend eine feinere Einstufung innerhalb der gewählten Kategorie zu ermöglichen (rechte Seite in Abbildung 4-9). Die Skala basiert auf der Störungsbewertungsskala nach Neukum und Krüger⁷⁵ und wurde so modifiziert, dass sie zur Beurteilung der Kritikalität von Fahrsituationen herangezogen werden kann⁷⁴.

⁷⁴ Neukum, A. et al.: ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten (2008), S. 144.

⁷⁵ Neukum, A.; Krüger, H.-P.: Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen (2003).

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

Abbildung 4-9: Skala zur Bewertung der Kritikalität nach Neukum et al.⁷⁴

Neben der Bewertung der Kontrollierbarkeit erhält der Proband die Möglichkeit, frei zu beschreiben, wie die Bremsung wahrgenommen wurde. Die Befragung orientiert sich an folgenden Leitfragen (siehe Fragebogen Teil II – Fahrversuch in Anhang A.2):

- Beschreiben Sie bitte kurz die Notbremssituation. Gab es besondere Auswirkungen auf die Stabilität oder die Kontrolle des Motorrads? Wie haben Sie reagiert? Was war die größte Herausforderung?
- Wie sind Sie auf die Notbremsung des Motorrads aufmerksam geworden?

Ergebnis

Als Ergebnis dieser ersten Probandenstudie wird anhand der Wirksamkeit (Transitionsdauer und abgebaute Geschwindigkeit) und der Akzeptanz der Teilbremsprofile (Subjektive bewertung) das Teilbremsprofil mit dem größten Sicherheitspotential ausgewählt.

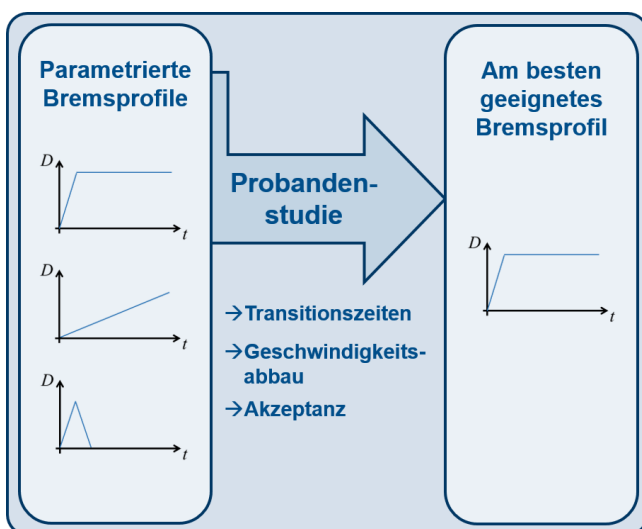


Abbildung 4-10: Vorgehen Probandenstudie 1: Potentialanalyse und Priorisierung der Bremsprofile

4.2.3 Maße zur Beschreibung der Fahrerreaktion – Probandenstudie 2

Die Parametrierung der Bremsprofile im ersten Schritt erfolgt konservativ, sodass sichergestellt ist, dass die parametrisierten Teilbremsprofile auch für ungeübte Fahrer kontrollierbar bleiben. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Reaktionen verschiedener Fahrer auf die Eingriffe je nach Fahrer(zustand) Unterschiede aufweisen. Hier können verschiedene Faktoren wie z.B. Erfahrung, Konzentration, körperliche Konstitution und Ergonomie eine Rolle spielen.

Zur Beantwortung der Frage, welche Maße zur Beschreibung der Fahrerreaktion während der Transitionsphase herangezogen werden können, wird anhand des in der ersten Probandenstudie ausgewählten Teilbremsprofils untersucht, welche Maße sich eignen, um die fahrerindividuelle Reaktion auf den automatischen Bremsengriff zu beschreiben und die fahrerindividuelle Bremsbereitschaft messbar zu machen. Diese Erkenntnisse könnten bei der Umsetzung von MAEB dazu dienen, Eingriffe individuell auf Fahrer anzupassen und so das Sicherheitspotential eines Eingriffs besser zu nutzen (z.B. indem bei einem Fahrer, der durch hohe Grundkörperspannung und schnelle Reaktion früher bremsbereit ist, früher vollverzögert wird).

Zur Beschreibung der Fahrerreaktion während des automatischen Bremsengriffs wird eine weitere Probandenstudie mit Normalfahrern durchgeführt.

Ablauf

Der grundsätzliche Ablauf der zweiten Probandenstudie gleicht dem der ersten. Wieder folgen die Probanden einem vorausfahrenden Fahrzeug in einem vorgegebenen Abstand, bis das Vorderfahrzeug unvorhergesehen abbremst und das Probandenfahrzeug automatisch verzögert wird. Im Unterschied zur ersten Probandenstudie wird nur noch das im Rahmen der ersten Probandenstudie priorisierte Teilbremsprofil angewendet, um dieses mit einer größeren Anzahl an Fahrern detaillierter untersuchen zu können. Des Weiteren wird nur noch ein einziger Eingriff ausgewertet, sodass sichergestellt ist, dass die Reaktion völlig unvorbereiteter Fahrer untersucht wird.

Auswertung

Wie bereits in der ersten Studie wird auch in der zweiten Studie die Transitionszeit ermittelt. Darüber hinaus wird aber auch das Verhalten zwischen Beginn des Eingriffs und dem Erreichen der Bremsbereitschaft betrachtet. Dabei stehen insbesondere die Relativbewegung zwischen Fahreroberkörper und Fahrzeug sowie das Abstützen über die Arme an der Lenkstange im Fokus. Außerdem werden die Fahrereingaben (Gasdrehgriff, Bremse, Kupplung) betrachtet. Die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Maße werden in Abschnitt 5.3 beschrieben.

Eine Subjektivbewertung findet ebenfalls analog zur ersten Probandenstudie statt.

Ergebnis

Nach Auswertung der zweiten Probandenstudie sind Maße identifiziert, die geeignet sind, die Fahrerreaktion auf einen automatischen Bremsengriff zu beschreiben.

Das Schaubild zum Vorgehen der zweiten Probandenstudie kann dem rechten Block in Abbildung 4-11 entnommen werden.

4.2.4 Zusammenfassung des Vorgehens

Durch das stufenweise Vorgehen gelingt es, ohne Gefährdung von Probanden, zunächst in der Expertenstudie die Teilbremsprofile so zu parametrieren, dass das Verzögerungspotential so gut wie möglich ausgenutzt wird, ohne die Kontrollierbarkeit einzuschränken. So kann trotzdem im zweiten Abschnitt in einer Probandenstudie die Wirksamkeit der Teilbremsprofile mit unvorbereiteten Probanden anhand der „natürlichen“ Fahrerreaktion bewertet werden. So wird als Ergebnis des zweiten Abschnitts das Teilbremsprofil mit dem größten Sicherheitspotential in Notbremssituationen identifiziert. Um fahrerindividuelle Reaktionen beschreiben und unterscheiden zu können, werden dafür geeignete Maße im letzten Abschnitt identifiziert.

Die Methodik ist in Abbildung 4-11 zusammengefasst.

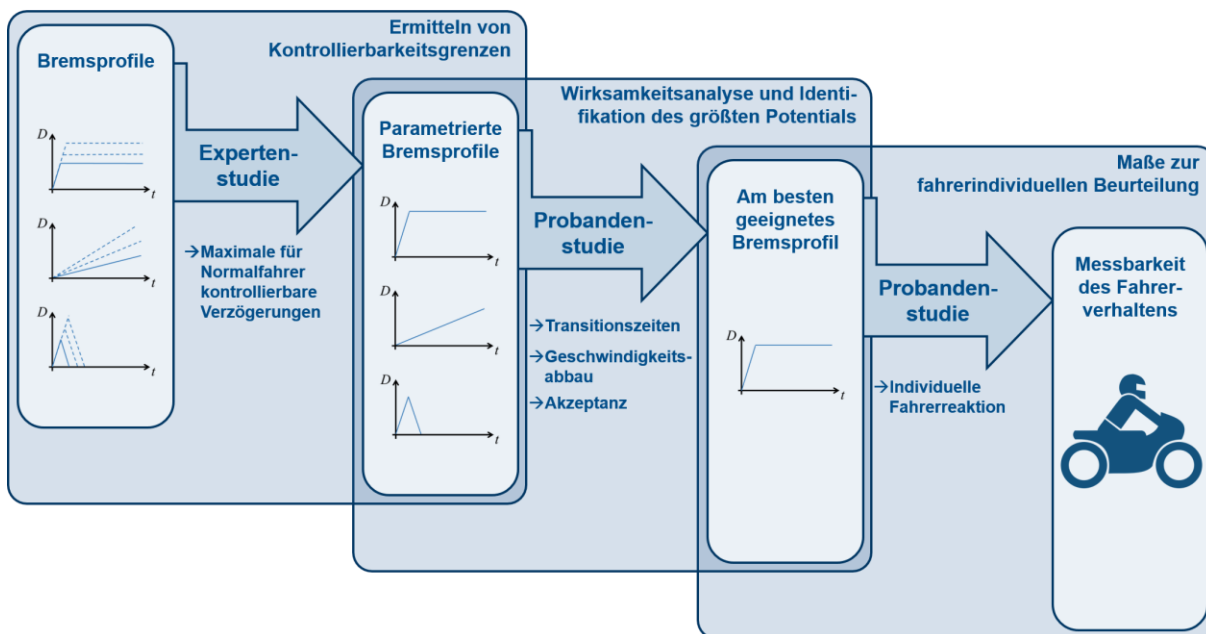


Abbildung 4-11: Aus drei Studienabschnitten zusammengefügte Untersuchungsmethodik

4.3 Sicherheitsvorkehrungen⁷⁶

Insbesondere im Probandenversuch muss gewährleistet werden, dass auch im Falle eines unerwarteten Ausweichmanövers⁷⁷ die in Abschnitt 2.2.1.3 beschriebenen Schlupfgrenzen nicht überschritten werden, da sonst die Gefahr eines Sturzes besteht. Um Ausweichmanöver zu ermöglichen, werden die Verzögerungen im Expertenversuch entsprechend nicht bis in den ABS-Regelbereich gesteigert, sondern so begrenzt, dass ohne Kraftschlussverlust die für das Ausweichen notwendigen Rollwinkel aufgebaut werden können.

Giovannini et al. beschreiben für typische Ausweichmanöver Fahrzeugrollwinkel von bis zu $\varphi_{sw} = 30^\circ$ ⁷⁸. Auf trockener Fahrbahn kann für eine gewöhnliche Reifen-Fahrbahn-Paarung ein Reibwert von mindestens $\mu = 1$ angenommen werden. Mit einer Sicherheitsreserve von 10 %, also einem Reibwert von $\mu = 0,9$ wird die Grenze der Verzögerung ermittelt, mit der Ausweichrollwinkel von 30° noch befahrbar sind, ohne dass das Querschlupfpotential überschritten wird. Entsprechend der Kurvenschar

$$\mu g = \sqrt{D^2 + (g \tan(\varphi_{sw}))^2} \quad (4-1)$$

ergibt sich eine maximale Verzögerung D von $0,7 g$ (siehe Abbildung 4-12).

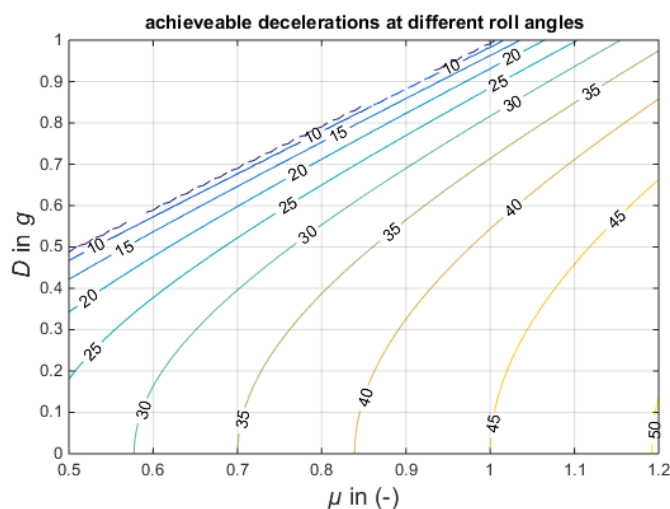


Abbildung 4-12: Verzögerungspotential in der Kurvenfahrt nach Rollwinkel und Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn

⁷⁶ Teile dieses Abschnitts basieren auf Merkel, N. L. et al.: Abschlussbericht BASt MAEB (2022).

⁷⁷ Die Probandenversuche werden lediglich in Geradeausfahrt durchgeführt. Eine unerwartete Reaktion des Probanden in Form eines Ausweichmanövers kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

⁷⁸ Giovannini, F. et al.: Minimum swerving distance for MAEB (2013), S. 177.

Für eine spätere potentielle Funktionsentwicklung ist zu überprüfen, welche Geschwindigkeiten und Zeitlücken welche Querbeschleunigungen und Rollwinkel zum Befahren einer Ausweichtrajektorie erfordern, um damit und unter sinnvoller Abschätzung eines aktuellen Reibwertes eine Maximalverzögerung zu ermitteln.

Um zu verhindern, dass durch eine gegebenenfalls unbewusste Reaktion des Fahrers auf die automatische Bremsung ungewollt beschleunigt wird, wird während einer Auslösung der Bremsprofile *Block* und *Rampe* außerdem die Kupplung geöffnet. Dadurch ist sichergestellt, dass das Fahrzeug nach der Auslösung zum Stehen kommt. Das ist insbesondere auch später im Probandenversuch wichtig, um den Probanden im Anschluss an die Bremsung befragen zu können. Zusätzlich wird durch das Öffnen der Kupplung verhindert, dass es beim Bremsen in den Stillstand zu einem Abwürgen des Motors kommt, wodurch die Energieversorgung der Messtechnik unterbrochen würde.

Beide Studien mit unvorbereiteten Probanden („Normalfahrern“) wurden durch die Ethikkommission der TU Darmstadt freigegeben, siehe Anhang A.4.

4.4 Untersuchungswerkzeuge⁷⁹

4.4.1 Messfahrzeug

Beim für die Fahrversuche eingesetzten Messfahrzeug handelt es sich um ein Motorrad des Modells NC700X der Marke Honda. Das Fahrzeug ist mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet und wurde am Fachgebiet Fahrzeugtechnik bereits in verschiedenen Probandenstudien erfolgreich eingesetzt⁸⁰. Gemessen werden Fahrereingaben (Gasgriffstellung, Kupplungsweg, Bremsdrücke, Lenkwinkel- und Momente) und Fahrzeugbewegungszustände (6-Achsen-Inertialmesseinheit, Federwege, Raddrehzahlen, Motordrehzahl, GPS).

⁷⁹ Teile dieses Abschnitts basieren auf Merkel, N. L. et al.: Abschlussbericht BAST MAEB (2022).

⁸⁰ z.B. Hellmann, A.: Motorrad-Messfahrten (2014).; Magiera, N. et al.: Schätzung der Fahrfertigkeiten (2016).



Abbildung 4-13: Versuchsfahrzeug Honda NC700X

Um das Motorrad während der Durchführung der Studien automatisch bzw. ferngesteuert verzögern zu können, wird zusätzlich entsprechende Aktorik benötigt. Dafür werden am Fahrzeug ein Brems- und ein Kupplungsaktor eingesetzt. Außerdem wird zusätzlich installierte Messtechnik genutzt, die zur Erfassung der Transitionsdauer bzw. in der zweiten Probandenstudie zur Beschreibung der Fahrerreaktion herangezogen werden soll. Die Aktoren und die Zusatzmesstechnik werden nachfolgend beschrieben.

4.4.1.1 Bremsaktor

Um ferngesteuert Bremsungen auslösen zu können, ist das Versuchsfahrzeug mit einem Bremsaktor ausgestattet, mit dem die Hinterradbremse betätigt wird. Das Fahrzeug ist mit einem Combined Brake System (CBS) ausgestattet, d.h. mit der Betätigung des Fußbremshebels erfolgt gleichzeitig eine Teilbremsung am Vorderrad. So erfolgt bei einer ferngesteuerten Bremsung die Verzögerung überwiegend über das Hinterrad, wodurch unerwünschte dynamische Bremseffekte durch Verzögerung über das Vorderrad, wie z.B. das in Abschnitt 2.2.1 erläuterte Bremslenkmoment, reduziert werden. Trotzdem wird die Teilbremsung am Vorderrad benötigt, um die erforderlichen Verzögerungen zu erreichen. Durch die Radlastverschiebung während des Bremsvorgangs reicht das Kraftübertragungspotential am Hinterrad dafür allein nicht aus (siehe Abschnitt 2.2.1).

Mit diesem Aufbau, bei dem die automatische Bremsung über den gleichen Weg eingeleitet wird, wie die dadurch ersetzte Fahrereingabe (Betätigung des Fußbremshebels), ist sichergestellt, dass die ABS-Funktionalität uneingeschränkt erhalten bleibt. Außerdem ist dem Fahrer so jederzeit möglich, über die vom Aktor gestellte Verzögerung hinaus die Fußbremse oder den Handbremshebel zu betätigen, um die Verzögerung erhöhen.

Der Bremsaktor ist durch einen Schrittmotor realisiert, der über eine Seilwinde am Fußbremshebel angreift. So werden Bremsdrücke bis zu ca. 35 bar am Hauptbremszylinder der Hinterradbremse erreicht. Unter Einfluss des CBS werden so auf trockener Fahrbahn

Fahrzeugverzögerungen bis zu $0,7 g$ erreicht, was der nach Abschnitt 4.3 geforderten Begrenzung der Verzögerung entspricht. Der Aufbau des maximalen Bremsdrucks (35 bar) erfolgt ca. 300 ms nach Auslösung, siehe Abbildung 4-14⁸¹.

Details zum Bremsaktor können Anhang A.1.1 entnommen werden.

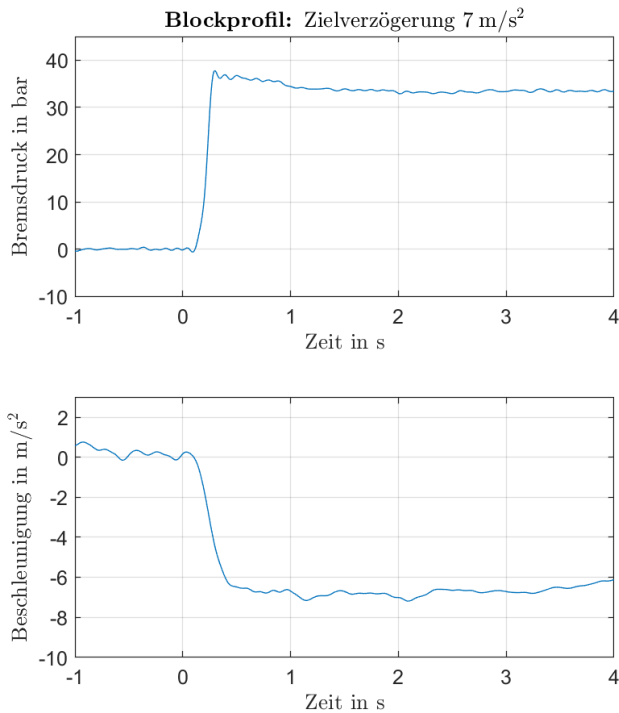


Abbildung 4-14: Fahrzeugverzögerung durch Bremsdruckaufbau mittels Bremsaktor, Zielverzögerung 7 m/s^2

4.4.1.2 Kupplungsaktor

Wie in Abschnitt 4.3 erläutert, ist während der Durchführung einer automatischen Bremsung die Kupplung zu trennen, um eine bessere Bremswirkung zu erzielen und ein Beschleunigen des Fahrzeugs durch unbeabsichtigte Eingaben am Gasdrehgriff zu verhindern. Der Zustand der geöffneten Kupplung beschreibt für den Versuch einen „sicheren Zustand“, da keine Zugkraft mehr übertragen werden kann. Dieser sichere Zustand ist konsequenterweise neben dem automatischen Bremsengriff auch im Fehlerfall sowie im stromlosen Zustand einzustellen. Des Weiteren wird beim Abbremsen bis in den Stillstand durch ein automatisches Öffnen der Kupplung sichergestellt, dass der Motor weiterläuft und somit die Spannungsversorgung der Messtechnik durchgehend sichergestellt ist.

⁸¹ Beschleunigungsdaten tiefpassgefiltert: IIR-Filter, Butterworth, 1. Ordnung, Grenzfrequenz 2 Hz, durch Anwendung von Vorwärts- und Rückwärtsfilterung (MATLAB `filtfilt`) erhöht sich die Ordnung auf 2.

Um die Kupplung öffnen zu können, ohne den Fahrer durch eine Betätigung des Kupplungshebels zu beeinflussen, wird ein Kupplungsaktor eingesetzt, dessen Aufbau und Funktionsweise in Anhang A.1.2 näher erläutert sind.

Das Trennen der Kupplung erfolgt innerhalb von ca. 100 ms nach der Auslösung.

4.4.1.3 Sensorik Fahrerbewegung

Da der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Kontrollierbarkeit der automatischen Bremsen liegt, ist in den Studien insbesondere die Fahrerreaktion auf die einsetzende Verzögerung sowie der daraus resultierende Einfluss auf das Fahrzeug zu untersuchen.

Durch das Trennen der Kupplung mittels Bremsaktor ist ein Einfluss durch Änderung der Gasdrehgriffstellung ausgeschlossen. Die Betätigung der Hand- und Fußbremshebel wird durch Messung der Bremsdrücke erfasst. Weitere Einflussmöglichkeiten des Fahrers auf das Fahrzeug bestehen in Lenkeingaben und der Veränderung der Körperhaltung. Die Messung dieser Effekte wird im Folgenden beschrieben.

Lenkerabstützkraft

Das Messmotorrad ist mit Dehnmessstreifen (DMS) zur Messung von Lenkmomenten ausgerüstet. Diese erfassen nahe der Einspannung an der oberen Gabelbrücke die Dehnung der Lenkstange orthogonal zur Lenkachse. Durch vorzeichenverkehrte Addition der gemessenen Spannungen an der linken und rechten Lenkerhälfte wird anstelle des Lenkmomentes der senkrecht zur Lenkachse stehende Anteil der Abstützkraft des Fahrers ermittelt (F_H , in Fahrtrichtung positiv, siehe Abbildung 4-15). Für die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Untersuchungen wird die Messung der absoluten Abstützkraft nicht zwingend benötigt. Stattdessen wird das dynamische Verhalten des Kraftanstiegs, der auf eine unvorhergesehene Verzögerung folgt (Abstützen der Oberkörperbewegung am Lenker), betrachtet. Zur Bestimmung von Tot- und Schwellzeiten kann auf eine Korrektur um den Abstützwinkel (σ_H in Abbildung 4-15) verzichtet werden.

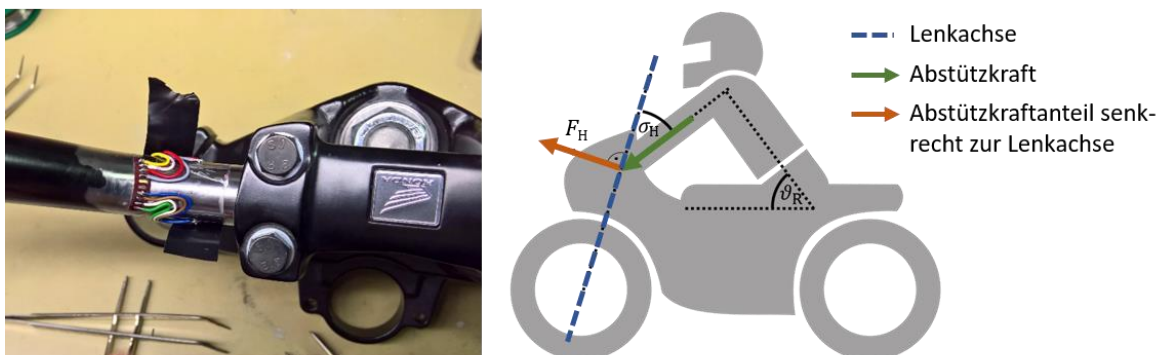


Abbildung 4-15: links: am Lenker applizierte Dehnmessstreifen, rechts: Abstützkraft am Lenker

Fahreroberkörperbeschleunigung

Neben der Abstützung des Fahrers am Lenker wird in der ersten Probandenstudie die Relativbewegung des Fahreroberkörpers zum Fahrzeug herangezogen, um das Ende der Transitionsphase zu bestimmen. Zur Erfassung der Oberkörperbewegung wird auf einen Beschleunigungssensor zurückgegriffen, der am Fahrerrücken auf Höhe der Schulterblätter angebracht wird.

Bei diesem Sensor handelt es sich um einen dreiachsigen, analogen Beschleunigungssensor, der über eine magnetische Halteplatte auf einem über der Schutzkleidung getragenen Rückenprotector montiert wird, sodass über das vom Sensor zum Messcomputer führende Kabel keine feste Anbindung des Fahrers am Motorrad erzeugt wird (siehe Abbildung 4-16).



Abbildung 4-16: Rückenprotector mit Beschleunigungssensor

Unter der vereinfachten Annahme eines konstanten Fahrernickwinkels ϑ_R (Abbildung 4-15) wird die Beschleunigung am Fahreroberkörper in Fahrzeuglängsrichtung $a_{R,x}$ angenähert. Das Vorgehen zur Näherung der Fahreroberkörperbeschleunigung wird in Anhang A.1.3 erläutert.

Mithilfe der ermittelten Oberkörperbeschleunigung wird analysiert, wie sich der Fahrer relativ zum Fahrzeug bewegt. Als Referenzwert dient die Beschleunigung (bzw. Verzögerung) des Fahrzeugs aus der Inertialsensoren. Es ist zu erwarten, dass die Oberkörperbeschleunigung des Fahrers der des Fahrzeugs umso direkter folgt, je besser er am Fahrzeug angebunden ist (durch Abstützung über die Arme, Knieschluss und Körperspannung). Bei einer (hypothetisch) starren Sitzhaltung würde die Oberkörperverzögerung der Verzögerung des Fahrzeugs entsprechen.

Durch die Annahme eines konstanten Fahrernickwinkels sind Ungenauigkeiten in den Fahrerlängsbeschleunigungen zu erwarten. Da aber für die Beschreibung der Transition in erster Linie das dynamische Verhalten des Anstiegs der Fahrerlängsbeschleunigung betrachtet wird, ist die Annahme für die Auswertung der ersten Probandenstudie vertretbar. Wie die Bestimmung des Transitionsendes im Detail erfolgt, wird bei der Studienauswertung in Abschnitt 5.2 erläutert.

Fahreroberkörper- und Kopfbewegung

Um die Fahrerbewegung in der zweiten Probandenstudie detaillierter untersuchen zu können, kommt hier erweiterte Messtechnik zum Einsatz. Es werden sogenannte „Motion-Tracker“ verwendet, die an verschiedenen Stellen am Fahrer befestigt werden.

Bei den Motion-Trackern MTw Awinda der Firma Xsens handelt es sich um Inertialmesseinheiten, die neben einem 3-Achsen-Beschleunigungssensor und einem 3-Achsen Gyroskop auch ein Magnetometer enthalten⁸² (Inertial-magnetische Messeinheiten, IMMU). Durch einen in jeder Einheit integrierten Prozessor erfolgt eine Kalibration von Drehraten- und Beschleunigungsdaten sowie eine Strap-Down-Integration der Orientierung unter Einbeziehung des Erdmagnetfelds. Das Datenblatt der Sensoren ist in Anhang A.1.3 beigefügt.

Am Fahrer werden drei Motion-Tracker angebracht. Zwei Sensoren werden zur Bewegungsmessung am Rücken auf Schulterhöhe und auf Höhe der Lendenwirbelsäule (LWS) eingesetzt, einer dient zur Bewegungserfassung am Kopf und wird über eine Kameralhalterung am Helm befestigt. Die Positionen können Abbildung 4-17 entnommen werden.

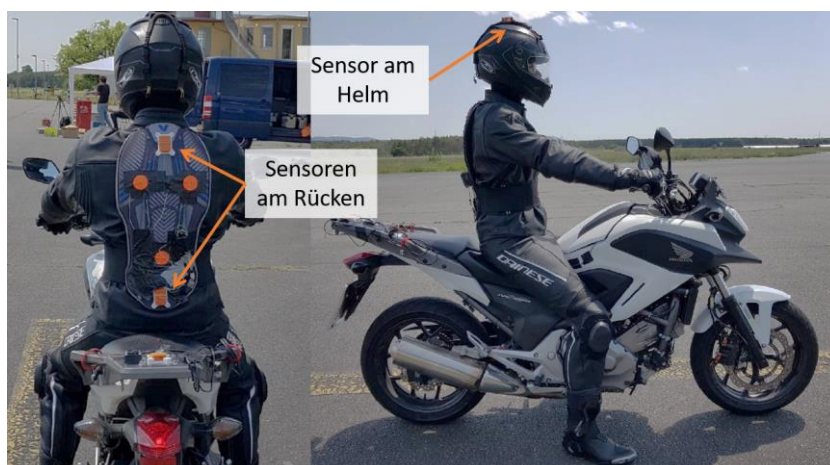


Abbildung 4-17: Sensoren zur Messung der Fahreroberkörper- und Kopfbewegung

Für die Analyse der Fahrerbewegung werden an allen drei Messpositionen die Nickbewegungen und wie in der ersten Probandenstudie die Relativbewegungen zwischen Fahrer und Fahrzeug anhand der jeweiligen Längsbeschleunigungen betrachtet.

Im Gegensatz zur ersten Probandenstudie werden die Winkel in der Sagittalebene nicht als konstant angenommen. Da die durch (Strap-Down-)Integration ermittelte Orientierung über die lange Messzeit einem nicht unerheblichen Drift unterliegt, werden die Winkel vor Beginn des Eingriffs analog dem in Anhang A.1.3 beschriebenen Vorgehen für die erste

⁸² Xsens: MTw Awinda User Manual (2018), S. 8.

Probandenstudie bestimmt. Hier gilt die Annahme, dass auf den Fahrer vor dem Eingriff in konstanter Geradeausfahrt mit konstanter Sitzposition nur die Erdbeschleunigung wirkt.

Die detaillierte Beschreibung der Auswertung der einzelnen Messwerte erfolgt bei der Studienauswertung in Abschnitt 5.3.

4.4.2 EVITA

Wie in Abschnitt 4.2.2 erläutert, ist zum Messen möglichst realistischer Fahrerreaktionen notwendig, den Probanden in der „Normalfahrer“-Studie ein geeignetes Szenario zu präsentieren. Das Fahrzeug eines frei fahrenden Probanden ferngesteuert abzubremsen, würde ein Testen von falsch positiven Auslösungen darstellen. Ein solcher unplausibler Bremseneingriff könnte die Fahrerreaktion verfälschen und sich insbesondere negativ auf die Akzeptanz auswirken. Stattdessen ist der Versuch so zu gestalten, dass der Proband einen für ihn gerechtfertigt wirkenden automatischen Bremseneingriff erlebt. Die Rechtfertigung eines solchen Eingriffs besteht üblicherweise in der Verhinderung bzw. Abschwächung einer drohenden Kollision. Dem Probanden ist also eine Situation zu präsentieren, die für ihn eine Kollisionsgefahr vortäuscht, während aus Sicherheitsgründen natürlich keine reale Kollisionsgefahr vorliegen darf. Für diesen Zweck kommt das am Fachgebiet Fahrzeugtechnik entwickelte Versuchswerkzeug EVITA 2.0⁸³ zum Einsatz.

Bei EVITA handelt es sich um ein Dummy Target in Form eines Anhängers, der über eine Seilwinde an ein Zugfahrzeug gekoppelt ist (Abbildung 4-18). Der Proband folgt dem Gespann mit einem vorgegebenen Abstand. Der Abstand wird mittels Radar gemessen und dem Probanden mithilfe einer Ampel angezeigt, die am Anhänger angebracht ist. Bei einer Auslösung wird die Seilwinde geöffnet und der Anhänger abgebremst. Dabei bleibt das Dummy Target über das abgerollte Seil stets mit dem Zugfahrzeug verbunden, während das Zugfahrzeug sich mit der Anfangsgeschwindigkeit (bei Auslösung) weiterbewegt.



Abbildung 4-18: Motorradfahrer in Folgefahrt hinter EVITA mit Zugfahrzeug

⁸³ Fecher, N. et al.: EVITA (2015).

Wird während des Abbremsens des Anhängers eine definierte Time-to-Collision (TTC) – durch ausbleibenden oder zu geringen/zu späten Bremsenriff des folgenden Fahrzeugs – unterschritten, wird die Seilwinde geschlossen und das Dummy Target wird wieder auf die Geschwindigkeit des Zugfahrzeugs beschleunigt und vom Probandenfahrzeug weggezogen, ohne dass eine kritische Situation entsteht. So können Antikollisionssysteme in einem realistischen Szenario, aber unter Ausschluss der Gefahr einer Kollision untersucht werden.

Einsatz von EVITA in der vorliegenden Arbeit

In den Probandenstudien im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird EVITA nicht genutzt, um eine Notbremsung hervorzurufen. Das Versuchsfahrzeug ist nicht mit einem automatischen Notbremssystem im eigentlichen Sinne ausgestattet. Es gibt keine Umfeldsensorik, durch die die Situation detektiert werden könnte. Die automatische Bremsung wird ferngesteuert ausgelöst. Darüber hinaus ist es nicht erwünscht, dass der Proband selbst eine Bremsung durchführt⁸⁴. Vielmehr soll untersucht werden, wie Fahrer auf eine unerwartete, aber berechtigt erscheinende Bremsung des Fahrzeugs reagieren. Somit darf die Verzögerung von EVITA nicht vor der Bremsaktuierung am Fahrzeug erfolgen. Der Proband soll nicht die Gelegenheit haben, auf das Abbremsen von EVITA zu reagieren. Die Auslösung von EVITA und der Verzögerungsbeginn des Versuchsfahrzeugs erfolgen deshalb zeitgleich.

EVITA dient somit der Plausibilisierung des automatischen Bremsenriffs. Wird das Probandenfahrzeug unerwartet abgebremst und der Proband stellt fest, dass das vorausfahrende Fahrzeug auch gebremst hat, erscheint ihm der Eingriff des eigenen Fahrzeugs berechtigt. Außerdem liefert EVITA im Versuchsablauf die „Aufgabe“ für den Probanden. Er wird angewiesen, dem Anhänger in einem vorgegebenen Abstand zu folgen und soll diesen so gut wie möglich einhalten. Erst bei der Erstauslösung einer automatischen Bremsung nach einigen Wiederholungen der Abstandsaufgabe wird somit der tatsächliche Grund für die Studie ersichtlich.

⁸⁴ Im ursprünglich entwickelten Verfahren von Hoffmann wird der (Pkw-)Fahrer abgelenkt (Hoffmann, J.: Diss., EVITA (2008), S. 26 ff.) und reagiert so nicht rechtzeitig auf das Verzögern des Vorderfahrzeugs. In den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuchen mit dem Motorrad wird aus Sicherheitsgründen (Sturzgefahr) auf eine Ablenkung verzichtet.

5 Studiendurchführung und Auswertung

Die drei Studien (Expertenstudie zur Ermittlung der Kontrollierbarkeitsgrenzen, Probandenstudie zur Potentialermittlung, Probandenstudie zur Untersuchung der Maße zur Beschreibung der Fahrerreaktion) wurden auf dem Testgelände der TU Darmstadt auf dem August-Euler-Flugplatz in Griesheim durchgeführt. Es handelt sich dabei um ein abgeschlossenes Versuchsgelände, auf dem die Gefährdung der Probanden oder des Versuchsablaufs durch andere Verkehrsteilnehmer ausgeschlossen ist. Auslösungen automatischer Bremsungen finden ausschließlich auf der breiten Start-/Landebahn statt. Die Fläche bietet mit knapp 1,2 km Länge und 20 m Breite genügend Platz, um auch bei unerwarteten Reaktionen während des Versuchsgeschehens (z.B. nicht vorgesehene Ausweichen) kein Verlassen der Fahrbahn zu provozieren.

Um die Manöver vergleichbar zu halten, wird die Standardversuchsgeschwindigkeit auf 70 km/h festgelegt. Einzig in der Expertenstudie zur Ermittlung der Kontrollierbarkeitsgrenzen findet eine Variation der Geschwindigkeiten statt, um zu überprüfen, ob die Kontrollierbarkeit automatischer Bremsen durch die Anfangsgeschwindigkeit beeinflusst wird.

5.1 Kontrollierbarkeitsgrenzen – Expertenstudie⁸⁵

Die Expertenstudie wurde mit fünf Testpersonen durchgeführt. Es handelt sich bei den Teilnehmern um Fahrlehrer und Fahrtrainer, von denen drei schwerpunktmäßig in Fahrschulen tätig sind, also Fahranfänger unterrichten, während zwei hauptsächlich Trainings (Sicherheits-, Kurven-, Rennstreckentraining) anbieten. So ist sichergestellt, dass die Experten ein breites Spektrum an Fahrern kennen und einschätzen können. Jeder der Fahrer durchlief Versuche mit allen drei Bremsprofilen bei 45 km/h, 70 km/h und 90 km/h. Die Probanden wurden nach jeder einzelnen Bremsung zu ihrer subjektiven Bewertung der Bremsung sowie zu ihrer Einschätzung bezüglich der Kontrollierbarkeit für Normalfahrer befragt.

5.1.1 Kontrollierbarkeit für Normalfahrer

Die Bewertung der Kontrollierbarkeit für Normalfahrer erfolgt durch eine Befragung im direkten Anschluss an jede einzelne Bremsung, um möglichst unverfälschte Eindrücke der Experten zu erhalten. Die Bewertungsmöglichkeiten sind hierbei „zumutbar“ und „nicht

⁸⁵ Dieser Abschnitt basiert auf Ergebnissen aus Merkel, N. L. et al.: MAEB Expertenstudie (2018). bzw. Merkel, N. L. et al.: Abschlussbericht BAST MAEB (2022).

zumutbar“. Sie werden im Folgenden durch die Symbole „✓“ (zumutbar) und „✗“ (nicht zumutbar) repräsentiert. An einigen Stellen zeigte sich, dass die Experten Bremsungen als „noch zumutbar, aber nah an der Grenze“ einstufen. Diese Einstufung wird bei der Auswertung weiter als „zumutbar“ gewertet, wird in der Darstellung jedoch als „(✓)“ gekennzeichnet.

Die Bewertung der Kontrollierbarkeit für Normalfahrer erfolgte bei der Standardversuchsgeschwindigkeit von 70 km/h, die auch als Versuchsgeschwindigkeit für die anschließenden Probandenstudien vorgesehen war. So wird die Kontrollierbarkeit für diese Studien mit Normalfahrern sichergestellt. Die Startgeschwindigkeit wurde von den Expertenfahrern nach Tachoanzeige eingestellt. Durch die Tachoabweichung liegen die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten bei ca. 62 bis 63 km/h. Die Fahrer fuhren auf einem vorgegebenen Abschnitt der Start-/Landebahn (Geradeausfahrt) und wurden nach Erreichen der Versuchsgeschwindigkeit vom Versuchsleiter ferngesteuert gebremst.

Entsprechend dem in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Vorgehen wurden die Kontrollierbarkeitsgrenzen mit jedem Teilnehmer für alle drei Teilbremsprofile (*Block*, *Rampe*, *Impuls*) durch sukzessives Steigern der Verzögerungen bzw. Verzögerungsgradienten ermittelt. Dabei wurde die Reihenfolge, in der die Experten mit den verschiedenen Profilen konfrontiert wurden, variiert, um Einflüsse durch Gewöhnungseffekte durch das häufige Wiederholen automatischer Bremsengriffe zu minimieren. Die Reihenfolge der Profile folgte dem in Tabelle 2-1 dargestellten Schema

Tabelle 5-1: Permutationsplan der Expertenstudie

Experte 1	<i>Impuls</i>	→	<i>Rampe</i>	→	<i>Block</i>
Experte 2	<i>Impuls</i>	→	<i>Block</i>	→	<i>Rampe</i>
Experte 3	<i>Rampe</i>	→	<i>Impuls</i>	→	<i>Block</i>
Experte 4	<i>Rampe</i>	→	<i>Block</i>	→	<i>Impuls</i>
Experte 5	<i>Block</i>	→	<i>Impuls</i>	→	<i>Rampe</i>

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die einzelnen Teilbremsprofile dargestellt.

Blockbremsung

Bei der *Blockbremsung* wird der Bremsdruck mit dem maximal durch den Bremsaktor realisierbaren Gradienten aufgebaut. Der Aufbau von 30 bar Bremsdruck am hinteren Hauptbremszylinder erfolgt in ca. 0,2 s. Die Kupplungsbetätigung findet 0,1 s vor Beginn des Bremsdruckaufbaus statt. Der Bremsdruck wird bis zum Stillstand des Fahrzeugs aufrechterhalten. Ein Beispiel für eine Zielverzögerung von 5 m/s^2 aus (nominellen) 70 km/h ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

Die Beschleunigungsdaten in allen nachfolgenden Darstellungen zur Expertenstudie sind tiefpassgefiltert⁸⁶. Die (GPS-)Geschwindigkeits- und Bremsdruckverläufe werden ungefiltert dargestellt. Die Filterparameter sind hierbei ein Kompromiss, der so gewählt ist, dass genügend Dynamik im Beschleunigungsauf- und -abbau erhalten bleibt, die Schwingungen des Signals aber trotzdem reduziert werden. Die verbleibenden Schwingungen in den Beschleunigungssignalen, insbesondere bei Geschwindigkeiten über 50 km/h, resultieren aus Radschwingungen.

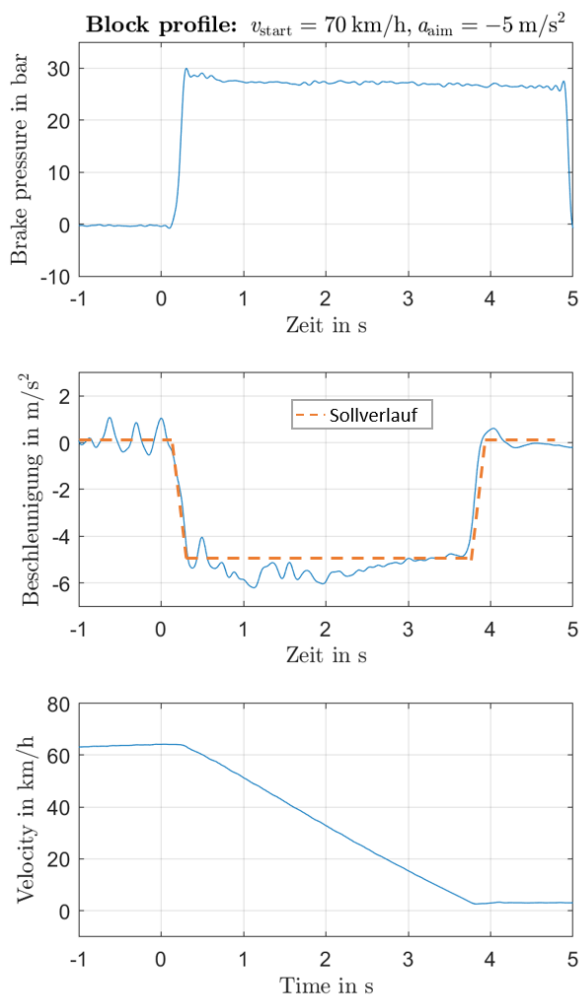


Abbildung 5-1: Verzögerungsprofil *Block* mit 5 m/s^2 aus Zielgeschwindigkeit 70 km/h

Ausgehend von einer Verzögerung von 2 bis $2,5 \text{ m/s}^2$ wurden die Experten Bremsungen ausgesetzt, die sie im direkten Anschluss mit „zumutbar“ und nicht „zumutbar“ bewerteten. Die Bewertung bezieht sich hierbei immer auf die Kontrollierbarkeit für einen unvorbereiteten Normalfahrer, der vom Eingriff überrascht wird. Es wurden von Bremsung zu Bremsung gesteigerte Verzögerungen eingestellt. Die Kontrollierbarkeitsbewertung für

⁸⁶ IIR-Filter, Butterworth, 1. Ordnung, Grenzfrequenz $3,5 \text{ Hz}$, durch Anwendung von Vorwärts- und Rückwärtsfilterung (MATLAB `filtfilt`) erhöht sich die Ordnung auf 2

das *Blockprofil* für eine Ausgangsgeschwindigkeit von 70 km/h kann Abbildung 5-2 entnommen werden.

Um die Grenze für zumutbare Verzögerungen für Normalfahrer festzulegen, wird zunächst die kleinste als „nicht zumutbar“ bewertete Verzögerung über alle Experten hinweg ermittelt. Ausgehend von dieser Verzögerung wird die nächstkleinere als „zumutbar“ bewertete Verzögerung identifiziert. Diese stellt die maximal für unvorbereitete Fahrer zumutbare Verzögerung dar. Für das *Blockprofil* ergibt sich eine maximal zumutbare Verzögerung von 5 m/s^2 . Das Vorgehen ist in Abbildung 5-2 skizziert.

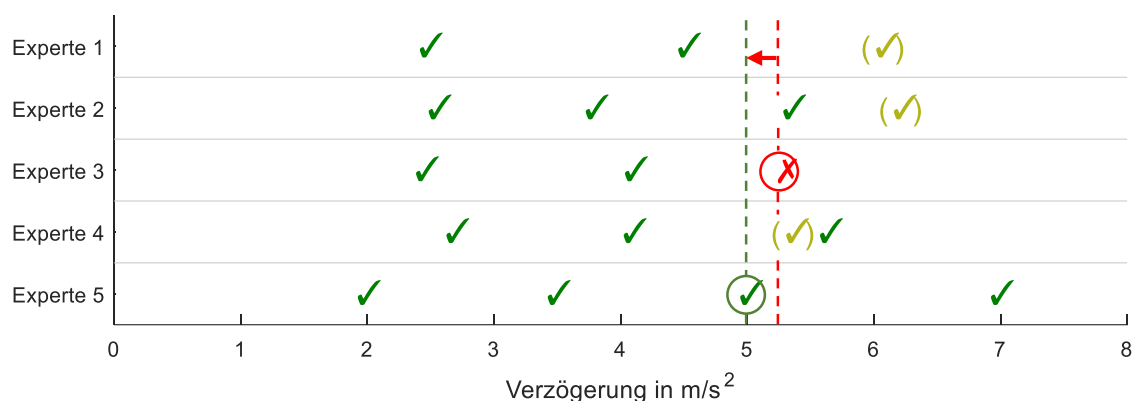


Abbildung 5-2: Kontrollierbarkeitsbewertung des *Blockprofils* bei 70 km/h (Tachoanzeige)

Zusätzlich zur Bewertung der Kontrollierbarkeit hatten die Experten die Möglichkeit, eine Subjektivbewertung zu jeder Bremsung abzugeben. Hierbei sollten keine zusätzlichen Erkenntnisse bezüglich der Kontrollierbarkeit generiert werden, vielmehr dient die Subjektivbewertung der Dokumentation zusätzlicher Effekte, die einen positiven oder negativen Einfluss auf das Erreichen der Bremsbereitschaft beim Fahrer haben könnten. Bei der *Blockbremsung* zeigt sich insbesondere, dass bereits das Öffnen der Kupplung und das damit einhergehende Wegfallen der Zugkraft die Aufmerksamkeit des Fahrers fördert. Der Effekt wird durch das Hochschnellen der Motordrehzahl, das aus der noch nicht zurückgestellten Gasgriffstellung resultiert, verstärkt. Es wird außerdem geäußert, dass die beginnende Verzögerung ein reflexartiges Greifen zu Kupplungs- und Bremshebel hervorruft. Die beschriebenen subjektiven Eindrücke der Experten weisen deutlich darauf hin, dass die *Blockbremsung* geeignet ist, Bremsbereitschaft beim Fahrer herzustellen. Ob der Effekt für unvorbereitete Normalfahrer in gleicher Weise zutrifft, bleibt im Rahmen der anschließenden Probandenstudie nachzuweisen.

Weiterhin stellt sich heraus, dass von manchen Experten stärkere Bremsungen sogar als angenehmer wahrgenommen werden, da hier die Aufforderung an den Fahrer, sich auf eine Bremsung vorzubereiten, klarer erkannt wird. Die zusammengefassten Aussagen der Experten zur *Blockbremsung* können der Tabelle in Anhang A.3.1 entnommen werden.

Bremsrampe

Zur Bewertung des Profils *Rampe* wird eine Zielverzögerung von 6 m/s^2 mit verschiedenen Gradienten aufgebaut und hinsichtlich der Zumutbarkeit für unvorbereitete Normalfahrer bewertet. Die Nutzung des Zielverzögerungslevels erfolgt unter der Annahme, dass die Experten als sehr routinierte Fahrer in der Lage sind, eine automatische Verzögerung dieser Höhe zu kontrollieren. Für Probandenversuche mit Normalfahrern ist das Zielverzögerungslevel auf die maximal kontrollierbare Verzögerung des *Blockprofils* zu begrenzen.

Analog zur *Blockbremsung* wird auch bei der *Rampe* die Kupplung $0,1 \text{ s}$ vor Bremsdruckaufbau geöffnet. Abbildung 5-3 zeigt eine Bremsung des Profils *Rampe* aus einer Geschwindigkeit von 90 km/h mit einem Gradienten von 3 m/s^3 . Der Bremsdruck zeigt ein leicht progressives Verhalten beim Anstieg, das vermutlich auf Elastizitäten im Bremssystem zurückzuführen ist. Der Effekt wird insbesondere bei niedrigen Gradienten deutlich, wie dem Bremsdruckverlauf in Abbildung 5-3 (oben) zu entnehmen ist.

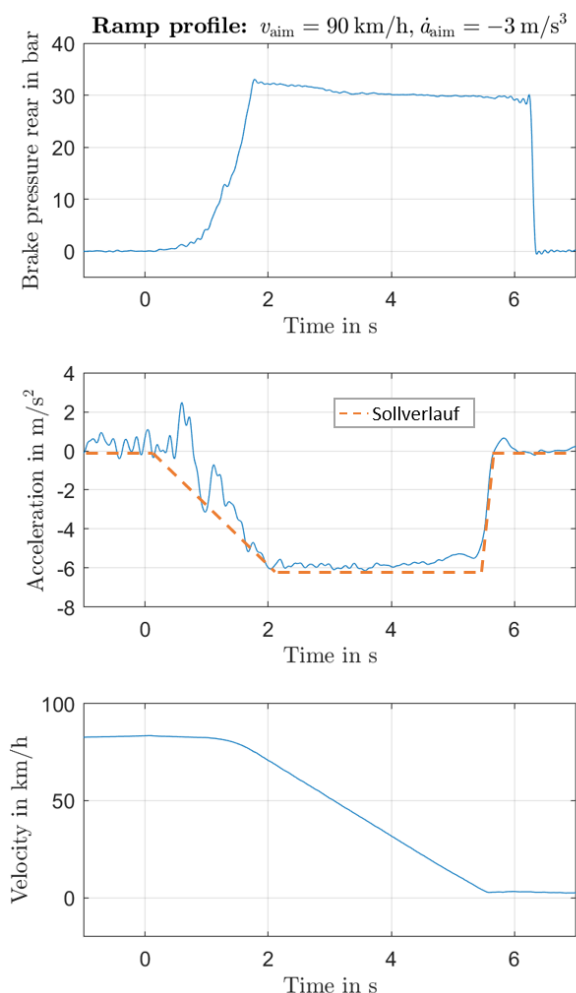


Abbildung 5-3: Verzögerungsprofil *Rampe* mit Gradient 3 m/s^3 aus Zielgeschwindigkeit 90 km/h

Auch hier erfolgt die Bewertung nach „zumutbar“ und „nicht zumutbar“. Wie Abbildung 5-4 zeigt, wurde im Fall des Profils *Rampe* keine Bremsung als „nicht zumutbar“ eingeordnet, obwohl die maximal erreichte Verzögerung auf dem Plateau im Mittel mit $5,5$ bis 6 m/s^2

höher liegt als die maximal zumutbare Verzögerung beim *Blockprofil*. Die Geschwindigkeit des Verzögerungsaufbaus scheint also einen messbaren Einfluss auf die maximal als zumutbar eingestuften Verzögerungen zu haben.

Die Experten schätzten Verzögerungsgradienten⁸⁷ zwischen 2,7 und 11,6 m/s³ durchweg als für unvorbereitete Normalfahrer zumutbar ein. Davon ausgehend, dass also alle Gradienten in diesem Bereich zumutbar sind, ist vor dem Hintergrund, dass mit einem Notbremssystem ein möglichst großer Geschwindigkeitsabbau angestrebt wird, ein hoher Gradient für die Probandenstudie zu wählen. Da es sich bei dem Gradienten von 11,6 m/s³ bei Experte 5 allerdings um einen systembedingten Ausreißer⁸⁸ handelt, der aus den gleichen Einstellungen wie die höchsten Gradienten bei Experte 2 und 4 resultiert, wird für die Parametrierung der Probandenstudie der nächstniedrigere Gradient von 9,1 m/s³ herangezogen.

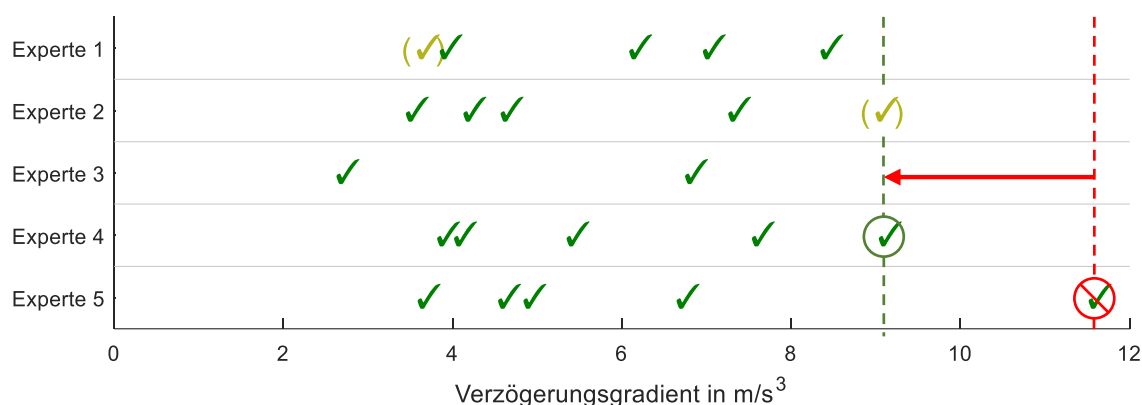


Abbildung 5-4: Kontrollierbarkeitsbewertung des *Rampenprofils* bei 70 km/h (Tachoanzeige)

Die Subjektivbewertung („Beschreibung der Notbremssituation“, siehe Tabelle in Anhang A.3.1) zeigt, dass insbesondere bei niedrigen Gradienten der sehr langsame Bremsdruckanstieg nach Öffnen der Kupplung irritierend ist, da die Zugkraft wegfällt, die Situation aber nicht sofort als Bremsengriff verstanden wird. Zusätzlich negativ wird bei niedrigen Gradienten der progressive Anstieg⁸⁹ des Bremsdrucks wahrgenommen. Hierbei muss der Fahrer die Abstützung seiner Oberkörperbewegung kontinuierlich einem sich ändernden Verzögerungsverlauf (und damit sich ändernden auf den Körper wirkenden Trägheitskräften) anpassen. Die kürzere Anpassungsphase bei stärkeren Gradienten wird als

⁸⁷ Ermittelt als mittlere Steigung des Verzögerungsverlaufs mit Beginn 100 ms nach Auslösung (hier beginnt der Schrittmotor den Fußbremshebel zu betätigen) und Ende bei Erreichen des „Verzögerungsplateaus“.

⁸⁸ Der Bremsaktor stellte sich nach der vorherigen Bremsung nicht korrekt zurück und war dadurch „vorgespannt“ und erreichte so einen höheren Zielwert als vorgesehen.

⁸⁹ Systembedingt erfolgt der Aufbau des Bremsdrucks bis etwa 5 bar flacher und erreicht erst dann den gewünschten Gradienten. Je flacher der eingestellte Verzögerungsgradient, desto eher wird dieser Effekt vom Fahrer wahrgenommen.

einfacher umsetzbar beschrieben. Zusätzlich zum Vorteil des stärkeren Geschwindigkeitsabbaus spricht also auch die Subjektivbewertung für die Anwendung höherer Gradienten für das *Rampenprofil*.

Im Vergleich von *Block-* und *Rampenprofil* werden sich die Experten bezüglich einer Präferenz nicht einig. Teilweise wird die *Rampe* als besser geeignet bewertet. Argument ist hierbei, dass der Fahrer mehr Zeit hat, sich auf die Bremsung einzustellen als beim *Blockprofil*. Im Gegensatz dazu bewerteten andere Experten die *Blockbremsung* besser, was damit begründet wird, dass sofort klar wird, dass das Fahrzeug eigenständig verzögert und so schneller reagiert werden kann. Es ist also zu evaluieren, ob sich diese gegensätzlichen Subjektivbewertungen auch im Probandenversuch mit unvorbereiteten Normalfahrern zeigen, oder ob hier eine Präferenz festgestellt werden kann.

Bremsimpuls

Beim *Bremsimpuls* wird der aufgebaute Bremsdruck nicht gehalten, sondern direkt wieder abgebaut. Im Gegensatz zu den beiden zuvor beschriebenen Profilen wird hierbei die Kupplung nicht geöffnet und es erfolgt keine Verzögerung in den Stand. Wie Abbildung 5-5 zeigt, ist der *Bremsimpuls* im Geschwindigkeitsverlauf erkennbar, führt jedoch nicht wie bei den Profilen *Block* und *Rampe* zu einem deutlichen Geschwindigkeitsabbau.

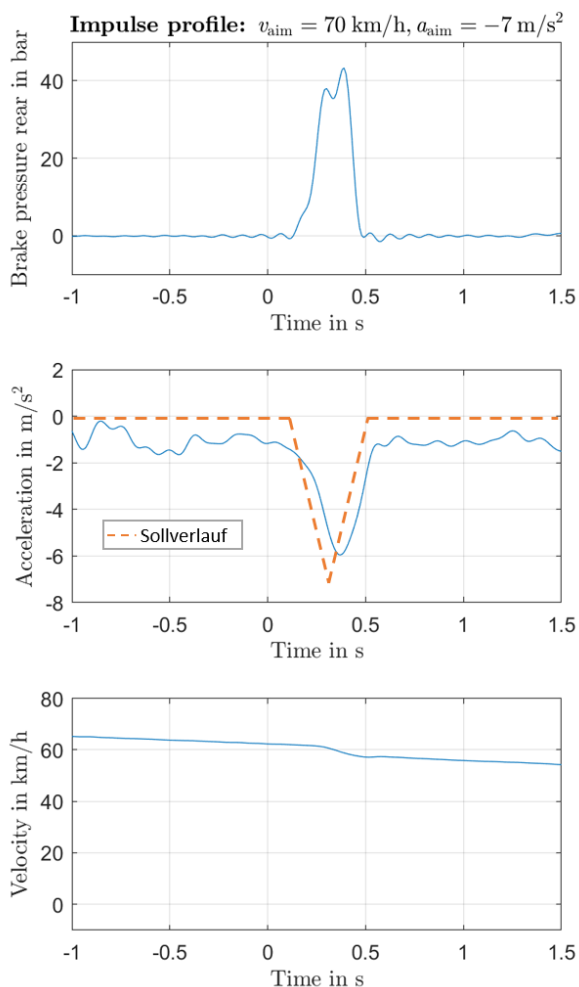


Abbildung 5-5: Verzögerungsprofil *Impuls* mit 7 m/s^3 aus Zielgeschwindigkeit 70 km/h

Die Bestimmung der Grenze der Kontrollierbarkeit für unvorbereitete Normalfahrer für das *Impulsprofil* erfolgt analog zur *Blockbremsung*. Die niedrigste als „nicht zumutbar“ bewertete Verzögerung liegt bei $5,6 \text{ m/s}^2$. Die nächstniedrigere als „zumutbar“ bewertete Verzögerung liegt bei $4,7 \text{ m/s}^2$ (siehe Abbildung 5-6). Hier liegt somit die Grenze der maximal kontrollierbaren Verzögerung für den *Impuls* bei einer Startgeschwindigkeit von 70 km/h .

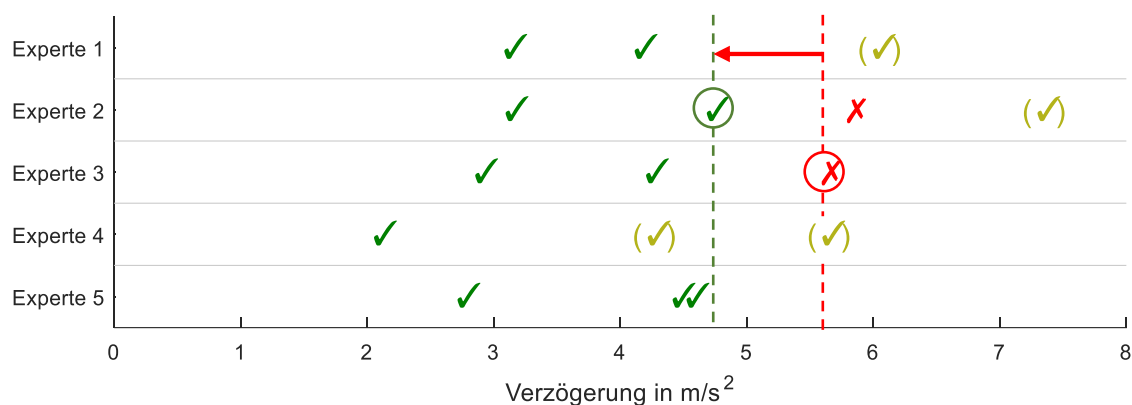


Abbildung 5-6: Kontrollierbarkeitsbewertung des *Impulsprofils* bei 70 km/h (Tachoanzeige)

Die Subjektivbewertung („Beschreibung der Notbremssituation“, siehe Tabelle in Anhang A.3.1) ergibt, dass beim *Bremsimpuls* durch das fehlende Öffnen der Kupplung bei niedrigen Verzögerungen von 2 bis 3 m/s^2 der Eingriff kaum zuzuordnen ist. Mehrere Experten merken an, dass der *Bremsimpuls* kaum von einer Bodenwelle zu unterscheiden sei. Stärkere *Impulse* werden dahingegen als sehr geeignete Warnung oder Aufforderung zum Bremsen wahrgenommen. Es wird jedoch auch angemerkt, dass der *Impuls* den größten Überraschungseffekt hat und damit am meisten Gefahr für eine fehlerhafte Reaktion des Fahrers birgt.

Eine Auffälligkeit wird außerdem bei der Oberkörperbewegung beobachtet. Der Oberkörper wird – wie bei *Blockbremsung* und *Rampe* auch – während der Bremsung nach vorne verlagert. Durch das sofort darauffolgende Nachlassen der Verzögerung folgt eine Oberkörperbewegung nach hinten relativ zum Fahrzeug. Hier wird beschrieben, dass diese Rückverlagerung des Oberkörpers insbesondere bei mittleren Verzögerungen genau in dem Moment stattfindet, in dem der Fahrer als Reaktion auf den Eingriff zu Kupplung und Bremse greifen möchte. Diese durchaus gewünschte Aktion wird dadurch behindert, dass die Rückverlagerung des Oberkörpers durch Festhalten am Lenker abgefangen werden muss. Bei höheren Verzögerungen wird der beschriebene Effekt nicht mehr wahrgenommen, da hier eine stärkere Oberkörperverlagerung stattfindet, die genügend Zeit für die gewünschte Reaktion lässt. Dieser Effekt und eventuell störende Einflüsse durch Eingriffe in Form von *Impulsbremsungen* sind in der anschließenden Probandenstudie zu betrachten.

5.1.2 Parametrierung der Teilbremsprofile

Mit der Kontrollierbarkeitsbewertung durch die Expertenfahrer sind für die drei Bremsprofile *Block*, *Rampe* und *Impuls* Verzögerungen bzw. Verzögerungsgradienten ermittelt, die einem unvorbereiteten Normalfahrer bei einer nominellen Ausgangsgeschwindigkeit von 70 km/h maximal zugemutet werden können. Die ermittelten Maximalwerte sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Ermittelte kontrollierbare Verzögerungen/Verzögerungsgradienten der Teilbremsprofile bei 70 km/h

Bremsprofil	Variierter Parameter	Ermittelter Maximalwert
Blockbremsung	Verzögerung	5 m/s ²
Bremsrampe	Verzögerungsgradient	9,1 m/s ³
Bremsimpuls	Verzögerung	4,7 m/s ²

Die ermittelten Parameter dienen als Grundlage für die nachfolgenden Probandenstudien (gemäß Abschnitt 4.2), um zu untersuchen welches Sicherheitspotential die untersuchten Bremsprofile als vorbereitende Teilbremsung bieten und wie unvorbereitete Fahrer darauf reagieren. Die zumutbaren Verzögerungen bzw. Verzögerungsgradienten wurden bei einer nominellen Ausgangsgeschwindigkeit von 70 km/h ermittelt und dürfen bei unvorbereiteten Probanden auch nur bei dieser Versuchsgeschwindigkeit angewendet werden, da nicht ausgeschlossen ist, dass die maximal zumutbare Verzögerung von der Ausgangsgeschwindigkeit abhängt. Erste Untersuchungen zum Geschwindigkeitseinfluss auf die Kontrollierbarkeit von Verzögerungen liefert der folgende Abschnitt.

5.1.3 Geschwindigkeitsvariation

Neben der Kontrollierbarkeit der Bremsungen bei der für den Probandenversuch vorgesehenen Geschwindigkeit von 70 km/h wurde die Kontrollierbarkeit der verschiedenen Bremsprofile von den Experten auch bei den Ausgangsgeschwindigkeiten 45 km/h und 90 km/h bewertet. Das Ziel besteht hierbei darin, zu untersuchen, ob die Geschwindigkeit bei Beginn eines automatischen Bremseingriffs einen Einfluss auf die maximal zumutbare Verzögerung hat.

Um den Geschwindigkeitseinfluss zu betrachten, wird die Zumutbarkeitsbewertung bei verschiedenen Verzögerungen über den zugehörigen Startgeschwindigkeiten aufgetragen. Abbildung 5-7 zeigt die Bewertungen für das *Blockprofil* für alle Experten zusammengefasst.

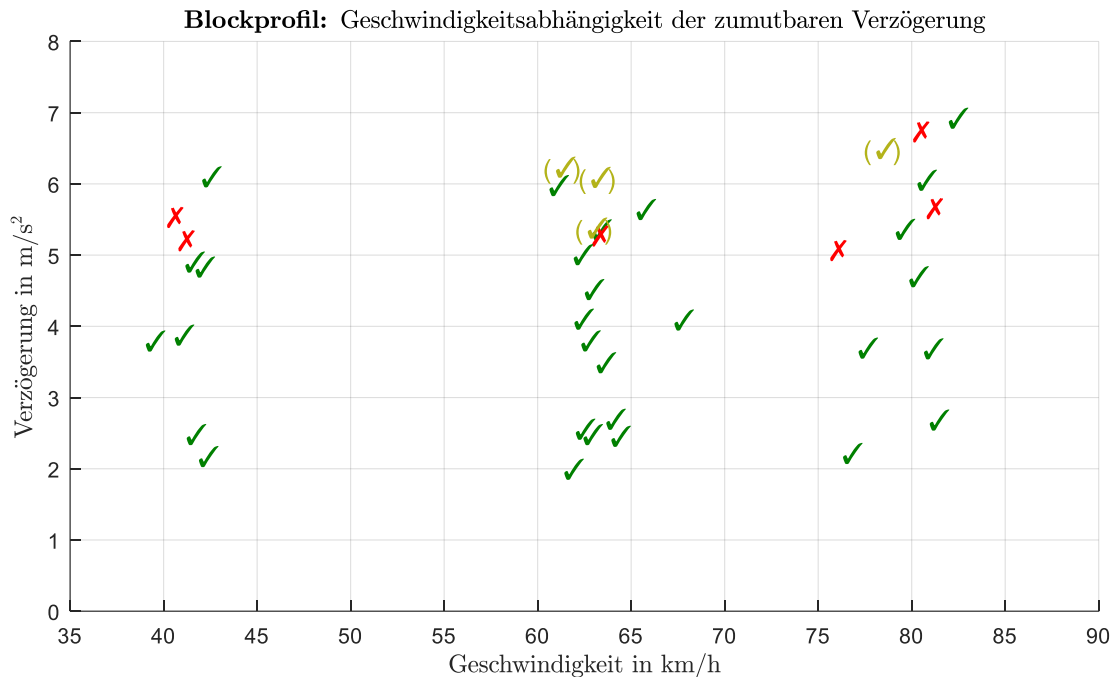


Abbildung 5-7: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Kontrollierbarkeitsgrenze beim *Blockprofil*

Hier ist zunächst keine Tendenz zu verschiedenen Zumutbarkeitsschwellen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ersichtlich. Für alle getesteten Geschwindigkeitsbereiche werden Verzögerungen ab ca. 5 m/s^2 erstmals als für unvorbereitete Normalfahrer als nicht mehr kontrollierbar eingeordnet. Zu beachten ist jedoch, dass mit allen Experten zuerst die Versuche bei 70 km/h durchgeführt wurden, um für die Parametrierung der Probandenversuche eine möglichst unvoreingenommene Bewertung sicherzustellen. Somit ist nicht auszuschließen, dass sich bei den späteren Versuchen bei niedrigeren und höheren Geschwindigkeiten Gewöhnungseffekte zeigen. Um den Geschwindigkeitseinfluss detaillierter zu untersuchen, sind weitere Versuche mit unvoreingenommenen Experten durchzuführen. Die ermittelte maximal zumutbare Verzögerung gilt zunächst nur bei einer nominellen Versuchsgeschwindigkeit von 70 km/h .

Für das *Rampenprofil* zeigt sich bereits bei der Kontrollierbarkeitsbewertung bei 70 km/h in Abschnitt 5.1.1, dass die *Rampe* im Vergleich zu den anderen Bremsprofilen als unkritischer eingeschätzt wird. Im Rahmen der Untersuchung der Geschwindigkeitsabhängigkeit zeigt sich, dass das *Rampenprofil* auch für die anderen Versuchsgeschwindigkeiten für alle getesteten Gradienten als zumutbar bewertet wird (siehe Abbildung 5-8). Es ist also davon auszugehen, dass innerhalb der betrachteten Geschwindigkeitsspanne (nominelle Versuchsgeschwindigkeiten 45 bis 90 km/h) *Rampenprofile* mit dem genannten Gradienten angewendet werden können. Wie für das *Blockprofil* gilt jedoch auch hier, dass Gewöhnungseffekte nicht ausgeschlossen werden können und daher die Anwendung des ermittelten maximal zumutbaren Verzögerungsgradienten von $9,1 \text{ m/s}^3$ zunächst nur für Versuchsgeschwindigkeiten von 70 km/h erfolgt.

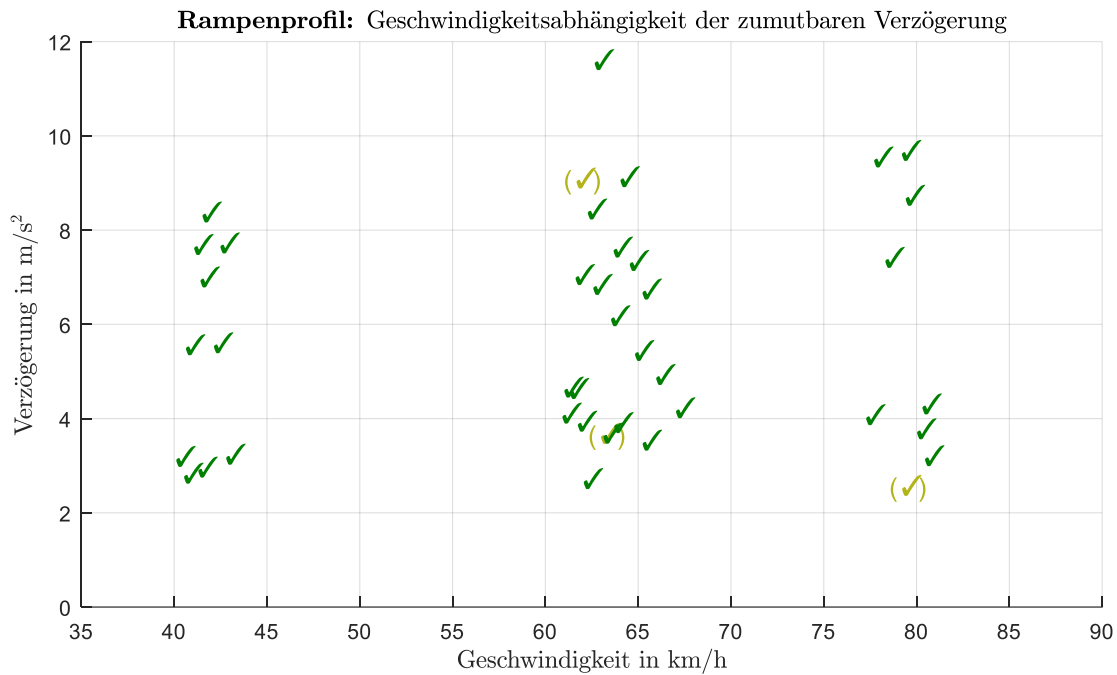


Abbildung 5-8: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Kontrollierbarkeitsgrenze beim *Rampenprofil*

Für den *Bremsimpuls* zeigen sich bei Variation der Versuchsgeschwindigkeit im Vergleich zu *Block* und *Rampe* deutlichere Unterschiede (vgl. Abbildung 5-9). Bei der kleinsten Geschwindigkeit (45 km/h Tachoanzeige) bewerten alle Experten alle untersuchten Verzögerungen als zumutbar. Bei 70 km/h erfolgt die erste Bewertung als „nicht zumutbar“ bei einer Verzögerung von 5,6 m/s², während bei 90 km/h bereits eine Verzögerung von 5 m/s² als nicht mehr zumutbar eingeschätzt wurde. Es zeigt sich somit eine leichte Tendenz zu sinkenden maximal zumutbaren Verzögerungen bei steigenden Versuchsgeschwindigkeiten. Wie auch bei den anderen Bremsprofilen gilt jedoch auch hier, dass Gewöhnungseffekte möglich sind und außerdem die Datenbasis nicht ausreicht, um sichere Aussagen bei niedrigeren und höheren Geschwindigkeiten zu treffen. Es sind also zusätzliche Versuche nötig, um die gezeigte Tendenz zu bestätigen.

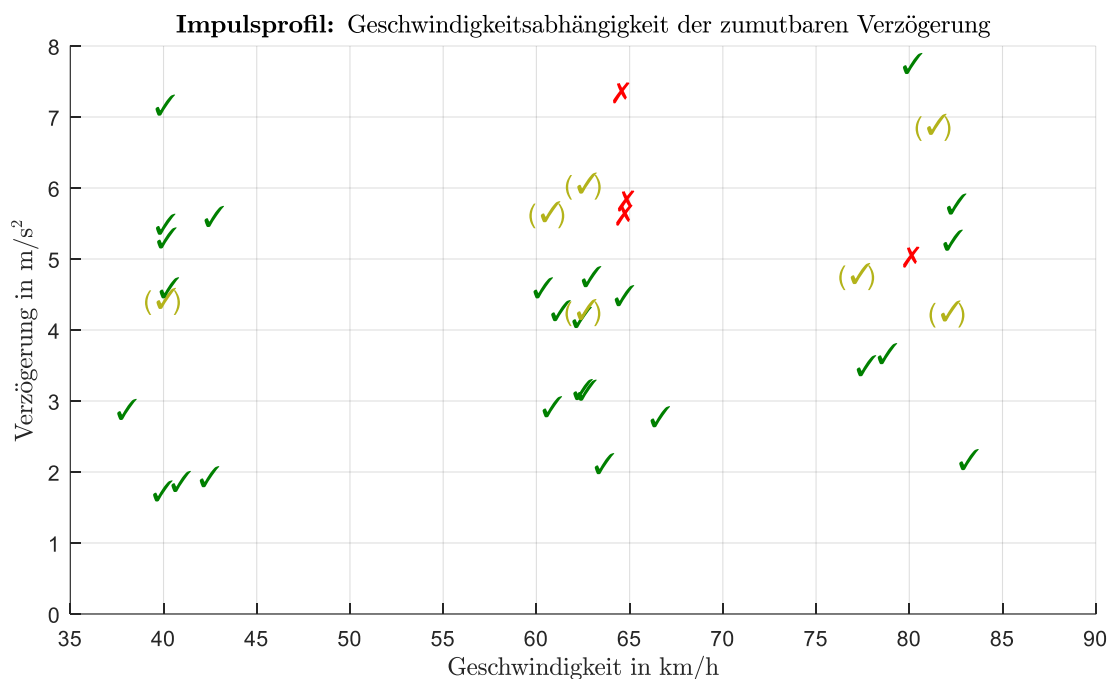


Abbildung 5-9: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Kontrollierbarkeitsgrenze beim *Impulsprofil*

5.1.4 Kurvenfahrt

Analog zu den Versuchen in Geradeausfahrt wurden mit den Experten auch Bremsungen in Kurvenfahrt durchgeführt. Dazu wurde eine Kurve mit einem Radius von ca. 25 m auf dem Testgelände ausgewählt. Es handelt sich hierbei um den kleinsten verfügbaren Radius, bei dem durchgehende Fahrstreifenmarkierungen gegeben sind. Der kleine Radius sorgt dafür, dass schon bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten merkliche Rollwinkel erreicht werden. Eine Variation der Rollwinkel fand statt, indem die Versuchsgeschwindigkeit variiert wurde. Die Versuche wurden bei 30 km/h und bei 50 km/h durchgeführt. Versuche bei höheren Geschwindigkeiten fanden aus Sicherheitsgründen nicht statt.

Auch hier wurde mit niedrigen Verzögerungen bzw. Verzögerungsgradienten begonnen, die gesteigert wurden, bis die Experten die Bremsung als „nicht mehr zumutbar“ bewerteten. In Abbildung 5-10 ist die Kontrollierbarkeit über Verzögerung und Rollwinkel aufgetragen. Hier fällt auf, dass Verzögerungen erst bei über 30° Rollwinkel als nicht mehr zumutbar bewertet werden, was in der gegebenen Kurve mit 25 m Radius einer Geschwindigkeit von ca. 50 km/h entspricht. Dabei werden bei diesen Rollwinkeln bereits vergleichsweise geringe Verzögerungen (ca. 3,5 m/s²) als nicht mehr zumutbar bewertet.

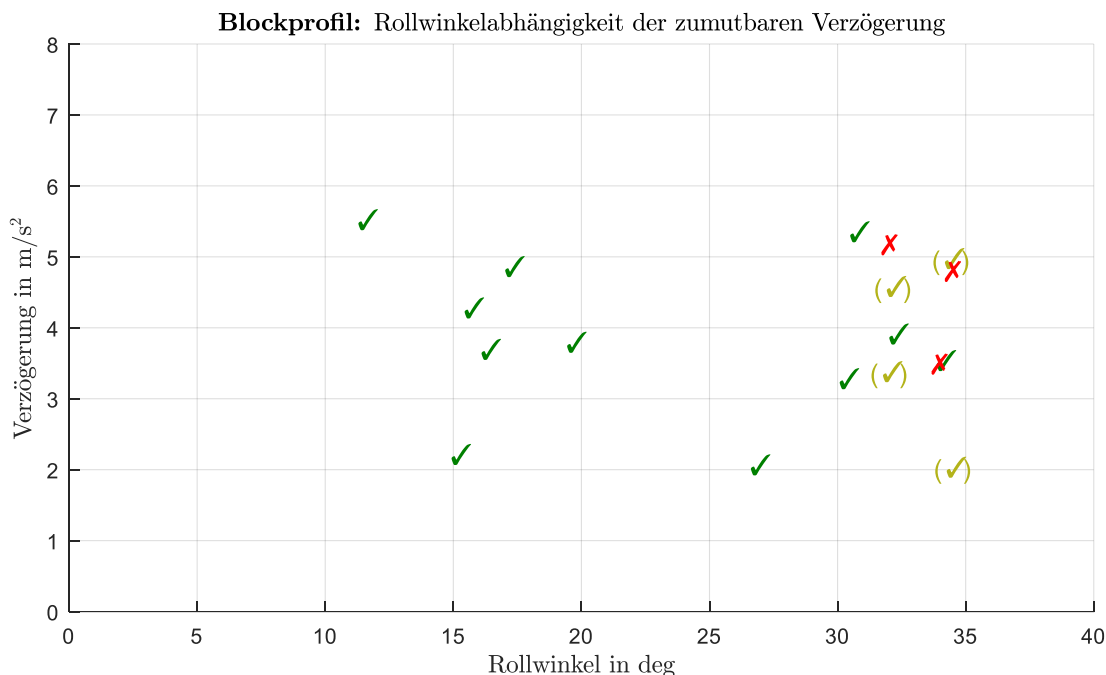


Abbildung 5-10: Rollwinkelabhängigkeit der Kontrollierbarkeit von Verzögerungen in Kurvenfahrt bei einer Kurvenkrümmung von $0,04 \text{ m}^{-1}$, zwei Rollwinkelcluster ergeben sich aus den Ausgangsgeschwindigkeiten 30 km/h und 50 km/h

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass es Rollwinkelgrenzen gibt, jenseits derer automatische Verzögerungen für unvorbereitete Normalfahrer nicht mehr kontrollierbar sind. Durch das eingeschränkte Versuchsdesign (nur ein Kurvenradius, aus Sicherheitsgründen begrenzte Geschwindigkeit) kann jedoch nicht geklärt werden, ob sich die Zumutbarkeitsgrenze bei gleichen Rollwinkeln bei größeren Geschwindigkeiten (also größeren Kurvenradien) verschiebt.

Des Weiteren handelt es sich beim Versuchsfahrzeug nach Aussage der Experten um ein sehr kurvenstabiles Fahrzeug. Hier sind zukünftig weitere Fahrzeuggeometrien zu untersuchen, um zu analysieren, inwieweit sich unterschiedliche Fahrzeugtypen auf die Zumutbarkeit von automatischen Verzögerungen in Kurvenfahrt auswirken.

5.2 Potentialermittlung – Probandenstudie 1

In der ersten Probandenstudie soll im Anschluss an die Expertenstudie ermittelt werden, wie schnell die Teilbremsprofile *Block*, *Rampe* und *Impuls* den Fahrer dazu veranlassen, den bremsbereiten Zustand einzunehmen und wie viel Geschwindigkeit bereits während dieser Transitionsphase abgebaut werden kann. So kann bewertet werden, welches Teilbremsprofil das größte Sicherheitspotential (d.h. den größten Abbau kinetischer Energie) bietet. Dazu wird gemäß der Beschreibung in Abschnitt 4.2.2 mithilfe des Dummy Targets EVITA eine Notbremsituation nachgestellt.

Die Probanden folgen dem Dummy Target bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h im vorgegebenen Abstand, der dem Probanden per Ampel angezeigt wird und auf eine Zeitlücke von 1,5 s bei 70 km/h, also 29,2 m eingestellt ist. Dieser Abstand hat sich in früheren Studien mit EVITA zu Frontkollisionsschutzsystemen bewährt⁹⁰ und wurde deshalb auch für die Studien im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzt. Zum Auslösezeitpunkt $t = 0$ erfolgt die Verzögerung von EVITA. Gleichzeitig beginnt der automatische Bremsdruckaufbau am Motorrad, um das jeweilige Verzögerungsprofil darzustellen. Abbildung 5-11 zeigt beispielhaft den idealen Verzögerungsverlauf für das Teilbremsprofil *Block*. Der Verzögerungsaufbau erfolgt bis zu der im Expertenversuch ermittelten Grenze D_{Block} , bei der die Kontrollierbarkeit für unvorbereitete Fahrer noch gegeben ist. Durch die Teilbremsung wird der Fahrer dazu veranlasst, den bremsbereiten Zustand einzunehmen. Sobald der Fahrer diesen Zustand erreicht hat (= Ende der Transitionsphase), erhöht er im Idealfall selbst durch Bremsbetätigung die Verzögerung auf ein maximal mögliches Niveau D_{max} . Alternativ könnte diese Maximierung der Verzögerung auch durch das Notbremssystem erfolgen, um einen idealen Verzögerungsaufbau zu ermöglichen.

In den hier beschriebenen Versuchen wurde nur die Phase bis zum Erreichen des Transitionsendes dargestellt, da hiermit das Versuchsziel erreicht ist. Ein anschließendes Erhöhen der Verzögerung erfolgte nicht. Die Verzögerung wurde im Fall des *Block*- bzw. *Rampenprofils* bis zum Stillstand auf einem konstanten Niveau gehalten. Bei *Impulsbremsung* bzw. Referenzbremsungen wurde der Proband durch den Versuchsleiter zum Anhalten veranlasst.

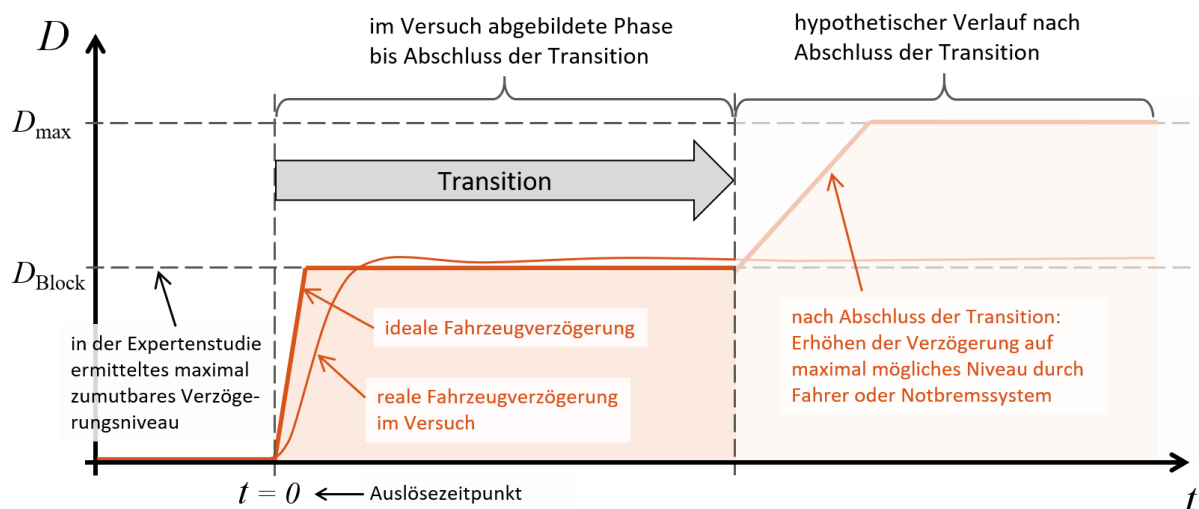


Abbildung 5-11: Schematischer Ablauf des Versuchs am Beispiel einer *Blockbremsung*

Die Versuche wurden mit 18 Fahrern durchgeführt. Bei den Probanden handelt es sich um Personen aus dem am Fachgebiet Fahrzeugtechnik geführten Probandenpool sowie um Personen aus dem studentischen Umfeld des Fachgebiets.

⁹⁰ Expertenaussage von Dr. Norbert Fecher im Juli 2018

Bei zwei Bremsversuchen pro Proband (siehe Abschnitt 4.2.2) bleiben nach Abzug der ungültigen Versuche 19 auswertbare Bremsmanöver übrig, die sich wie folgt verteilen:

- 5x Blockbremsung
- 5x Bremsrampe
- 5x Impuls
- 4x Referenzbremsung ohne automatischen Eingriff

5.2.1 Messdatenauswertung

Die Messdaten für die Probanden-Fahrversuche werden im Folgenden für alle Bremsprofile in der gleichen Form (siehe Beispiel in Abbildung 5-12) dargestellt. Im oberen Diagramm wird jeweils der Fahrzeugzustand gezeigt. Hierzu zählt neben der aus dem GPS-Signal bestimmten Fahrzeuggeschwindigkeit v und der Fahrzeugbeschleunigung $a_{v,x}$ der durch den Bremsaktor erzeugte Bremsdruck am hinteren Hauptbremszylinder $p_{\text{HBZ,Fuß}}$.

Das untere Diagramm zeigt die Fahrerreaktion auf die Fahrzeugverzögerung $a_{v,x}$. Zur Fahrerreaktion zählen die Fahreroberkörperbeschleunigung $a_{x,R}$, die Kraft F_H , mit der der Fahrer sich an der Lenkstange abstützt sowie der über den Handbremshebel erzeugte Bremsdruck $p_{\text{HBZ,Hand}}$ am vorderen Hauptbremszylinder⁹¹. Für *Impuls* und Referenzbremsungen wird außerdem die Kupplungsbetätigung dargestellt. Für *Block* und *Rampe* wird auf die Darstellung der Kupplungsbetätigung verzichtet, da diese bereits direkt nach der Auslösung durch den Kupplungsaktor stattfindet.

Der Nullpunkt auf der Zeitachse repräsentiert den Zeitpunkt der Auslösung von EVITA und ggf. des Bremseingriffs. Auf die Rohdaten der Beschleunigungen und Lenkerabstützkräfte wird für alle Messreihen ein Tiefpassfilter⁹² angewendet.

Wie zu Beginn von Abschnitt 5.2 beschrieben, erfolgt in den Versuchen die Bremsung bei den Profilen *Block* und *Rampe* bis in den Stillstand (siehe Beispiel *Block* in Abbildung 5-12). In allen weiteren Darstellungen in diesem Kapitel wird nur der Beginn der Bremsung (bis $t = 2,5$) gezeigt, da es sich dabei um den für die Transition relevanten Zeitabschnitt des Versuchs handelt.

⁹¹ In den Bremsungen mit Block- oder Rampenprofil wird der Handbremshebel üblicherweise nicht betätigt, wodurch der Bremsdruck – wie auch in der Beispielabbildung – 0 bleibt.

⁹² IIR-Filter, Butterworth, 1. Ordnung, Grenzfrequenz 2 Hz, durch Anwendung von Vorwärts- und Rückwärtsfilterung (MATLAB `filtfilt`) erhöht sich die Ordnung auf 2

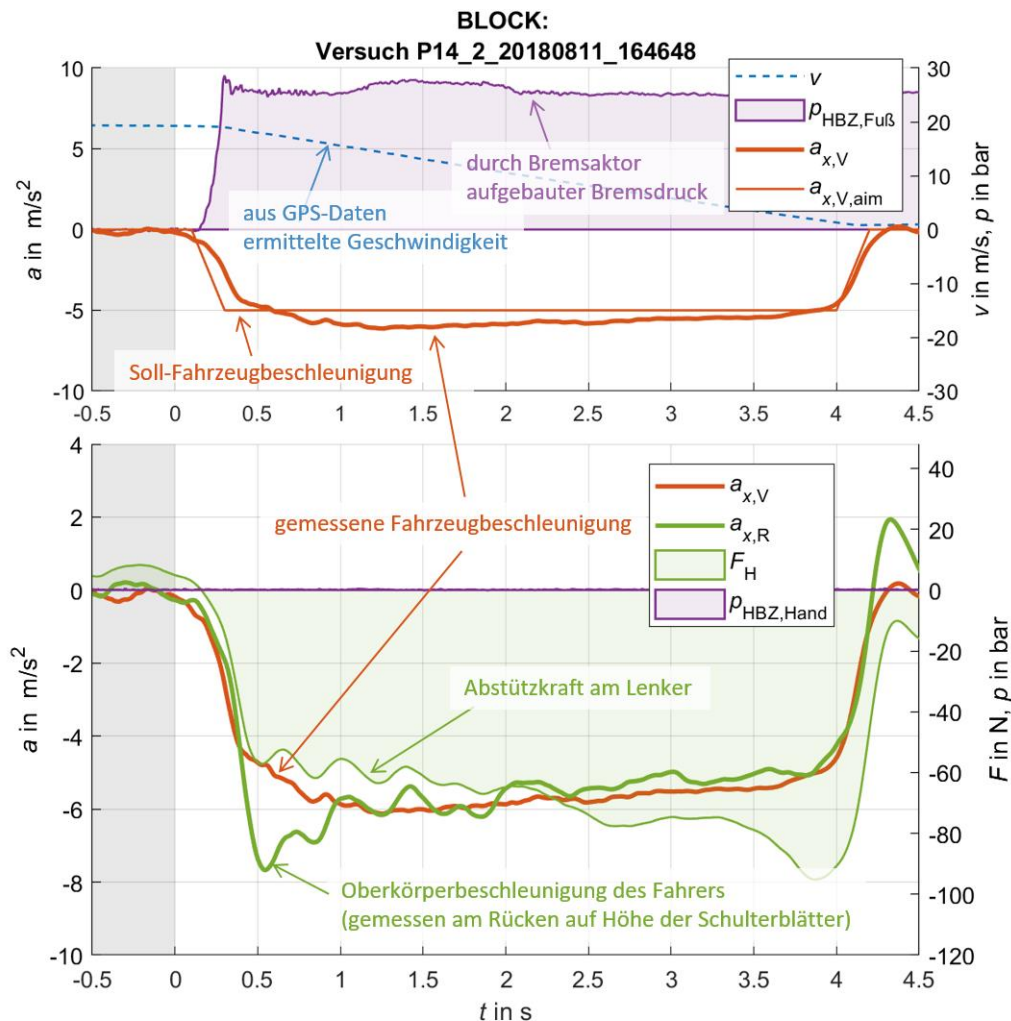


Abbildung 5-12: Beispielhafte Darstellung der Messdaten einer *Blockbremsung* mit Sollverzögerung 5 m/s^2 aus einer Sollgeschwindigkeit von 70 km/h ($19,4 \text{ m/s}$)

Für alle Bremsungen wird ermittelt, wann der Proband sich auf die durch den Bremsengriff auftretende Beschleunigung eingestellt hat. Dieser Zeitpunkt stellt die abgeschlossene Transition dar. Welche Kennwerte dazu herangezogen werden, wird im Folgenden für die einzelnen Bremsprofile erläutert.

Da in den Verläufen der Kennwerte keine signifikanten Unterschiede zwischen erster und zweiter Bremsung der jeweiligen Probanden auftraten, wird im Folgenden keine Unterscheidung zwischen Erst- und Zweitkontakt vorgenommen.

5.2.1.1 Blockprofil

Abbildung 5-13 zeigt die Messdaten für eine durchgeführte *Blockbremsung*. Bei *Blockbremsungen* erfolgt der Aufbau des Zielbremsdrucks ab Auslösung in weniger als $0,3 \text{ s}$. Alle weiteren Datensätze für die *Blockbremsungen* können Anhang A.3.2 entnommen werden. Für alle *Blockbremsungen* wird ermittelt, wann die Transition abgeschlossen ist. Die Messdaten zeigen, dass zunächst die Fahrzeugverzögerung aufgebaut wird, die

Verzögerung des Fahreroberkörpers folgt mit leichtem Zeitverzug. Das ist darin begründet, dass der Fahreroberkörper durch die unerwartete Verzögerung zunächst durch die wirkende Trägheitskraft relativ zum Fahrzeug vorverlagert wird. Erst durch Abstützen am Lenker und Wiederaufrichten des Oberkörpers wird die Fahreroberkörperverzögerung der Fahrzeugverzögerung angepasst. Die Transition gilt dann als abgeschlossen, wenn die Lenkerkraft nicht mehr weiter zunimmt bzw. die Fahrerverzögerung nicht mehr ansteigt. Beide Zeitpunkte sind im unteren Diagramm in Abbildung 5-13 markiert. Der früher eintretende der beiden Zeitpunkte wird als Abschluss der Transition gewertet. Die ermittelten Transitionsdauern sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst.

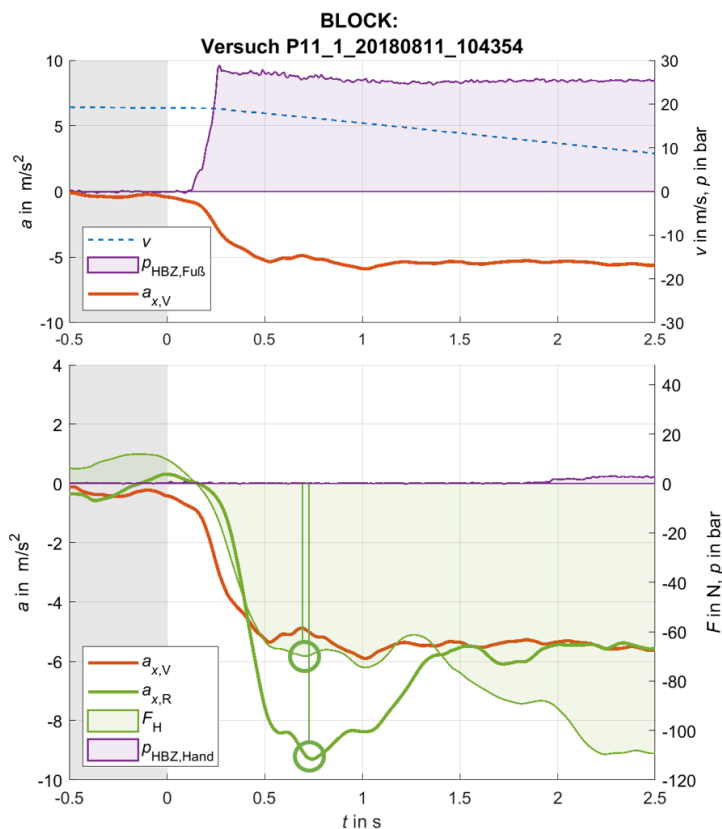


Abbildung 5-13: Ermitteln des Transitionsendes für das Teilbremsprofil *Block* anhand des Endes des Verzögerungsaufbaus am Fahreroberkörper bzw. des Lenkerkraftaufbaus

Tabelle 5-3: Ermittelte Transitionsdauern für das Teilbremsprofil *Block*

Versuch	Transitionsdauer in s	Abgebaute Geschwin- digkeit in m/s
P01_2	0,65	1,58
P10_1	0,52	1,26
P11_1	0,71	2,13
P14_2	0,52	1,38
P17_2	0,46	1,07
Ø	0,57 ± 0,1	1,48 ± 0,41

Es ergibt sich eine durchschnittliche Transitionszeit von 0,57 s. In dieser Zeit werden durchschnittlich 1,48 m/s Geschwindigkeit abgebaut.

5.2.1.2 Rampenprofil

Im Vergleich zur *Blockbremsung* wird der Bremsdruck bei der *Bremsrampe* langsamer aufgebaut. Der Druckaufbau beginnt nach ca. 0,3 s mit einem niedrigen Gradienten und steigt dann progressiv an, bis nach etwa 0,8 s das Zielverzögerungsniveau von 5 m/s^2 (entspricht der maximal kontrollierbaren Verzögerung beim *Blockprofil*) erreicht ist.

Die Auswertung der abgeschlossenen Transition erfolgt analog zur *Blockbremsung*. Ein beispielhafter Datensatz ist in Abbildung 5-14 dargestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst.

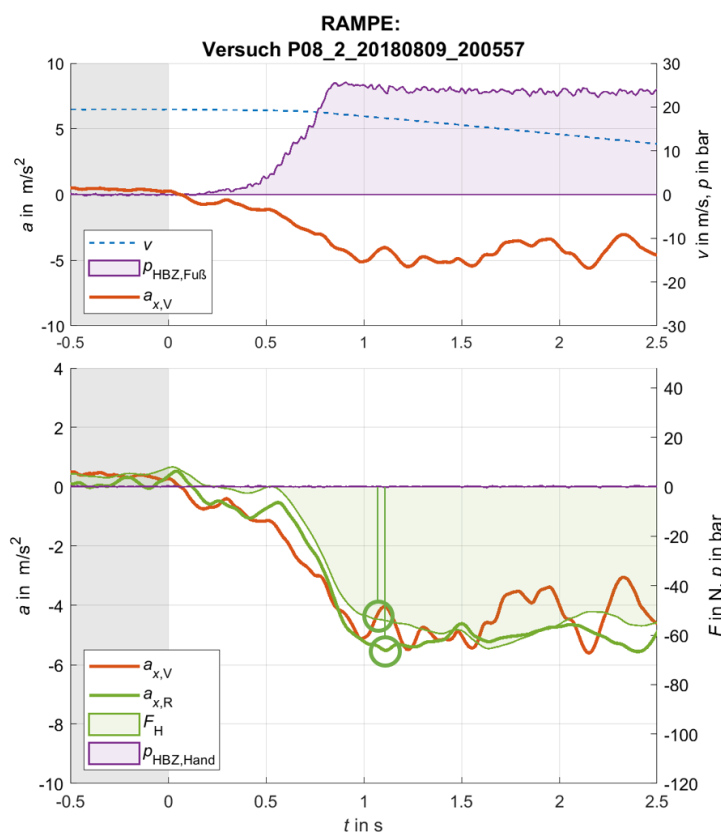


Abbildung 5-14: Ermitteln des Transitionsendes für das Teilbremsprofil *Rampe* anhand des Endes des Verzögerungsaufbaus am Fahreroberkörper bzw. des Lenkerkraftaufbaus

Tabelle 5-4: Ermittelte Transitionsdauern für das Teilbremsprofil *Rampe*

Versuch	Transitionsdauer in s	Abgebaute Geschwin- digkeit in m/s
P04_1	0,96	1,29
P07_1	1,09	1,86
P08_2	1,06	1,81
P12_1	1,04	1,68
P18_2	1,03	1,81
Ø	1,04 ± 0,05	1,69 ± 0,23

Die Transitionsdauer für die *Bremsrampe* beträgt durchschnittlich 1,04 s und ist damit deutlich länger als für die *Blockbremsung*. Im Vergleich zur *Blockbremsung* wird jedoch durch den langsameren Bremsdruckaufbau trotz der fast verdoppelten Zeitspanne jedoch nur geringfügig mehr Geschwindigkeit abgebaut. Die abgebaute Geschwindigkeit beträgt durchschnittlich 1,69 m/s. Damit zeigt sich, dass die *Blockbremsung* als Transitionsinitiator wirksamer erscheint, wobei zu bedenken ist, dass die Transitionszeit, wenn sie über die Maximumlage definiert wird, prinzipiell durch die *Rampenform* verlängert wird. Die Fahrzeugbeschleunigung selbst steigt noch bis ca. 0,8 s an, vorher ist also auch kein Ende des Anstiegs in der Fahreroberkörperbeschleunigung zu erwarten. Wäre die Transition bereits früher abgeschlossen, würde eine „feste“ Anbindung ans Motorrad vorliegen, würden die Anstiege von Fahrer- und Fahrzeugverzögerung zum gleichen Zeitpunkt enden. Aber wie in Abbildung 5-14 zu sehen, kann ein früherer Abschluss der Transition ausgeschlossen werden, da das Ende des Verzögerungsanstiegs beim Fahrer erst nach dem beim Fahrzeug auftritt. Der Hauptvorteil der *Blockbremsung* gegenüber der *Rampe* liegt aber im höheren Geschwindigkeitsabbau im gleichen Zeitraum.

5.2.1.3 Impulsprofil

Im Gegensatz zur *Blockbremsung* und zur *Bremsrampe* findet beim *Bremsimpuls* nur eine kurze automatische Verzögerung ohne Kupplungsbetätigung statt. Durch das schnelle Aufbauen und Nachlassen der Fahrzeugverzögerung und die daraus resultierende Nickbewegung wird der Fahrer zu einer zum Fahrzeug phasenverschobenen Oberkörperbewegung angeregt (siehe Abbildung 5-15). Die Lenkerkraft bzw. das Ende des Anstiegs der Fahrerverzögerung kann beim *Impuls* nicht als Kennwert für die abgeschlossene Transition angenommen werden, da durch den Wiederabbau der Verzögerung der Oberkörper zurückschwingt, was sogar dazu führt, dass der Fahrer diese Bewegung durch Festhalten am Lenker abfangen muss (Vorzeichenwechsel im Lenkerkraftverlauf). Beim *Impuls* wird die Transition daher erst dann als abgeschlossen angesehen, wenn der Fahrer, motiviert durch den *Bremsimpuls*, selbst einen Bremsengriff

vornimmt. Dieser kann durch Aufbau von Bremsdruck ($p \geq 0,5$ bar an Fuß- oder Handbremshebel) oder Betätigen der Kupplung (Kupplungskennwert k_{Kpl} übersteigt 0,1; Skala: 0 = Kupplung geschlossen, 1 = Kupplung geöffnet) angezeigt werden. Der früheste der genannten Zeitpunkte wird als Abschluss der Transition interpretiert. Die Transitionsdauern und abgebaute Geschwindigkeiten für den *Bremsimpuls* sind in Tabelle 5-5 zusammengefasst. Hier kann es vorkommen, dass der Geschwindigkeitsabbau negativ ist, was daraus resultiert, dass bei Auslösung des *Bremsimpulses* die Kupplung nicht geöffnet wird, der Fahrer das Fahrzeug also nach wie vor beschleunigen kann.

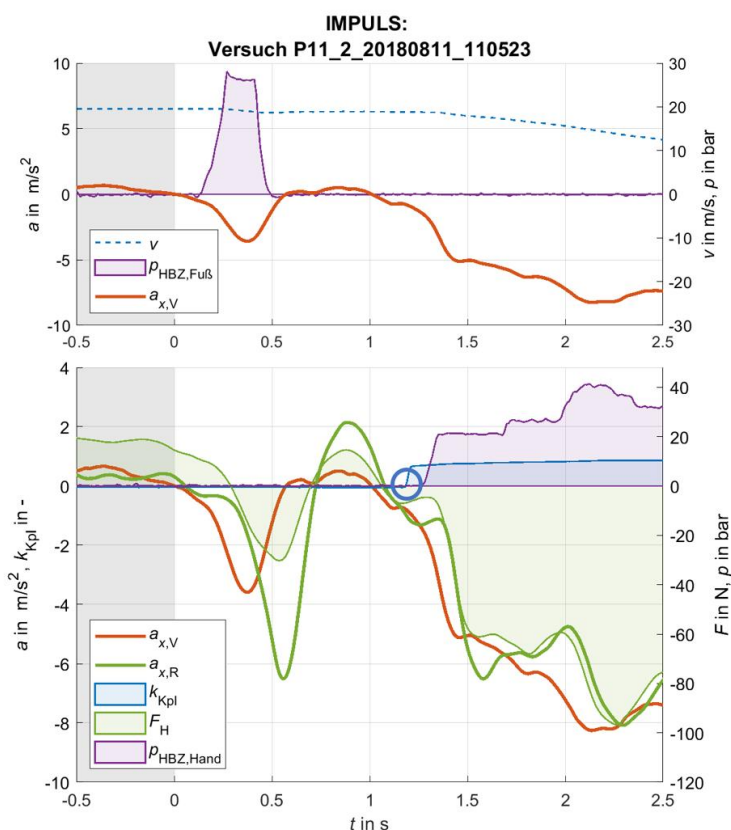


Abbildung 5-15: Ermitteln des Transitionsendes für das Teilbremsprofil *Impuls* anhand der ersten Brems- bzw. Kupplungsbetätigung

Tabelle 5-5: Ermittelte Transitionsdauern für das Teilbremsprofil *Impuls*

Versuch	Transitionsdauer in s	Abgebaute Geschwin- digkeit in m/s
P03_1	0,92	1,21
P06_1	1,53	-0,57
P09_1	1,84	0,27
P11_2	1,19	0,75
P15_02	1,39	2,17
Ø	$1,37 \pm 0,35$	$0,77 \pm 1,02$

Die Transitionsdauer beträgt für den *Bremsimpuls* durchschnittlich 1,37 s und ist damit länger als für *Bremsrampe* und *Blockbremsung*. Dadurch, dass die Verzögerung nicht gehalten wird und auch die Kupplung nicht automatisch geöffnet wird, ist der Geschwindigkeitsabbau trotz der längeren Dauer mit nur 0,77 m/s deutlich geringer.

5.2.1.4 Referenzbremsungen

Um eine Vergleichsgrundlage für die automatischen Bremsengriffe zu haben, werden Referenzmanöver durchgeführt, um zu überprüfen, wie lange der Fahrer nach Eintreten des Ereignisses (hier: Auslösung von EVITA zum Zeitpunkt $t = 0$) braucht, um selbst eine Bremsung einzuleiten. Die hierfür verwendeten Kennwerte für den Abschluss der Transition entsprechen der bereits für den *Bremsimpuls* beschriebenen Auswertung des Bremsdrucks am Hand- oder Fußbremshebel sowie der Kupplungsbetätigung. Ein beispielhafter Verlauf einer Referenzbremsung ist in Abbildung 5-16 dargestellt. Hier beginnt der Bremsdruckaufbau durch den Fahrer bei $t = 1,59$ s. Die Ergebnisse aller Referenzmanöver sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst.

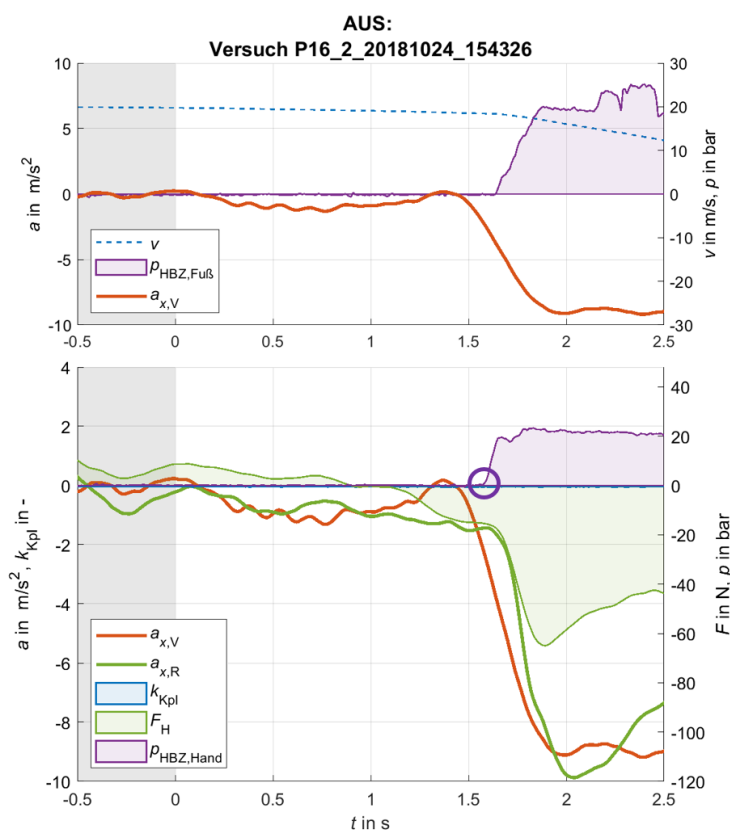


Abbildung 5-16: Ermitteln des Transitionsendes für die Referenzbremsung anhand der ersten Brems- bzw. Kupplungsbetätigung

Tabelle 5-6: Ermittelte Transitionsdauern für die Referenzbremsungen

Versuch	Transitionsdauer in s	Abgebaute Geschwin- digkeit in m/s
P08_1	1,87	0,34
P10_2	1,5	0,05
P12_2	0,32	0,44
P16_2	1,59	1,33
Ø	1,65 ± 0,19	0,57 ± 0,67

Beim Versuch P12_2 handelt es sich augenscheinlich um einen Ausreißer. Es ist davon auszugehen, dass der Proband nahezu zeitgleich zur EVITA-Auslösung eine Bremsung vornahm, um den geforderten Abstand zum Vorderfahrzeug zu korrigieren. Selbst für vorhersehbare Ereignisse werden in der Literatur für sehr geübte Fahrer Reaktionszeiten von 0,75 s angegeben⁹³, somit sind 0,32 s als Reaktionszeit auf die EVITA-Bremsung nicht plausibel. Der Wert für P12_2 wird folglich als Ausreißer vernachlässigt.

So ergibt sich aus den drei verbliebenen Transitionsdauern für Referenzbremsungen ein Durchschnitt von 1,65 s. Bis dahin werden durchschnittlich 0,57 m/s abgebaut. Der geringe Geschwindigkeitsabbau ergibt sich aus der Tatsache, dass bis hierhin im Vergleich zu den automatischen Bremsengriffen keinerlei Bremsdruck aufgebaut wird. Ggf. auftretende Verzögerungen resultieren hier aus dem Schließen des Gasdrehgriffs.

Da nur drei gültige Referenzmessungen vorliegen, sind die entsprechenden Werte nur als erste Abschätzung anzusehen. Um größeres Vertrauen in die ermittelten Werte zu erzeugen, ist eine größere Datenbasis nötig. Für die Auswertung im folgenden Abschnitt ändert eine Variation des Referenzzeitraums die abgebaute Geschwindigkeit für alle Varianten um den gleichen Betrag, sodass sich ein möglicher Bestimmungsfehler im relativen Vergleich der Teilbremsprofile nicht auswirkt. Bei der quantitativen Bewertung des MAEB-Potentials kann dieser Wert hingegen eine große Rolle spielen.

5.2.1.5 Potentialbewertung

Die Probandenversuche zeigen, dass die *Blockbremsung* als Transitionsinitiator am meisten Potential bietet. Sie führt zum schnellsten Transitionsabschluss, gleichzeitig erlaubt sie innerhalb der Transitionszeit für den Referenzversuch den größten Geschwindigkeitsabbau. Für die Profile *Rampe* und *Impuls* ergeben sich deutlich höhere Transitionsdauern, während die abgebaute Geschwindigkeit für die *Rampe* trotz des längeren Verzögerungszeitraums nur

⁹³ Green, M.: How Long Does It Take to Stop? (2000), S. 213.

geringfügig höher, für den *Impuls* bedingt durch die Art des Eingriffs wesentlich geringer wird.

Davon ausgehend, dass nach Abschluss der Transition die in Abschnitt 4.3 erläuterte maximale Verzögerung von 7 m/s^2 aufgebracht werden kann, kann ausgewertet werden, welchen Vorteil im Sinne eines Geschwindigkeitsabbaus die automatischen Eingriffe im Vergleich zum Referenzmanöver bringen. Entsprechend Formel (5-1) wird für jedes Eingriffsprofil berechnet, wieviel Geschwindigkeit (Δv_{pot}) in dem Zeitraum abgebaut werden kann, den der Fahrer ohne Eingriff benötigt, um selbst die Verzögerung einzuleiten ($t_{\text{Ref}} = 1,65 \text{ s}$). Dazu wird zur während der Transitionszeit t_{trans} abgebauten Geschwindigkeit Δv_{trans} der Geschwindigkeitsabbau bei maximaler Verzögerung ($a_{\text{max}} = 7 \text{ m/s}^2$) addiert, der während des restlichen Referenzzeitraums erfolgen kann.

$$\Delta v_{\text{Pot}} = \Delta v_{\text{trans}} + (t_{\text{Ref}} - t_{\text{trans}}) \cdot a_{\text{max}} \quad (5-1)$$

Die Berechnung erfolgt unter der Annahme eines idealen Systems, das bei Erreichen der Bremsbereitschaft ohne Zeitverzug die maximale Verzögerung einstellt.

Wendet man die in der Probandenstudie ermittelten Transitionszeiten und die abgebauten Geschwindigkeiten an, gilt für die *Blockbremsung*, dass bei Beginn der durch den Fahrer eingeleiteten Bremsung nach durchschnittlich 1,65 s mit einem automatischen Eingriff bereits 9,04 m/s abgebaut gewesen sein könnten (1,48 m/s in den ersten 0,57 s, weitere 7,56 m/s bei 7 m/s^2 Verzögerung in den restlichen 1,08 s). Im Versuch entspricht das 19,44 m/s bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 70 km/h. Für das *Rampenprofil* ergibt sich ein Geschwindigkeitsabbau von 5,96 m/s und für das *Impulsprofil* 2,73 m/s, siehe Tabelle 2-1.

Tabelle 5-7: Zusammenfassung der Ergebnisse der ersten Probandenstudie

Profil	Durchschnittliche Transitionsdauer in s	Innerhalb der Transitionszeit durchschn. abgebaute Geschwindigkeit in m/s	Im Referenzzeitraum (1,65 s) abgebaute Geschwindigkeit in m/s
Block	0,57	1,48	9,04
Rampe	1,04	1,69	5,96
Impuls	1,37	0,77	2,73
Referenz	1,65	0,57	0,57

Der potentielle Geschwindigkeitsabbau zeigt, dass das *Blockprofil* als vorbereitende Teilbremsung im untersuchten Szenario (Geradeausfahrt bei 70 km/h, verzögerndes Vorderfahrzeug) das größte Potential bietet, schnell Geschwindigkeit abzubauen ($\Delta v_{\text{Block}} = 9,04 \text{ m/s}$ im Referenzzeitraum). Auch *Rampe* und *Impuls* sorgen für einen Geschwindigkeitsabbau innerhalb der Reaktionszeit des Fahrers, kommen aber mit 5,96 m/s

(64,8 % von Δv_{Block}) und 2,73 m/s (30,2 % von Δv_{Block}) nicht an das Potential des *Blockprofils* heran.

5.2.2 Subjektivbewertung

Neben der Analyse der Messdaten wurde auch eine Subjektivbewertung der Bremseingriffe durch die Probanden vorgenommen. Anhand der in Abschnitt 4.2.2 erläuterten Kontrollierbarkeitsskala nach Neukum et al.⁹⁴ wurden die Eingriffe hinsichtlich ihrer Kontrollierbarkeit beurteilt. Hierbei stehen Bewertungen zwischen 1 und 3 für eine Einordnung als „harmlos“, zwischen 4 und 6 als „unangenehm“ und zwischen 7 und 9 als „gefährlich“. Das obere Ende der Skala liegt bei 10. Diese Bewertung bedeutet, dass der Eingriff als „nicht mehr kontrollierbar“ empfunden wird.

Abbildung 5-17 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der abgegebenen Bewertungen für die verschiedenen Manöver. Erwartungsgemäß wird der eigene Bremseingriff (Referenzbremsung) am wenigsten kritisch bewertet. Hier werden die durchgeführten Bremsungen meist am unteren Ende der Skala im harmlosen Bereich eingeordnet. Auch für die *Blockbremsung* werden bis auf eine Ausnahme alle Eingriffe als harmlos eingestuft. Der Durchschnitt liegt mit 2,8 jedoch minimal höher als bei der Referenzbremsung (2,67).

Im Durchschnitt wird auch die *Bremsrampe* als noch harmlos eingeordnet (3,4). Hierbei ist allerdings die Streuung größer, wobei es auch zu mehreren Bewertungen im „unangenehm“-Bereich kommt. Am kritischsten wird der *Bremsimpuls* bewertet. Die Durchschnittsbewertung liegt im unteren „unangenehm“-Bereich (4). Aber auch hier zeigt sich eine Streuung der Bewertungen über den „harmlos“- und den „unangenehm“-Bereich.

⁹⁴ Neukum, A. et al.: ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten (2008), S. 144.

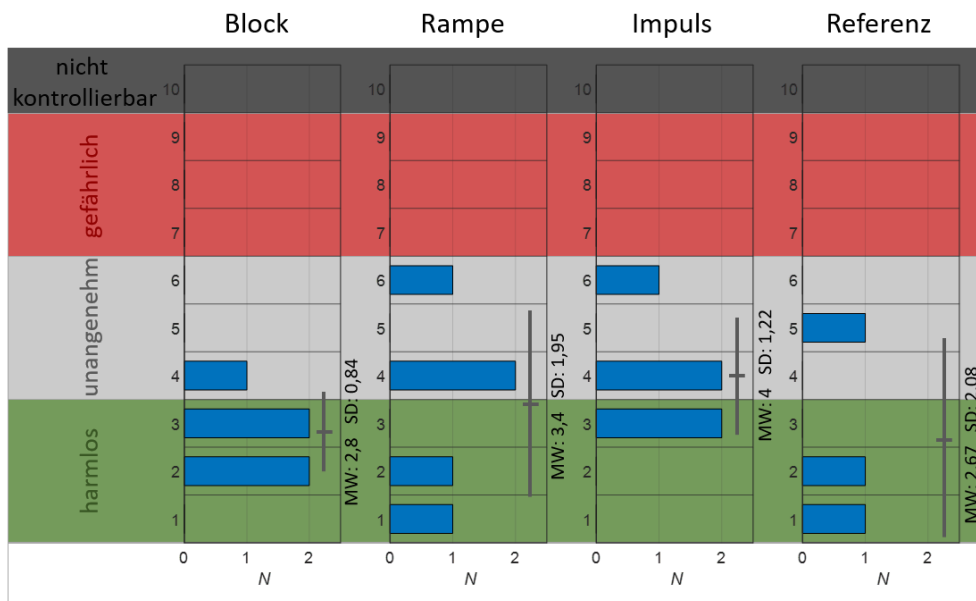


Abbildung 5-17: Zusammenfassung der Ergebnisse der subjektiven Kontrollierbarkeitsbewertungen der ersten Probandenstudie (Häufigkeiten)

Die *Blockbremsung* schneidet folglich nicht nur hinsichtlich ihrer Transitionsdauer und der abgebauten Geschwindigkeit (objektive Kriterien), sondern auch beim subjektiven Empfinden der Kontrollierbarkeit am besten ab.

5.2.3 Zwischenfazit Probandenstudie 1 – Potentialermittlung

Die Probandenstudie zur Bewertung des Potentials der verschiedenen Teilbremsprofile zeigt, dass die *Blockbremsung* am besten als vorbereitende Teilbremsung vor einer automatischen Notbremsung geeignet ist. Mit 0,57 s erzeugt sie die schnellste Transition und ermöglicht aufgrund des schnellen Bremsdruckaufbaus bereits während der Transitionsphase einen vergleichsweise großen Geschwindigkeitsabbau.

Auch bei der subjektiven Bewertung der Kontrollierbarkeit schneidet das Bremsprofil *Block* besser ab als die Profile *Rampe* und *Impuls*. Die *Blockbremsung* wird von fast allen Probanden als „harmlos“ eingestuft. Lediglich eine Bewertung liegt knapp über der Grenze zu „unangenehm“.

Für jedes Bremsprofil liegen fünf ausgewertete Versuche vor. Für ein größeres Vertrauen in die Ergebnisse sind diese durch Studien mit größerem Umfang abzusichern. Dabei können sich die Versuche auf das favorisierte Bremsprofil (*Block*) konzentrieren, da sich die Alternativen in diesem Studienabschnitt (Potentialermittlung) durch den klaren Abstand als aussichtslos qualifiziert haben.

5.3 Maße zur Beschreibung der Fahrerreaktion – Probandenstudie 2

Die erste Probandenstudie (Potentialermittlung) zeigt, dass im Vergleich der Bremsprofile trotz der geringen Stichprobe die Profile *Rampe* und *Impuls* hinsichtlich ihres Potentials so weit hinter dem *Blockprofil* zurückliegen, dass sie bei weiteren Untersuchungen nicht mehr berücksichtigt werden.

Da wie bereits zuvor beschrieben, das Antizipieren der Fahrerreaktion während einer automatischen Notbremsung des Motorrads von elementarer Wichtigkeit ist, um den Eingriff so auslegen zu können, dass keine ungewollte Destabilisierung des Systems stattfindet, wird eine weitere Studie durchgeführt, um ein tieferes Verständnis der Fahrerreaktion zu erlangen. Nur mit dem Wissen, welche körperlichen Reaktionen während eines Notbremseingriffs zu erwarten sind und in welchen Grenzen sie sich bewegen, kann genügend Vertrauen aufgebaut werden, automatische Notbremssysteme auch außerhalb von kontrollierten Versuchsbedingungen einzusetzen. Hierbei ist insbesondere auch die Reproduzierbarkeit der Reaktionen über unterschiedliche Fahrer(typen) von Bedeutung.

Um dieses Wissen über die Fahrerreaktion zu erlangen, werden in diesem weiteren Studienteil Maße identifiziert, die zur Beschreibung der Reaktion geeignet sind. Darüber hinaus wird anhand der ermittelten Maße überprüft, inwiefern sich Fahrerreaktionen vorhersagen lassen, um einen sicheren Einsatz automatischer Notbremssysteme zu gewährleisten.

Durch das Ausschließen der Profile *Rampe* und *Impuls* können alle Probanden das priorisierte Bremsprofil *Block* im Erstkontakt erleben. So kann die Akzeptanz der in der Expertenstudie ermittelten Verzögerungen, die in der ersten Probandenstudie anhand einer sehr kleinen Stichprobe (fünf gültige Fahrten) ermittelt wurde, anhand einer breiteren Datenbasis bestätigt werden.

5.3.1 Messung der Oberkörperbewegung

Das in der ersten Probandenstudie genutzte Messkonzept zur Abschätzung der Oberkörperbewegung mittels eines 3-Achsen-Beschleunigungssensors unterliegt Annahmen und Abschätzungen (z.B. Vernachlässigung der Nickbewegung des Oberkörpers nach Beginn des Eingriffs), die zwar den Vergleich der verschiedenen Bremsprofile und deren Priorisierung erlauben, es eignet sich jedoch nicht, um die Oberkörperbewegung detaillierter – insbesondere hinsichtlich der Nickbewegung des Oberkörpers – zu analysieren. Daher erfolgt die dritte Studie mit einem überarbeiteten Messkonzept mit drei Motion-Tracking-Sensoren (siehe Abschnitt 4.4.1.3), die die Oberkörper- und Kopfbewegungen analysieren. Diese Sensoren messen neben den Beschleunigungen in drei Achsen auch die entsprechenden Drehraten.

5.3.2 Vorversuch⁹⁵

Im Vorversuch wird die Aussagekraft der erfassten Messgrößen hinsichtlich der Beschreibung der Fahrerreaktion evaluiert. Während zuvor nur die genäherte Beschleunigung in Fahrzeuginnenrichtung an einem Punkt am Fahreroberkörper und die Lenkerabstützkraft betrachtet wurden, stehen jetzt Beschleunigungen an drei Punkten sowie die entsprechenden Nickraten zur Verfügung.

Im Vorversuch beschleunigt der Fahrer das Fahrzeug auf 70 km/h. An geeigneter Stelle (eben, Geradeausfahrt, Fahrer hat beide Hände am Lenker) wird der Bremsengriff ferngesteuert ausgelöst. Es kommt das in der ersten Probandenstudie favorisierte Bremsprofil *Block* mit einer Zielverzögerung von 5 m/s^2 zum Einsatz. Da der Vorversuch lediglich darauf abzielt, die Eignung der aufgezeichneten Messgrößen zu überprüfen und der Fahrer über den Versuchszweck aufgeklärt ist, wird auf ein vorausfahrendes Fahrzeug verzichtet. Neben den automatischen Bremsmanövern werden Referenzbremsmanöver (ebenfalls aus 70 km/h) aufgenommen, in denen der Fahrer das Fahrzeug nur mittels Hand- bzw. Fußbremse in den Stillstand verzögert.

Stellt man die Adaption der Längsbeschleunigungen am Fahreroberkörper⁹⁶ an die Fahrzeugbeschleunigung und die Abstützkraft am Lenker F_H für die verschiedenen Manöver dar, zeigen sich charakteristische Verläufe (siehe Abbildung 5-18, alle Signale tiefpassgefiltert⁹⁷). Die Beschleunigungsverläufe am Oberkörper verhalten sich wie bereits in der ersten Probandenstudie. Die Adaption an die (negative) Fahrzeugbeschleunigung dauert in den automatischen Bremsmanövern etwas länger als bei bewusster Betätigung der Bremse, bei der die Möglichkeit besteht, vorbereitend Körperspannung aufzubauen.

Im Fußbremsmanöver zeigt sich in allen Messungen eine charakteristische „Stufe“ während des Anstiegs der Oberkörperverzögerung. Diese Beobachtung erklärt sich dadurch, dass der Fahrer in neutraler Sitzposition den Fußbremshebel nicht vollständig betätigen kann. Ab einem bestimmten Punkt wird also eine Anpassung der Sitzposition benötigt, um die Verzögerung weiter zu erhöhen. Der Fahrer verlagert seine ganze Position dabei in Längsrichtung nach vorne, wodurch der Verzögerungsaufbau am Oberkörper kurz unterbrochen wird.

Auch in den Handbremsmanövern zeigt sich eine Besonderheit. Die Abstützkraft am Lenker zeigt hier zu Beginn ein Überschwingen, reduziert sich dann wieder etwas, um anschließend wieder langsam anzusteigen. Hier ist anzunehmen, dass der Fahreroberkörper zunächst

⁹⁵ Die hier beschriebenen Ergebnisse des Vorversuchs basieren auf Merkel, N. L.; Winner, H.: Measures for Rider's Adaption (2019).

⁹⁶ Längsbeschleunigungen am Fahreroberkörper: am Kopf: $a_{x,Rh}$, auf Schulterhöhe: $a_{x,Rs}$, auf Höhe der LWS: $a_{x,Rl}$

⁹⁷ IIR-Filter, Butterworth, 1. Ordnung, Grenzfrequenz 2 Hz, durch Anwendung von Vorwärts- und Rückwärtsfilterung (MATLAB `filtfilt`) erhöht sich die Ordnung auf 2

durch den Verzögerungsaufbau nach vorne verlagert und durch Abstützen am Lenker abgefangen wird. Um den Bremshebel mit der Hand weiter betätigen zu können, muss jedoch wieder Last vom Arm genommen werden (Kompensation durch Körperspannung). Ist der Handbremshebel vollständig betätigt, wird die Abstützkraft dosiert wieder erhöht.

Die am Kopf gemessenen Beschleunigungen heben sich in allen Manövern von denen am Oberkörper ab. In allen Fällen ist beim Verzögerungsaufbau ein stärkeres Überschwingen zu beobachten. Im (bewusst vom Fahrer eingeleiteten) Handbremsmanöver erfolgt das Abfangen des Überschwingens etwas zügiger als beim automatischen Eingriff. Beim Verzögern über den Fußbremshebel ist ein Schwingen der Kopfbeschleunigung um die Oberkörperbeschleunigung zu beobachten, was vermutlich auf die unübliche Sitzposition durch die starke Betätigung der Fußbremse zurückzuführen ist⁹⁸.

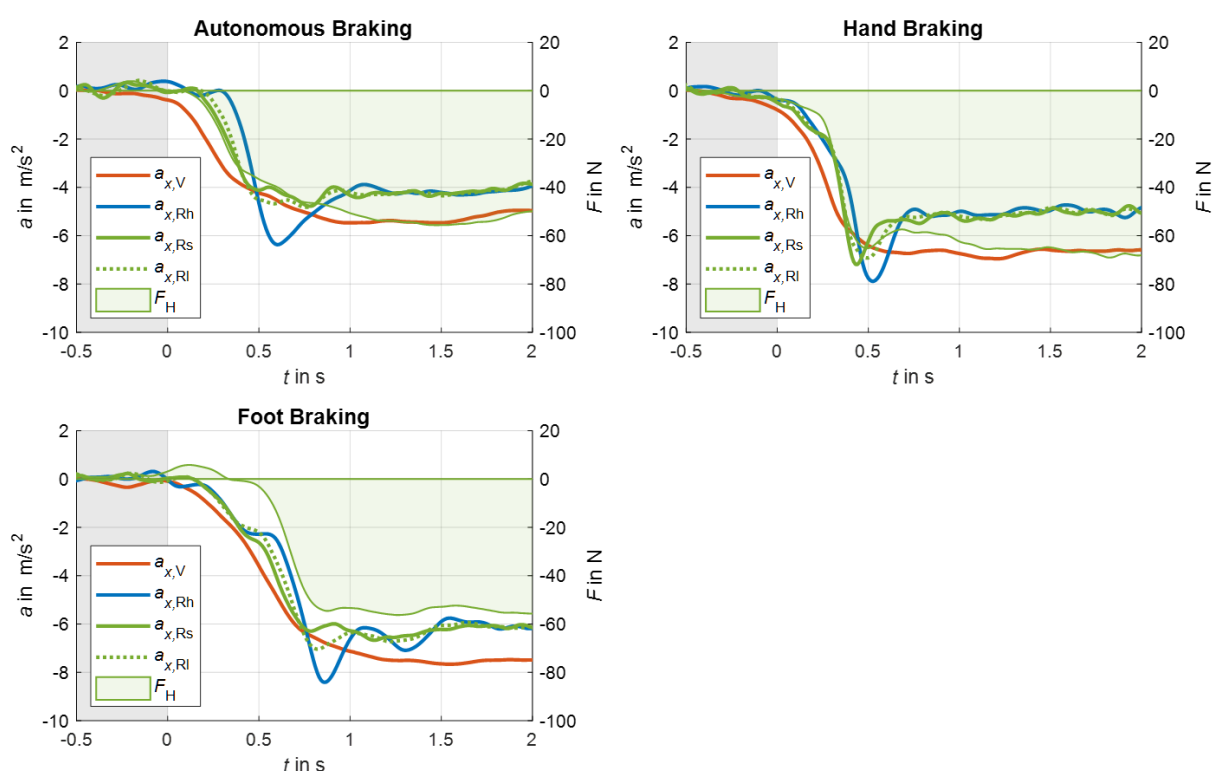


Abbildung 5-18: Charakteristische Verläufe der Fahrzeugbeschleunigung, Beschleunigungen am Fahreroberkörper und der Lenkerkraft bei automatischen und manuellen Bremsungen im Vorversuch zur zweiten Probandenstudie

Relativbewegung zwischen Fahrer und Fahrzeug in Längsrichtung

Wie bereits bei der ersten Probandenstudie beschrieben, kann die Qualität der Anbindung des Fahrers an das Fahrzeug mithilfe der Zeit beschrieben werden, die der Fahrer benötigt, um sich dem sich ändernden Fahrzeugzustand anzupassen (Transitionszeit). Diese Adaption

⁹⁸ Starke Verzögerungen bis in den Stillstand werden üblicherweise durch die Betätigung des Handbremshebels erzeugt und ggf. durch die Fußbremse unterstützt. Die Verzögerung durch alleinige Betätigung des Fußbremshebels wird hier lediglich durchgeführt, um zu zeigen, dass das Sensorsetup geeignet ist, entsprechende Unterschiede darzustellen.

spiegelt sich in der Längsbeschleunigung durch den Zeitverzug zwischen Fahrzeugverzögerung und Fahreroberkörperverzögerung wider. Durch die beschriebenen Unterschiede im Überschwingverhalten bei den verschiedenen Manövern scheidet das Ende des Verzögerungsaufbaus als Vergleichszeitpunkt aus. Stattdessen wird für den Vergleich an den verschiedenen Messpositionen der Zeitpunkt herangezogen, zu dem 50 % des finalen Verzögerungslevels erreicht sind. In dieser Phase befinden sich sowohl Fahrzeug als auch Fahrer in der Phase des Verzögerungsaufbaus mit näherungsweise konstantem Gradienten. Diese Phase kann als Hauptphase der Adaption des Fahrers an die Fahrzeugverzögerung angesehen werden. Das finale Verzögerungslevel wird durch Mittelung der Verzögerung zwischen $t = 1$ s und $t = 2$ s nach Beginn des automatischen Eingriffs bestimmt, da zu diesem Zeitabschnitt angenommen werden kann, dass sich ein ausreichend konstantes Verzögerungslevel eingestellt hat. Die Ermittlung des finalen Verzögerungslevels, des 50 %-Levels und des Zeitverzugs des Erreichens des 50 %-Levels zwischen Fahrzeug und Fahrer τ_{50} ist in Abbildung 5-19 anhand des Beispiels der Kopfbeschleunigung dargestellt.

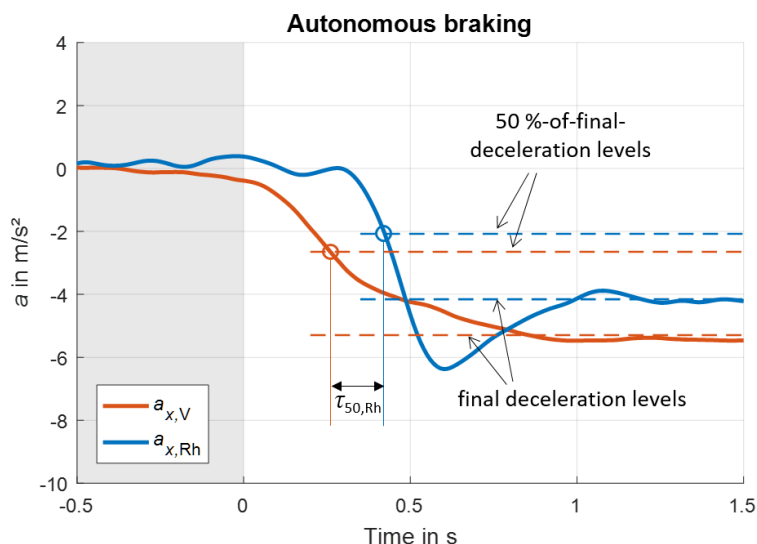


Abbildung 5-19: Ermittlung des Zeitverzugs zwischen Fahrzeug- und Fahrer(kopf)beschleunigung

Stellt man die Zeitverzüge der automatischen Bremsmanöver denen der manuellen Bremsungen per Handbremshebel (als übliche Art der Betätigung⁹⁸) gegenüber, zeigt sich, dass die mittleren Zeitverzüge für alle Beschleunigungsmesspunkte am Fahrer (Kopf $\tau_{50,Rh}$, Schulterhöhe $\tau_{50,RS}$, Höhe der LWS $\tau_{50,RI}$) für die automatischen Eingriffe höher ausfallen als für die vom Fahrer bewusst eingeleiteten Verzögerungen. Diese Beobachtung entspricht der Erwartung, dass der Fahrer bei einer bewusst durchgeführten Bremsung die Möglichkeit hat, durch Aufbau von Körperspannung vor Verzögerungseintritt eine bessere „Anbindung“ ans Fahrzeug zu erlangen, wodurch eine direktere Übertragung des Fahrzeugverhaltens auf den Fahreroberkörper stattfindet.

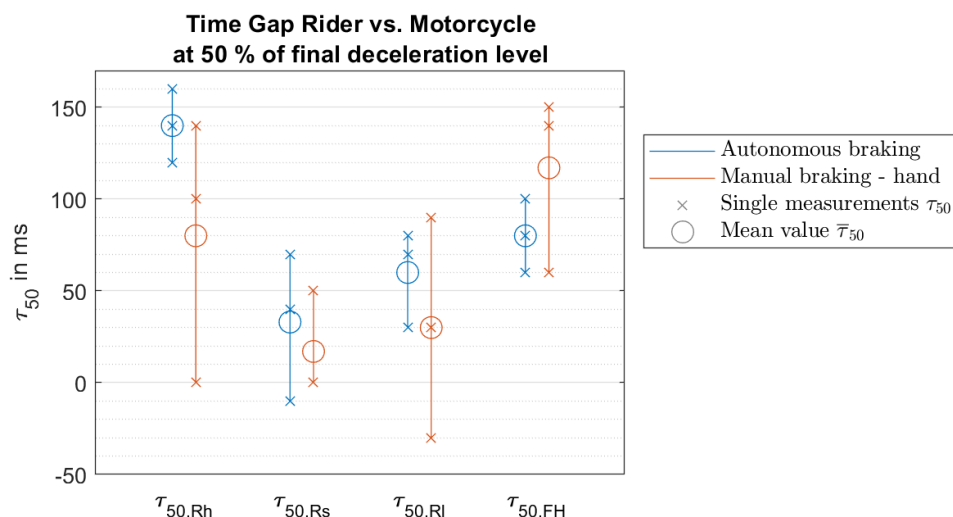


Abbildung 5-20: Zeitverzug zwischen Fahrzeug- und Fahrerverzögerung für drei Fahrten desselben Fahrers

Beim Kraftaufbau am Lenker zeigt sich ein anderes Bild. Die mittlere Zeit, die zwischen Erreichen der halben Fahrzeugverzögerung und dem Aufbau der halben Abstützkraft am Lenker vergeht, liegt für die manuellen Bremsmanöver höher als beim automatischen Eingriff. Dieser Effekt kann damit erklärt werden, dass die Anspannung der Arme zunächst begrenzt ist, um die Handbewegung zur Betätigung von Brems- und Kupplungshebel nicht einzuschränken. Erst wenn die Hebel betätigt sind, erfolgt die Erhöhung der Abstützkraft am Lenker.

Außerdem fällt auf, dass mit Ausnahme der Messposition auf Schulterhöhe die Streuung der ermittelten Zeitverzögerungen für die manuellen Bremsmanöver größer ist. Das könnte einen Hinweis darauf geben, dass die unwillkürliche Körperbewegung bei automatischen Bremsingriffen in erster Linie durch physikalische Randbedingungen (Körpermaße, Körpermasse etc.) definiert wird, während die manuelle Bremsung als bewusste Handlung sich von Mal zu Mal unterscheiden kann. Die Ausnahme auf Schulterhöhe kann dadurch erklärt werden, dass wie zuvor beschrieben, die Abstützkraft während der Betätigung des Handbremshebels eingeschränkt ist und über Körperspannung kompensiert wird. Der Schulterbereich muss möglichst stabil gehalten werden, um mit Armen/Händen die nötige Freiheit zur Hebelbetätigung zu haben.

Nickbewegung des Fahreroberkörpers

Als neue Messgröße wird in diesem Studienabschnitt die Nickbewegung des Fahreroberkörpers in der Sagittalebene erfasst. Im Vorversuch wird die Winkeländerung von Oberkörper und Kopf nach Beginn des Bremsingriffs ausgewertet. Abbildung 5-21 zeigt

die Winkeländerung $\Delta\vartheta^{99}$ an den Messpunkten am Rücken (oben) und am Kopf (unten links) für automatische und manuelle Bremsmanöver.

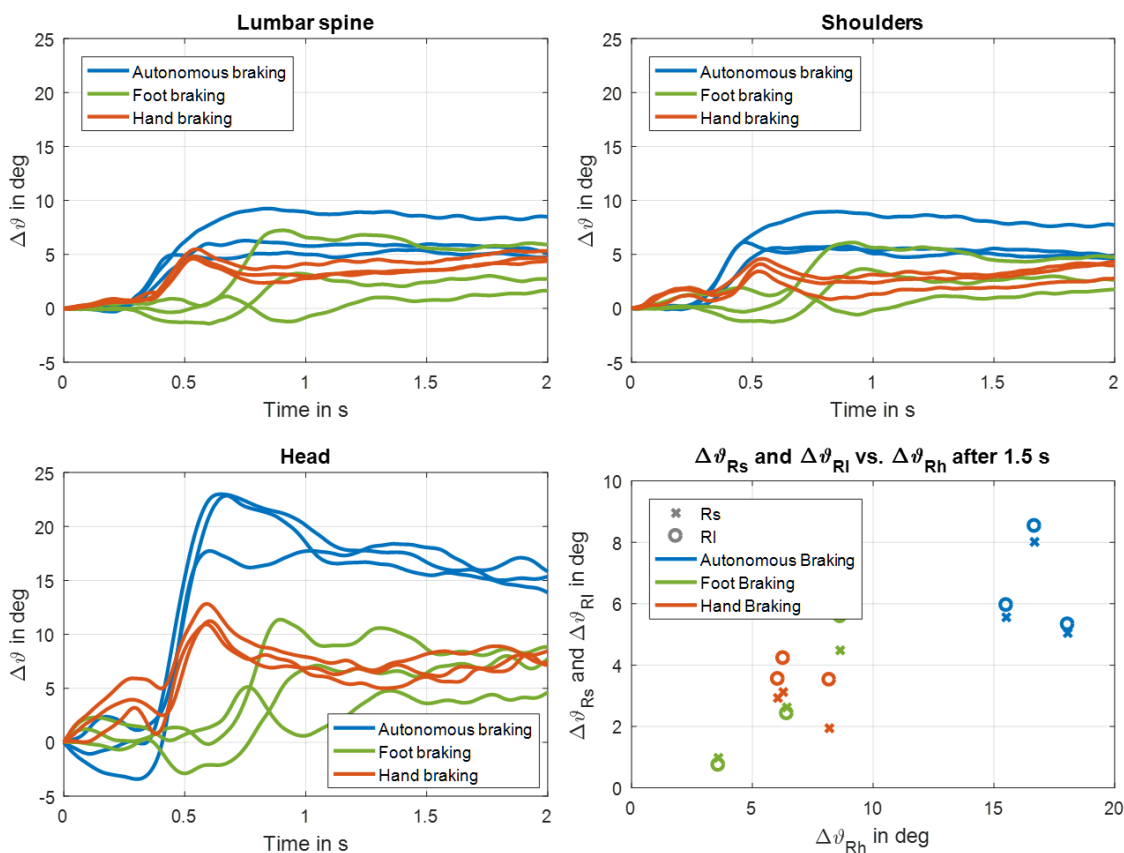


Abbildung 5-21: Nickbewegung am Fahreroberkörper nach Einleiten verschiedener Bremsmanöver im Vorversuch zur zweiten Probandenstudie

Die Winkeländerungen am unteren und oberen Rücken (obere Diagramme in Abbildung 5-21) zeigen ein ähnliches Verhalten. Nach einer Phase des Winkelaufbaus stellt sich ein weitestgehend konstanter Oberkörperwinkel ein. Im Mittel stellt sich im Fall der automatischen Verzögerungen ein etwas größerer Winkel ein. Das kann, wie schon andere Effekte zuvor, darauf zurückgeführt werden, dass der Fahrer im Gegensatz zu manuellen Bremsmanövern hier nicht die Gelegenheit hat, bereits vorbereitend Körperspannung aufzubauen, um die Trägheitskräfte besser abfangen zu können.

Die Verläufe für die Kopfnickbewegung (unten links in Abbildung 5-21) weichen von denen am Rücken ab. Die Phase des Winkelaufbaus beginnt etwas später und wird entsprechend auch später abgeschlossen. Der sich anschließend einstellende Winkel ist größer und zeigt sich weniger konstant als an den anderen Messpunkten. Die später einsetzende Nickbewegung lässt sich damit erklären, dass die Fahrzeugverzögerung in erster Linie über

⁹⁹ Tiefpassgefiltert: IIR-Filter, Butterworth, 1. Ordnung, Grenzfrequenz 2 Hz, durch Anwendung von Vorwärts- und Rückwärtsfilterung (MATLAB `filtfilt`) erhöht sich die Ordnung auf 2

Sitz und Tank an den Fahrer übertragen wird und sich von dort erst über die Wirbelsäule bis zum Kopf fortpflanzen muss. Der größere Ausschlag entsteht durch die höhere Flexibilität der Halswirbelsäule im Vergleich zum Rücken. Der Kopf kann sich wesentlich unabhängiger bewegen als der direkt über den Sitz beeinflusste Rumpf. Besonders auffällig ist, wie deutlich sich die Kopfbewegung in den automatischen Brems Eingriffen von den manuellen Verzögerungen abhebt. Hier erscheint eine Differenzierung zwischen automatischen und manuellen Bremsmanövern am einfachsten möglich. Trägt man die Winkel, die sich nach 1,5 s nach Verzögerungsbeginn¹⁰⁰ am unteren und oberen Rücken einstellen, gegen die entsprechenden Winkel am Kopf auf, lassen sich Cluster für automatische und manuelle Verzögerungen erkennen (siehe Abbildung 5-21, unten rechts).

Zusammenfassung Vorversuch

Der Vorversuch zeigt, dass das überarbeitete Messkonzept mit den Motion Tracking Sensoren geeignet ist, charakteristische Unterschiede zwischen automatischen und manuell eingeleiteten Bremsmanövern in der (physischen) Fahrerreaktion zu identifizieren. Insbesondere in der Nickbewegung zeigen sich manöverspezifische Verläufe, die für die jeweilige Eingriffsart (automatisch, Handbremshebel, Fußbremshebel) reproduzierbar zu sein scheinen (siehe Abbildung 5-21).

Die Kopfbewegung erscheint als meistversprechendes Maß, um in automatischen Notbremsmanövern die Adaption des Fahrers an das verzögernde Motorrad zu beschreiben. Diese Annahme beruht darauf, dass die Kopfbewegung sich bei automatischen Verzögerungen am deutlichsten von den manuell durchgeführten Manövern abhebt und somit die Identifikation eines unerwarteten Brems Eingriffs ermöglicht.

Das Ergebnis basiert jedoch lediglich auf den Ergebnissen von wenigen Fahrten eines einzigen Fahrers, der über Versuchszweck und –ablauf aufgeklärt war. Außerdem wurden bisher nur qualitative Verläufe der Nickbewegung betrachtet. Ob die Reproduzierbarkeit über eine größere Zahl an (unvorbereiteten) Fahrern erhalten bleibt und ob ein quantifizierbares Maß für die Fahrerreaktion gefunden werden kann, bleibt in der anschließenden Probandenstudie mit größerer Stichprobe zu überprüfen.

5.3.3 Hauptversuch¹⁰¹

Der Unterschied zur vorherigen Probandenstudie besteht darin, dass alle Probanden im Erstkontakt mit dem zuvor favorisierten Bremsprofil *Block* konfrontiert werden, um für diese als am meistversprechend eingeschätzte Variante des Eingriffs bzw. für die Fahrerreaktion darauf ein besseres Verständnis zu erarbeiten und um die Datenbasis für das

¹⁰⁰ Zu diesem Zeitpunkt hat sich für alle Manöver das finale Winkelniveau eingestellt.

¹⁰¹ Die hier beschriebenen Ergebnisse des Hauptversuchs basieren auf Merkel, N. L.; Winner, H.: Characteristic Rider Reactions (2020).

Blockprofil zu erweitern, nachdem in der vorherigen Studie aufgrund der Vielzahl zu untersuchender Bremsprofile nur wenige Versuche pro Profil durchgeführt werden konnten. Als Referenz erleben die Fahrer im Anschluss eine Notbremssituation, in der sie die Bremsung selbst einleiten müssen.

Die Anforderungen hinsichtlich der Unwissenheit der Probanden bleiben die gleichen, wie in der ersten Probandenstudie: Um natürliche Fahrerreaktionen zu messen, dürfen auch in dieser Teilstudie die Teilnehmer das automatische Bremsmanöver nicht erwarten. Bei Kenntnis des bevorstehenden Manövers könnten sie sich sonst möglicherweise darauf vorbereiten (z.B. durch Aufbau von Körperspannung vor dem Eingriff), was die Ergebnisse verfälschen würde. Analog zur vorherigen Studie dürfen die Manöver nicht den Charakter eines falsch positiven Bremsengriffs annehmen, um negative Auswirkungen auf die Akzeptanz zu vermeiden. Daher folgen die Untersuchungen dem gleichen Vorgehen, wie die in Abschnitt 5.2 beschriebene erste Probandenstudie. Erneut wird durch den Einsatz von EVITA ein realistisches Notbremsszenario in Form eines plötzlich verzögernden Vorderfahrzeugs präsentiert. Die Fahrer folgen erneut dem vorausfahrenden Fahrzeug mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit von 70 km/h in einem bestimmten Abstand (Zeitlücke 1,5 s). Die Notbremssituation wird durch eine plötzliche Verzögerung des Zielfahrzeugs simuliert. Es werden entsprechend der in der Expertenstudie ermittelten Kontrollierbarkeitsgrenze auch hier automatische Verzögerungen von ca. 5 m/s^2 realisiert.

5.3.3.1 Auswertemethodik

Ziel ist, ein geeignetes Maß zur Beschreibung der Fahrerreaktion auf unerwartete Bremsengriffe zu ermitteln. Im Vorversuch wurde hierzu die Nickbewegung als aussichtsreiche Größe identifiziert. Während im Vorversuch charakteristische qualitative Verläufe betrachtet wurden, soll in der Probandenstudie die Adaption des Fahrers an den sich ändernden Fahrzeugzustand mithilfe der Nickbewegung quantifizierbar werden.

Wie bereits zuvor beschrieben, bewegt der Oberkörper des Fahrers sich in Folge des Verzögerungsaufbaus während eines automatischen Bremsengriffs aufgrund der wirkenden Trägheitskräfte relativ zum verzögernden Fahrzeug nach vorne. Da der Fahrer in erster Linie über den Sitz an das Motorrad gekoppelt ist und die Vorwärtsbewegung durch den Tank begrenzt wird, ergibt sich daraus die Nickbewegung, die sich am Oberkörper und auch am Kopf des Fahrers messen lässt. Der Ablauf dieser Bewegung ist in Abbildung 5-22 skizziert.



Abbildung 5-22: Ablauf der Fahrerbewegung nach Einsetzen der automatischen Verzögerung

Für die folgenden Auswertungen wird angenommen, dass der Punkt, ab dem der Fahrer beginnt, der Vorwärtsbewegung entgegenzuwirken, durch das Maximum der Nickrate markiert wird. Ab diesem Punkt beginnt der Fahrer, die Nickbewegung abzufangen (\rightarrow Nickrate reduziert sich wieder), bis er die Relativbewegung nach vorne vollständig unterbunden hat (\rightarrow Nickrate bei 0) und sich wieder in Richtung der Ausgangsposition zurückschiebt (\rightarrow negative Nickrate).

Außerdem wird auch in dieser Studie die Abstützkraft an der Lenkstange als weiteres Maß betrachtet. Um die Auswertung vergleichbar mit der der Oberkörperbewegung zu machen, wird anstelle der absoluten Abstützkraft senkrecht zur Lenkachse die entsprechende Kraftanstiegsrate betrachtet.

5.3.3.2 Messdatenauswertung

Es liegen auswertbare Datensätze von 12 Probanden vor. Bei der Auswertung der Daten aus den durchgeführten Versuchsfahrten zeigt sich, dass im direkten Vergleich verschiedener Fahrer die Reaktion auf einen automatischen Bremsengriff für den Oberkörper (gemessen auf Schulter- und LWS-Höhe) sehr homogen ist, während die Kopfbewegung zwischen den Probanden deutlich variiert. Abbildung 5-23 zeigt die Nickratenverläufe in den automatischen Bremsmanövern für alle 12 Fahrer. Die positive Nickrichtung stellt hier das Nicken des Kopfes oder Oberkörpers nach vorne dar. Auf alle folgenden Nickraten- und Kraftanstiegsratenverläufe wurde ein Tiefpassfilter angewendet¹⁰².

¹⁰² IIR-Filter, Butterworth, 1. Ordnung, Grenzfrequenz 2 Hz, durch Anwendung von Vorwärts- und Rückwärtsfilterung (MATLAB `filtfilt`) erhöht sich die Ordnung auf 2

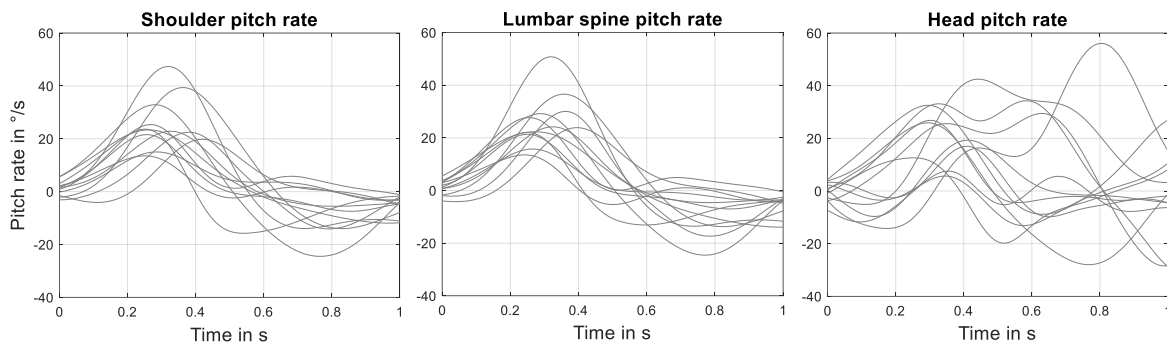


Abbildung 5-23: Nickraten aller Probanden nach Einleitung der automatischen Verzögerung

Das Maximum der Nickrate (Fahrer beginnt, der Vorwärtsbewegung entgegenzuwirken) wird auf Schulterhöhe, auf Höhe der LWS und am Kopf für alle 12 Fahrer analysiert. Für die Analyse ist vor allem der Zeitpunkt interessant, zu dem das Maximum erreicht wird. Die absoluten erreichten Nickraten zu diesem Zeitpunkt unterliegen vielen Einflussfaktoren (z.B. Körpermaße des Fahrers), so dass die Vergleichbarkeit eingeschränkt. Der Zeitpunkt, zu dem das Maximum erreicht wird, beschreibt den Moment, ab dem der Fahrer beginnt, der Vorwärtsbewegung des Oberkörpers entgegenzuwirken¹⁰³ und hängt somit eng mit der durch den Teilbremseingriff ausgelösten Transition in den bremsbereiten Zustand zusammen. Der Zeitpunkt $t = 0$ stellt den Beginn des Bremsdruckanstiegs dar. Der Zeitpunkt des Nickratenmaximums beschreibt also direkt die Reaktion auf die Fahrzeugzustandsänderung (nicht auf den Beginn des Eingriffs im Sinne des Auslösezeitpunkts).

Wie Abbildung 5-23 zeigt, folgen über alle Fahrer betrachtet die Nickraten auf Schulter- und LWS-Ebene einem charakteristischen Verhalten, während die Kopfbewegung abweichen kann. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Halswirbelsäule den flexibelsten Abschnitt der Wirbelsäule darstellt und der Fahrer z. B. den Kopf während des Manövers unabhängig vom Oberkörper heben oder senken kann, um einen besseren Überblick über die Situation zu erhalten. Somit bewegt sich der Kopf nicht notwendigerweise analog zum Oberkörper, wie es im Vorversuch beobachtet wurde (lediglich mit leichtem Zeitverzug und größeren Ausschlägen), sondern kann deutlich davon abweichen. Abbildung 5-24 zeigt Beispiele für einen Fahrer, dessen Kopfbewegung während eines automatischen Bremseneingriffs dicht dem Oberkörper folgt (linkes Diagramm), und einen Fahrer, dessen Kopf sich eher unabhängig vom Rest des Oberkörpers bewegt (rechtes Diagramm).

¹⁰³ Das Maximum der Nickrate entspricht einem Nulldurchgang der Nickbeschleunigung, der daraus resultiert, dass in der Summe aller auf den Oberkörper wirkenden Kräfte das Gegenmoment (durch Abstützung durch Körperteile und Kleidung, Aufbau von Körperspannung) beginnt, das anregende Moment (durch auf den Körper wirkende Trägheitskräfte) zu übersteigen.

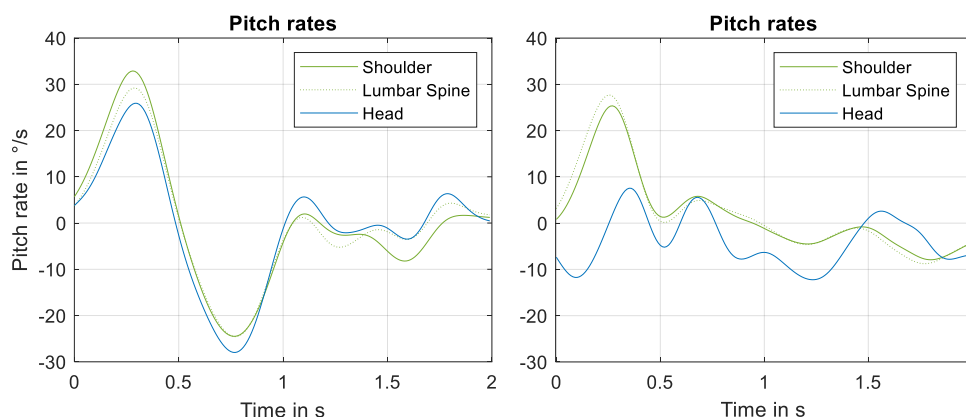


Abbildung 5-24: Vergleich Nickraten zweier Fahrer während des AEB-Manövers

Dieser in manchen Fällen auftretende Unterschied zwischen der Oberkörper- und der Kopfbewegung lässt sich auch beim Vergleich der Zeitpunkte der Nickratenmaxima über alle 12 Fahrer feststellen. Während der mittlere Zeitpunkt der maximalen Nickrate für Schulter, LWS und Kopf noch sehr nahe beieinanderliegt, ist die Standardabweichung für die Kopfnickrate deutlich höher. Sie ist etwa doppelt so hoch wie für Schulter und LWS (siehe Tabelle 5-8).

Tabelle 5-8: Mittlerer Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Nickrate nach Einleitung der automatischen Verzögerung über alle Fahrer

	Mittlerer Zeitpunkt der max. Nickrate & Standardabw. in s	Frühester Zeitpunkt des Maximums in s	Spätester Zeitpunkt des Maximums in s
Schultern	0,32 ± 0,06	0,26	0,43
LWS	0,31 ± 0,05	0,25	0,41
Kopf	0,33 ± 0,12	0,02	0,46

Der Fahrer wirkt der Nickbewegung und der Vorwärtsbewegung des Oberkörpers relativ zum Fahrzeug nicht nur durch Aufbau von Muskelspannung im Rumpf entgegen. Ein nicht zu vernachlässigender Anteil der wirkenden Trägheitskräfte wird über die Arme auf den Lenker übertragen. Auch diese Abstützkraft wird wie in der vorherigen Studie bei den Versuchsfahrten gemessen. Dabei ist auch hier wieder die Aussagekraft der absoluten Werte der Kraftanstiegsrate analog zur Nickrate begrenzt, z.B. aufgrund der Tatsache, dass sich die Körperproportionen und Körpermassen der Teilnehmer unterscheiden. Außerdem wird aufgrund der unterschiedlichen Körperhaltungen die Kraft in verschiedenen Winkeln auf den Lenker übertragen, während nur die Kraftkomponente senkrecht zur Lenkachse gemessen wird (siehe Abschnitt 4.4.1). Angesichts dieser Einschränkungen wird analog zur Nickrate der Fokus auf den Zeitpunkt gelegt, zu dem die Kraftanstiegsrate ihr Maximum erreicht.

Wie Abbildung 5-25 (links) zeigt, ist der qualitative Verlauf des Kraftanstiegs dem der Oberkörpernickraten recht ähnlich. Im direkten Vergleich (Abbildung 5-25, rechts) zeigt sich, dass das Maximum der Kraftanstiegsrate etwas früher erreicht wird als das Maximum der Nickrate. Das gilt nicht nur für die Mittelwerte über alle Versuche (siehe Tabelle 5-9), sondern auch für jeden einzelnen Fahrer. Das Maximum der Krafrate wird immer vor der maximalen Schulternickrate erreicht. Die Zeitlücke zeigt einen Mittelwert von 98 ms (min. 20 ms, max. 230 ms). Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass die Abstützung am Lenker notwendige Voraussetzung ist, um der Nickbewegung des Oberkörpers entgegenzuwirken. Da der Oberkörper als Hebel wirkt, reicht es nicht aus, die relative Längsbewegung zum Fahrzeug über Sitz/Tank durch Aufbau von Körperspannung abzustützen. Es resultiert immer auch eine Nickbewegung, die über Abstützung am Lenker abgefangen werden muss.

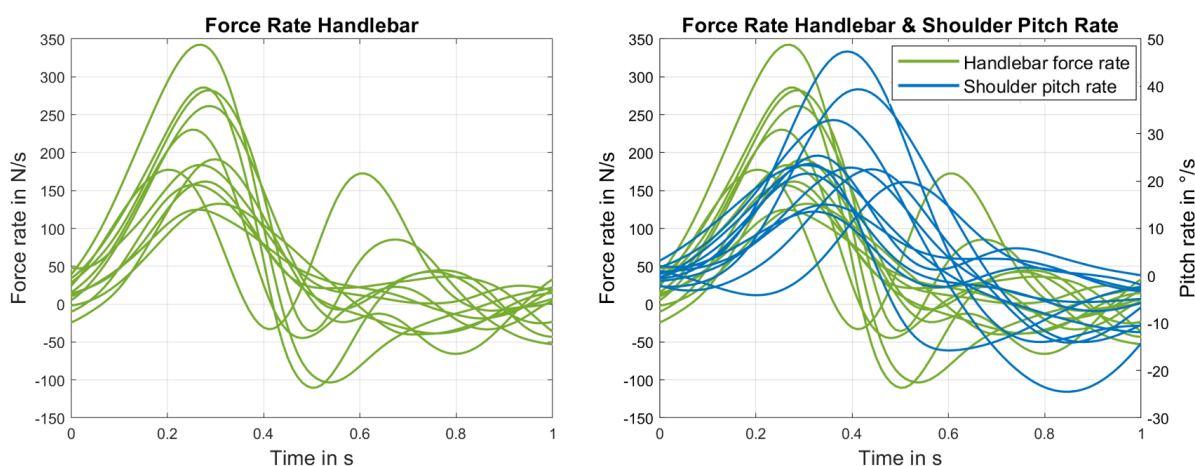


Abbildung 5-25: Lenkerabstützkraft aller Probanden nach Einleitung der automatischen Verzögerung

Tabelle 5-9: Mittlerer Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Schulternickrate und des Kraftaufbaus über alle Fahrer nach Einleitung der automatischen Verzögerung

	Mittlerer Zeitpunkt des Maximums & Standardabw. in s	Frühester Zeitpunkt des Maximums in s	Spätester Zeitpunkt des Maximums in s
Nickrate auf Schulterhöhe	0,32 ± 0,06	0,26	0,43
Kraftanstiegsrate am Lenker	0,22 ± 0,03	0,15	0,25

Die Homogenität der Oberkörperbewegungen bei automatischen Bremsmanövern kann bei den Manövern, bei denen die Fahrer die Bremse selbst betätigen, nicht in gleichem Maß beobachtet werden. Während der manuellen Bremsungen unterscheiden sich die Verläufe der Nickraten zwischen den Fahrern deutlich. Dies lässt sich unter anderem dadurch

erklären, dass bei den diesen Manövern die Verzögerungsprofile stark variieren. Zum Beispiel bauen einige Fahrer sehr schnell Bremsdruck auf, sobald sie die Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs realisieren, und reduzieren die Betätigungskraft dann langsam, während andere den Bremshebel behutsam betätigen und die Situation beobachten, um die Verzögerung dosiert zu erhöhen, wenn sie sich dem Zielfahrzeug nähern. Außerdem ist die Körperbewegung keine reine Reaktion mehr auf den sich ändernden Fahrzeugzustand. Der Fahrer leitet die Verzögerung bewusst ein und kann sich so darauf vorbereiten, indem er z.B. bereits vor der Bremsbetätigung Körperspannung aufbaut. Einige Fahrer zeigen beim Bremsen sogar eine negative Nickrate, d.h. sie richten sich während des Manövers auf. Insbesondere ein Anheben des Kopfes zu Beginn des Bremsmanövers kann in vielen Fällen beobachtet werden. Die Diagramme in Abbildung 5-26 zeigen die Körperbewegungen für alle Teilnehmer bei den manuellen Bremsmanövern.

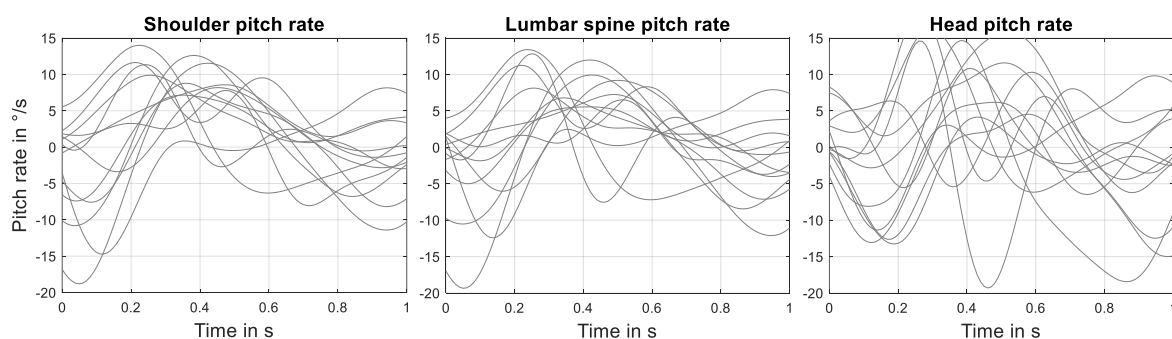


Abbildung 5-26: Nickraten aller Probanden in den manuellen Bremsmanövern

Betrachtet man die Zeitpunkte, zu denen die Nickraten- bzw. Kraftanstiegsratenmaxima erreicht werden (Tabelle 5-10), zeigt sich, dass diese etwas später auftreten als im Fall der automatischen Eingriffe. Insbesondere fällt aber die größere Streuung für die Oberkörpernickraten auf, die die zuvor beschriebene Inhomogenität der Reaktionen bestätigen. Dabei ist zu beachten, dass wie bei den automatischen Bremsmanövern der Zeitpunkt $t = 0$ durch den Beginn des Bremsdruckanstiegs definiert wird. Während der dafür verwendete Schwellwert ($p_{\text{HBZ,Fuß}} = 5 \text{ bar}$) bei automatischer Verzögerung im Mittel etwa $63 \text{ ms} (\pm 14 \text{ ms})$ nach Auslösung von EVITA erreicht wird, variieren die Reaktionszeiten von Verzögerungsbeginn von EVITA bis zum manuellen Bremseneingriff deutlich ($748 \pm 210 \text{ ms}$). Zieht man diese Reaktionszeiten bei der Betrachtung mit ein, wird der Unterschied zwischen automatischem und manuellen Manöver noch deutlicher.

Tabelle 5-10: Mittlerer Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Nickraten und des Kraftaufbaus über alle Fahrer nach Beginn des Bremsdruckaufbaus in den manuellen Bremsmanövern

	Mittlerer Zeitpunkt des Maximums & Standardabw. in s	Frühester Zeitpunkt des Maximums in s	Spätester Zeitpunkt des Maximums in s
Nickrate auf Schulterhöhe	0,39 ± 0,20 (MAEB: 0,32 ± 0,06)	0,21	0,95
Nickrate auf Höhe der LWS	0,43 ± 0,20 (MAEB: 0,31 ± 0,05)	0,23	0,96
Nickrate am Kopf	0,40 ± 0,12 (MAEB: 0,33 ± 0,12)	0,19	0,59
Kraftanstiegsrate am Lenker	0,24 ± 0,07 (MAEB: 0,22 ± 0,03)	0,15	0,42

Der Vergleich zwischen automatischen und manuellen Bremsmanövern lässt den Schluss zu, dass die automatischen Bremsengriffe dazu beitragen, die Fahrerreaktion „beherrschbar“ oder zumindest vorhersehbar zu machen. Durch das Provozieren einer unwillkürlichen Fahrerreaktion, die in erster Linie physikalischen Gesetzen folgt, wird ein vorhersehbarer charakteristischer Bewegungsablauf eingeleitet, der zum Abfangen der Oberkörperbewegung notwendig ist. Einflüsse des fahrerindividuellen Handelns (unterschiedliche Reaktionszeiten, Verzögerungsstrategien etc.) werden reduziert.

5.3.4 Kontrollierbarkeitsbewertung

Wie bereits für die erste Probandenstudie zur Potentialermittlung wird auch in diesem Studienabschnitt eine subjektive Kontrollierbarkeitsbewertung der jeweiligen Notbrems-situation durch die Probanden vorgenommen. Die Einordnung erfolgt auch hier anhand der in Abschnitt 4.2.2 eingeführten Kontrollierbarkeitsskala nach Neukum et al.¹⁰⁴.

Wie bereits in der ersten Probandenstudie verteilen sich die Bewertungen des automatischen Bremsengriffs auf die Bereiche „harmlos“ (1 bis 3) und „unangenehm“ (4 bis 6), wobei der Mittelwert mit 4 im unteren Bereich der Einstufung „unangenehm“ und damit noch nah an „harmlos“ befindet. Mit einem Mittelwert von 3,43 liegt die Kontrollierbarkeitsbewertung für die manuellen Bremsmanöver gerade noch im harmlosen Bereich und leicht unter dem Wert für automatische Eingriffe. Damit wird das Ergebnis der ersten Probandenstudie bestätigt, dass die Kontrollierbarkeit für Situationen mit automatisch eingeleiteten Bremsmanövern minimal über der für gleiche Situationen, in denen der Fahrer selbst

¹⁰⁴ Neukum, A. et al.: ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten (2008), S. 144.

eingreifen muss, liegt. Die Verteilung der Bewertungen sowie die zugehörigen Mittelwerte sind in Abbildung 5-27 zusammengefasst.

Wie in der ersten Probandenstudie wurde kein automatischer Bremsengriff mit dem *Blockprofil* als „gefährlich“ oder „nicht kontrollierbar“ eingestuft, was zeigt, dass ein Einsatz von MAEB hinsichtlich der Akzeptanz durch die Anwender vielversprechend ist. Ein Fahrer bewertet die Situation im Fall der manuellen Bremsung als „gefährlich“.

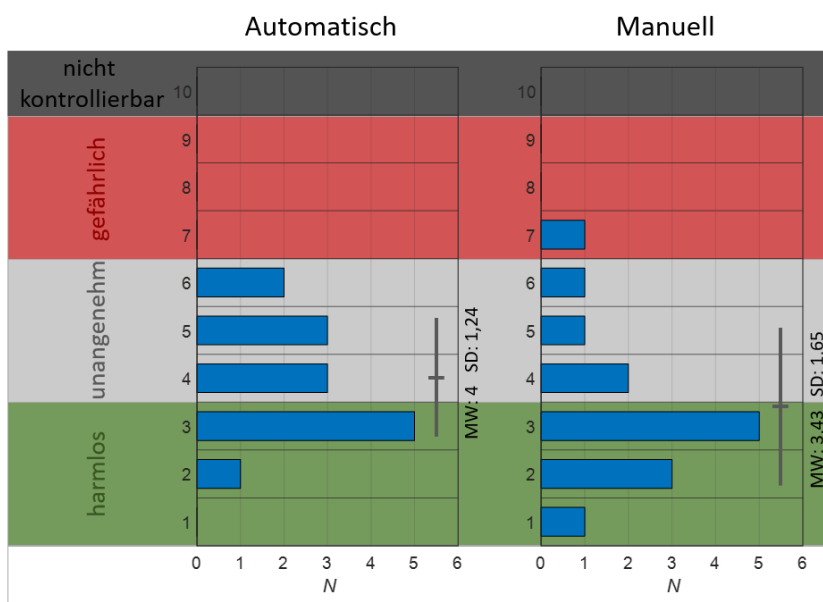


Abbildung 5-27: Zusammenfassung der Ergebnisse der subjektiven Kontrollierbarkeitsbewertungen der zweiten Probandenstudie (Häufigkeiten)

5.3.5 Zwischenfazit Probandenstudie 2 – Maße zur Beschreibung der Fahrerreaktion

Die Versuche der zweiten Probandenstudie zeigen, dass das Verhalten des Fahrers bei fahrerinduzierten Bremsmanövern recht inhomogen ist, wohingegen die unwillkürlichen Reaktionen auf automatische Bremsengriffe einem charakteristischen Muster folgen. Diese Erkenntnis schafft Vertrauen, dass es möglich ist, Fahrerreaktionen bei der Auslegung von automatischen Bremsengriffen abzuschätzen und dieses Wissen für die Entwicklung und Applikation risikoarm einsetzbarer automatischer Notbremssysteme nutzen zu können.

Während die Kopfbewegung im Vorversuch vielversprechend erschien, da sie die signifikanteste Differenzierung zwischen verschiedenen Manövern für einen einzelnen Fahrer zeigte¹⁰⁵, zeigt die Probandenstudie, dass das Maß eine deutliche Schwäche in Bezug auf die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit über verschiedene Fahrer hinweg aufweist.

¹⁰⁵ Merkel, N. L.; Winner, H.: Measures for Rider's Adaption (2019).

Somit kann die Kopfbewegung nicht als Maß zur Beurteilung der Bremsbereitschaft herangezogen werden.

Es hat sich gezeigt, dass die Nickbewegung des Fahreroberkörpers im Vergleich zur Kopfbewegung ein zuverlässiger reproduzierbares Maß zur Beschreibung der Fahrerreaktion bei automatischen Bremsengriffen darstellt. Dieses Maß bleibt bei allen ausgewerteten automatischen Manövern in einem schmalen Korridor. Aufgrund der geringen Flexibilität der Wirbelsäule zwischen LWS- und Schulterebene bleiben die Nickratenverläufe an beiden Messpunkten nah beieinander. Für zukünftige Studien schafft das Vertrauen, dass ein einzelner Nickratensensor am Rücken zur Analyse der Fahrerbewegung voraussichtlich ausreichend ist.

Während das Ende der Transitionsphase in der ersten Probandenstudie anhand des abgeschlossenen Beschleunigungsaufbaus am Fahreroberkörper ermittelt wurde, lag das Hauptaugenmerk in der zweiten Probandenstudie auf den Zeitpunkten des Auftretens der Maxima von Nick- und Kraftanstiegsrate. Das Nickratenmaximum (und damit wie zuvor beschrieben der Beginn des Abfangens der Vorverlagerung des Oberkörpers) kann als Höhepunkt der Transitionsphase angesehen werden. Anhand der beobachteten Nickratenverläufe kann zum Zeitpunkt des Erreichens des Maximums davon ausgegangen werden, dass die Transitionsphase nach etwa der doppelten Zeit abgeschlossen ist. Diese Annahme wird durch die für das Blockprofil ermittelten Zeiten (mittlere Transitionszeit: $0,57 \pm 0,1$ s, Nickratenmaximum nach $0,32 \pm 0,06$ s) bestätigt.

Ein alternatives Maß zur Nickbewegung des Oberkörpers ist die Kraftanstiegsrate, während der Fahrer die Vorverlagerung des Oberkörpers durch Abstützen am Lenker abfängt. Die Kraftanstiegsrate erweist sich als ähnlich reproduzierbar wie die Nickrate. Das Maximum tritt jedoch etwas früher auf. Die Integration eines Kraftsensors am Lenker stellt somit eine Alternative zum Nickratensensor am Rücken des Fahrers dar. Während der Nickratensensor die konservativere Einschätzung darüber gibt, ob der Fahrer bereit für die maximale Verzögerung ist (maximale Nickrate tritt später auf als die maximale Kraftanstiegsrate), hat Auswertung des Kraftanstiegs den Vorteil, dass der Sensor direkt am Fahrzeug montiert ist und somit fahrerunabhängig in ein mit MAEB ausgerüstetes Fahrzeug integriert werden kann.

Eine weitere Schlussfolgerung der Studie ist, dass die Homogenität der Fahrerreaktionen in automatischen Bremsmanövern vielversprechend ist hinsichtlich der Möglichkeit, die Kontrollierbarkeit von MAEB in Studien mit relativ kleinen Teilnehmerzahlen zu bewerten und die Ergebnisse auf eine große Anzahl von Fahrern zu übertragen.

Die Kontrollierbarkeitsbewertung bestätigt die Ergebnisse der ersten Probandenstudie. Automatische Bremsengriffe mit dem Bremsprofil Block werden höchstens als „unangenehm“, häufig sogar als „harmlos“ bewertet. Es erfolgen keine Einordnungen in die Kategorien „gefährlich“ oder „nicht kontrollierbar“. Somit sind – zumindest in Bezug auf das untersuchte Notbremszenario – keine Einschränkungen hinsichtlich der Akzeptanz zu erwarten.

6 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Das wie in Kapitel 4 beschrieben entwickelte dreiteilige Studienkonzept wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit vollständig durchlaufen. Für ein prototypisches System wurden in einer Expertenstudie für Normalfahrer kontrollierbare Parameter für verschiedene Eingriffsprofile ermittelt (Abschnitt 5.1). Anschließend wurden die parametrisierten Profile in einer Studie mit „Normalfahrern“ hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Akzeptanz durch die Probanden untersucht (Abschnitt 5.2). Das priorisierte (Block-)Profil wurde in einer weiteren Normalfahrerstudie angewendet, um ein besseres Verständnis der Reaktion unvorbereiteter Fahrer auf unvorhergesehene Bremsingriffe hinsichtlich charakteristischer Abläufe und Reproduzierbarkeit zu generieren (Abschnitt 5.3). Die den einzelnen Teilstudien zugeordneten zusammengefassten Hauptkenntnisse können Abbildung 6-1 entnommen werden.

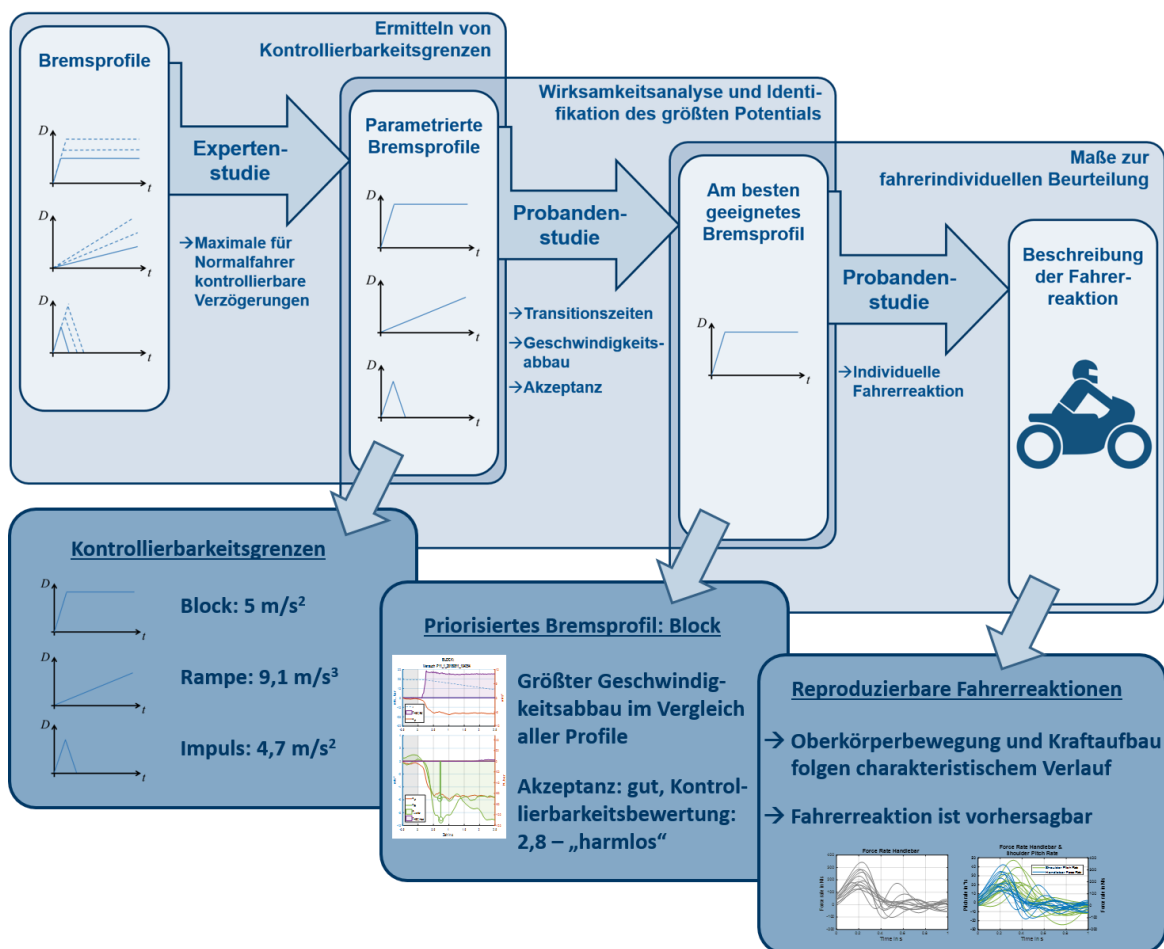


Abbildung 6-1: Zusammenfassung der Ergebnisse mit Zuordnung zu den Teilstudien

Beim Anwenden der in der Expertenstudie ermittelten Kontrollierbarkeitsgrenzen der verschiedenen Eingriffsprofile in der zweiten Studie wurden unvorbereitete Fahrer mit den parametrisierten Eingriffen konfrontiert und die Effektivität (gemessen an der möglichen Geschwindigkeitsreduktion) und Akzeptanz der Eingriffe wurden untersucht. Aus der Akzeptanz (Eingriffe werden in der Subjektivbewertung nie als „gefährlich“ wahrgenommen) und dem Ausbleiben von Kontrollverlusten lässt sich schließen, dass eine vorgelagerte Expertenstudie geeignet ist, die unvorbereiteten Fahrern zumutbaren Parameter eines automatischen Bremseneingriffs festzulegen. Die Einschätzung der Experten zur Kontrollierbarkeit der Teilbremsprofile bestätigt sich.

Aus den Ergebnissen dieses Studienabschnitts ergibt sich die Priorisierung des Bremsprofils „Block“ als vielversprechendste Gestaltung einer automatischen Teilbremsung. Der deutliche Abstand zum an zweiter Stelle stehenden Profil „Rampe“ hinsichtlich des Geschwindigkeitsabbaus von gut 11 km/h (Geschwindigkeitsabbau von 32,5 km/h für *Block* vs. 21,5 km/h für *Rampe* im Referenzzeitraum) erlaubt ein Verwerfen aller anderen Profile und das Priorisieren des *Blocks* für die weiteren Untersuchungen. Die sehr kurze Transitionsphase von nur 0,57 s verspricht eine große Effektivität des *Blocks* als vorbereitende Teilbremsung.

Die Untersuchung der fahrerindividuellen Reaktion auf den Eingriff in der dritten Studie zeigt, dass die unwillkürliche körperliche Reaktion auf einen automatischen Bremseneingriff über alle Probanden hinweg einem charakteristischen Verlauf folgt. Die Verläufe bewegen sich hierbei in einem so engen Korridor, dass die Schlussfolgerung naheliegt, dass der automatische Eingriff sogar dazu beiträgt, die Fahrerreaktion „kontrollierbar“ oder zumindest vorhersehbar zu machen. Die in diesem Studienabschnitt beobachteten homogenen Fahrerreaktionen schaffen Vertrauen, dass zukünftig für die Untersuchung bzw. Freigabe von MAEB auch kleine Stichproben an Probanden ausreichen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

Das Ermitteln des Nickratenmaximums am Fahreroberkörper als Höhepunkt der nahezu symmetrisch verlaufenden Transitionsphase bestätigt das Ergebnis der ersten Probandenstudie für das Blockprofil. Das Nickratenmaximum tritt etwa nach der Hälfte ($0,32 \pm 0,06$ s) der dort ermittelten Transitionsdauer ($0,57 \pm 0,1$ s) auf. Anhand der wesentlich kleineren Streuung der Zeitpunkte stellt sich die Nickrate jedoch als zuverlässigeres Maß heraus.

Als weiteres Ergebnis über die beiden Probandenstudien hinweg hat sich EVITA als Untersuchungswerkzeug bewährt, indem den Probanden ein geeignetes realistisches Versuchsszenario geboten werden konnte, ohne dass es zu kritischen Situationen (Kollision, Kontrollverlust, Sturz) kam.

6.1 Belastbarkeit der Ergebnisse

Alle Versuche wurden mit demselben Fahrzeug durchgeführt. Es ist nicht auszuschließen, dass Kontrollierbarkeitsgrenzen und Transitionszeiten maßgeblich durch die Fahrzeugergonomie (und damit durch die Sitzposition/-haltung) beeinflusst werden. Daher gelten die ermittelten Parameter für die verschiedenen Teilbremsprofile sowie die berechneten Werte des potentiellen Geschwindigkeitsabbaus lediglich für den untersuchten Fahrzeugtyp.

Darüber hinaus wurde eine eng definierte Fahrsituation (Ausgangsgeschwindigkeit 70 km/h, Geradeausfahrt, beide Hände am Lenker, Aufmerksamkeit des Fahrers auf der Fahraufgabe) betrachtet. Daher beschränken sich die gewonnenen Erkenntnisse auf Szenarien mit entsprechenden Randbedingungen.

Die quantitativen Ergebnisse der Studien erheben nicht den Anspruch auf statistische Belastbarkeit bzw. es wurde auf eine statistische Auswertung der Ergebnisse verzichtet. Vielmehr war Ziel der Untersuchungen, zu zeigen, dass die Methodik grundsätzlich geeignet ist, die Anwendbarkeit eines MAEB zu untersuchen. Die Ergebnisse geben vielversprechende Hinweise, dass auch bei größeren Stichproben keine unvorhergesehenen deutlich negativeren Ergebnisse hinsichtlich der Akzeptanz zu erwarten sind. Insbesondere der dritte Studienteil weist außerdem darauf hin, dass durch die in engen Bahnen verlaufenden charakteristischen Fahrerreaktionen bereits kleine Stichproben aussagekräftige Ergebnisse liefern können.

Das prototypisch umgesetzte System, das in den Studien zum Einsatz kam, bietet lediglich die Möglichkeit, das Motorrad ferngesteuert zu verzögern. Es handelt sich nicht um ein Notbremssystem im eigentlichen Sinne mit Umfelderkennung und Auslöselogik. Bedingt durch das Versuchsdesign wird die Verzögerung des Fahrzeugs gleichzeitig mit dem Verzögerungsbeginn des Vorderfahrzeugs eingeleitet. Es wird also ein „ideales“ System simuliert, das zum frühestmöglichen Zeitpunkt eingreift. Ein reales System würde dem Fahrer die Gelegenheit bieten, selbst einzugreifen und erst beim Über- bzw. Unterschreiten bestimmter Schwellen aktiv werden¹⁰⁶.

¹⁰⁶ Warn-/Eingriffszeitpunkte s. Winner, H.: Grundlagen von Frontkollisionsschutzsystemen (2015), S. 898 ff.

7 Fazit und Ausblick

Motiviert durch die am Anfang der Arbeit beschriebenen Herausforderungen hinsichtlich der Untersuchung aktiver Eingriffe durch FAS bei Motorrädern wurde eine Methodik entwickelt, die es erlaubt, Kontrollierbarkeitsgrenzen eines MAEB zu ermitteln, ohne Probanden einer im Vergleich zum alltäglichen Motorradfahren erhöhten Gefährdung auszusetzen, gleichzeitig aber natürliche Reaktionen unvorbereiteter Fahrer zu untersuchen, ohne dass diese mit der auftretenden Notbremssituation rechnen.

Die Methodik wurde auf ein prototypisch umgesetztes System (keine Umfelderkennung, ferngesteuerte Auslösung von Bremsengriffen) erfolgreich angewendet und erwies sich dabei als praktikabel. Es konnte gezeigt werden, dass automatische Bremsengriffe bei Motorrädern grundsätzlich anwendbar sind und in geeigneten Grenzen keine zusätzliche Gefährdung (über die für das Motorradfahren üblicherweise angenommene Gefährdung hinaus) für den Fahrer darstellen.

Durch die Entwicklung und Validierung der Methodik wird ein Beitrag zur zukünftigen Freigabe automatischer Notbremssysteme für Motorräder geleistet. Die Methodik gibt Herstellern die Möglichkeit, systematisch nachzuweisen, dass von ihnen entwickelte Systeme für den Anwender kontrollierbar und somit ohne Erzeugung einer zusätzlichen Gefährdung einsetzbar sind. Aus dem in dieser Arbeit beschriebenen dritten Studienteil folgt die Annahme, dass die unwillkürliche Fahrerreaktion durch den unerwarteten Eingriff in kontrollierbare Bahnen gelenkt wird. Angesichts dieser Erkenntnis reicht es ggf. aus, dass auf eine Expertenstudie ein vereinfachter zweiter Studienteil folgt. Erfolgt die Freigabe eines bereits festgelegten Bremsprofils, fällt im zweiten Studienteil die Potentialermittlung weg und sie dient lediglich noch der Validierung der in der Expertenstudie ermittelten Kontrollierbarkeitsgrenzen und der Evaluierung der Akzeptanz. Die Kontrollierbarkeitsbewertung kann dabei z.B. gemäß Response Code of Practice erfolgen. Demnach ist für ein Szenario ein 85 %-Kontrollierbarkeitslevel erreicht, wenn in einer Studie mit unvorbereiteten Probanden 20 von 20 gültigen Versuchen die „Pass“-Kriterien erfüllen¹⁰⁷.

Auch falsch positive Eingriffe können mit einem ähnlichen Vorgehen abgesichert werden. Ist nicht auszuschließen, dass ein MAEB falsch positive Eingriffe erzeugt, ist auch hier sicherzustellen, dass diese beherrschbar sind. Die Ermittlung der grundlegenden Kontrollierbarkeitsgrenzen könnte auch hier mit einer vorgelagerten Expertenstudie erfolgen, während im zweiten Schritt die Beherrschbarkeit nach einem von Neukum beschriebenen Verfahren¹⁰⁸ beurteilt wird.

Die im dritten Studienteil ermittelten Maße zur Beschreibung der Fahrerreaktion dienen zunächst nur dem Nachweis, dass das Fahrerverhalten während eines automatischen

¹⁰⁷ Brockmann, M.: Code of Practice (2009), S. 15.

¹⁰⁸ Neukum, A.: Beherrschbarkeit fehlerhafter Eingriffe (2015), S. 127 f.

Notbremseingriffs reproduzierbar ist. Ist für ein System die Kontrollierbarkeit nachgewiesen, muss die Fahrerbewegung nicht dauerhaft erfasst werden. Das parametrisierte Teilbremsprofil kann angewendet werden, um beim Fahrer die Transition in einen bremsbereiten Zustand einzuleiten, und nach einer konservativ abgeschätzten Transitionszeit kann die Verzögerung auf ein maximal mögliches Level erhöht werden. Nichtsdestotrotz ist es denkbar, über in Echtzeit ausgewertete Beobachtung des Fahrerzustands zukünftig unter Umständen sogar eine fahrerindividuelle Anpassung von Eingriffen vorzunehmen. So könnte für Fahrer, die besonders schnell bremsbereit sind, früher die maximale Verzögerung gestellt und ein noch größerer Geschwindigkeitsabbau erreicht werden. Hier bleibt jedoch zu untersuchen, ob bei ohnehin schon sehr kurzen Transitionszeiten (deutlich unter 1 s, siehe Abschnitt 5.2.1) der Zusatzaufwand für eine kontinuierliche Erfassung und Verarbeitung des Fahrerzustands gerechtfertigt ist.

7.1 Ableitung offener Fragen

Zukünftig bleibt zu klären, in welchem Maß die Fahrzeuggeometrie Kontrollierbarkeitsgrenzen und die subjektiv wahrgenommene Kontrollierbarkeit beeinflusst (z.B. Tourenmotorrad mit aufrechter Sitzhaltung und hohem, breitem Lenker vs. Sportmotorrad mit geduckter Haltung und niedrigem Stummellenker).

In der Expertenstudie wurden erste Eindrücke zum Einfluss der Ausgangsgeschwindigkeit auf Kontrollierbarkeitsgrenzen gesammelt. Hier sind jedoch weitere Untersuchungen unter breiterer Abdeckung verschiedener Geschwindigkeitsbereiche nötig. Insbesondere im Hinblick auf Stadtfahrten im (instabilen) Niedriggeschwindigkeitsbereich sind weitere Untersuchungen unabdingbar, wenn ein MAEB auch in diesem Bereich eingesetzt werden soll. Gleiches gilt für automatische Verzögerungen während der Kurvenfahrt. Es ist davon auszugehen, dass in bestimmten Rollwinkelbereichen automatische Verzögerungen nicht mehr kontrollierbar sind, worauf auch die Expertenversuche hinweisen. Hier sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

In den beschriebenen Versuchen wurden die automatischen Verzögerungen im sicheren Versuchsumfeld bis in den Stillstand aufrechterhalten. Unter realen Bedingungen (z.B. mit nachfolgendem Verkehr) ist davon auszugehen, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt die automatische Bremsung ausgeleitet wird, bspw. wenn die Kollisionsgefahr entschärft ist, oder um den Fahrer die vollständige Kontrolle über die Fahrzeuglängsdynamik übernehmen zu lassen. Auch hier ist zu untersuchen, wie die Ausleitung der Verzögerung zu gestalten ist. Durch das Nachlassen der Verzögerung sind wie beim Aufbau unwillkürliche Fahrerreaktionen zu erwarten, die wie beim Einleiten der Bremsung das Fahrer-Fahrzeug-System nicht destabilisieren dürfen. Das Ausleiten ist insbesondere auch dann relevant, wenn etwaige Abbruchkriterien erreicht werden, z.B. wenn der Fahrer sich während einer automatischen Verzögerung für ein Ausweichmanöver entscheidet und Rollwinkel erreicht, die im System als Einsatzgrenze für die automatische Verzögerung festgelegt sind. Hier muss

in jedem Fall vermieden werden, dass in einer sowieso schon kritischen Situation (Rollwinkelaufbau während eines automatischen Bremsmanövers) zusätzlich eine potentielle Destabilisierung durch ein ungeeignetes Ausleitemanöver erfolgt.

Die in den durchgeführten Versuchen gegebenen Idealbedingungen (Fahrer hat beide Hände am Lenker, Aufmerksamkeit ist bei der Fahraufgabe) ist nicht immer gegeben. Es kann bspw. durch Bedienung von Navigations- oder Kommunikationssystemen zu ein- oder sogar freihändiger Fahrt kommen, der Fahrer kann seinen Blick von der Straße abwenden, oder statt im Sattel zu sitzen auf den Fußrasten stehen. Gerade in solchen Situationen der Ablenkung kann ein Eingreifen eines Assistenzsystems notwendig werden. Ist ein automatischer Bremsengriff hier nicht systembedingt ausgeschlossen, muss die Kontrollierbarkeit auch für den Fall solcher sogenannten Misuse-Fälle sichergestellt und somit im Versuch nachgewiesen werden.

Neben Fällen von Misuse ist auch die Fahrerreaktion in Fällen falsch positiver Eingriffe zu betrachten. Wie zuvor beschrieben erfolgt die erste Reaktion auf einen automatischen Bremsengriff als unwillkürlicher, physikalischen Gesetzen folgender Effekt. Im ersten Moment ist also bei gleichen Fahrbedingungen (abgesehen vom fehlenden potentiellen Kollisionspartner) kein Unterschied in der Handlung zu erwarten. Nichtsdestotrotz ist sicherzustellen, dass der Fahrer in der Folge durch Unverständnis oder Missinterpretation der Situation keine unerwünschte Handlung vornimmt, die zu einem kritischen Zustand führt. Somit stellen falsch positive Eingriffe einen weiteren zukünftigen Untersuchungsgegenstand dar.

Über die Untersuchung von MAEB hinaus könnten sich auf Basis der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zukünftige Forschungsarbeiten mit der Übertragbarkeit der Methodik auf die Untersuchung weiterer aktiv eingreifender Assistenzsysteme für Motorräder beschäftigen.

A Anhang

A.1 Untersuchungswerkzeuge

A.1.1 Bremsaktor

Wie in Abschnitt 4.4.1 beschrieben, ist das Versuchsfahrzeug mit einem Bremsaktor ausgestattet, der es ermöglicht, das Motorrad ferngesteuert zu bremsen. Ein an der Soziusfußrastenhalterung montierter Schrittmotor greift über einen Seilzug am Fußbremshebel an. Mit dem gewählten Aufbau, bei dem die automatische Bremsung über den gleichen Weg eingeleitet wird, wie die dadurch ersetzte Fahrereingabe (Betätigung des Fußbremshebels), ist sichergestellt, dass die ABS-Funktionalität uneingeschränkt erhalten bleibt. Außerdem ist es dem Fahrer so jederzeit möglich, über die vom Aktor gestellte Verzögerung hinaus die Fußbremse oder den Handbremshebel zu betätigen, um die Verzögerung erhöhen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt den an der Soziusfußrastenhalterung montierten Aktor.



Abbildung A-1: An der Soziusfußraste montierter Bremsaktor

Der verbaute Schrittmotor (Datenblatt am Ende dieses Abschnitts) liefert über ein Planetengetriebe der Übersetzung $i = 5$ (Datenblatt ebenfalls am Ende dieses Abschnitts) Haltemomente von bis zu 12,5 Nm und ist damit in der Lage, Bremsdrücke bis ca. 35 bar am Hauptbremszylinder der Hinterradbremse zu stellen. Bei diesem Bremsdruck werden unter Verwendung des CBS auf trockener Fahrbahn Fahrzeugverzögerungen bis zu 0,7 g erreicht, was der nach Abschnitt 4.3 geforderten Begrenzung der Verzögerung entspricht.

Da die Spannungsversorgung über das Bordnetz nicht ausreicht, um die nötigen Drehmomente zu stellen, erfolgt die Versorgung über einen 12/48V DC/DC-Wandler. Ein Endschalter ermöglicht, durch Anfahren einer definierten Position, den Leerweg des Aktors bei Bremsbeginn zu reduzieren und reproduzierbar zu machen.

Die Motorsteuerung kann über die Entwicklungsumgebung LabVIEW mit dem am Motorrad installierten Messsystem kommunizieren. In LabVIEW sind die verschiedenen Bremsprofile (*Block*, *Rampe*, *Impuls*) hinterlegt und können während des Versuchsbetriebs ausgewählt und parametrisiert werden. Als Stellgröße für die Regelung des Drucks im Hauptbremszylinder wird eine Anzahl an zu fahrenden Motorschritten verwendet. Dabei wird auf eine Positionierung relativ zur Ist-Position des Bremsaktors zurückgegriffen, da diese im Gegensatz zu einer absoluten Positionierung aus einer festgelegten Referenzposition nicht anfällig gegen Schrittverluste ist.



GPLE60
Präzisionsplanetengetriebe

AUSFÜHRUNGEN

Typ	Unterstützung	Abtriebsmoment Nennwert	Abtriebsmoment Max. Wert	Wirkungsgrad %	Werkstoff (Werkstoff)	Flächmoment kg mm ²	Länge mm	Zwischenstufen L1	Getriebe kg
GPLE60-1S-3	3	38	40	97	<10	13,5	47	3489*	0,9
GPLE60-1S-4	4	58	61	97	<10	9,8	47	3489*	0,9
GPLE60-1S-5	5	40	64	97	<10	7,5	47	3489*	0,9
GPLE60-1S-8	8	18	29	97	<10	6,5	47	3489*	0,9
GPLE60-1S-10	10	13	24	97	<10	6,5	47	3489*	0,9
GPLE60-2S-9	9	44	70	95	<12	13,1	55,5	3489*	1,1
GPLE60-2S-12	12	44	70	95	<12	12,7	55,5	3489*	1,1
GPLE60-2S-15	15	44	70	95	<12	7,7	55,5	3489*	1,1
GPLE60-2S-16	16	44	70	95	<12	8,8	55,5	3489*	1,1
GPLE60-2S-20	20	44	70	95	<12	7,5	55,5	3489*	1,1
GPLE60-2S-25	25	40	64	95	<12	7,5	55,5	3489*	1,1
GPLE60-2S-32	32	44	70	95	<12	6,4	55,5	3489*	1,1
GPLE60-2S-40	40	40	64	95	<12	6,4	55,5	3489*	1,1
GPLE60-3S-64	64	18	29	95	<12	6,4	55,5	3489*	1,1
GPLE60-3S-80	80	44	70	91	<15	7,6	72	3489*	1,3
GPLE60-3S-90	90	44	70	91	<15	7,5	72	3489*	1,3
GPLE60-3S-100	100	44	70	91	<15	7,5	72	3489*	1,3
GPLE60-3S-120	120	44	70	91	<15	6,4	72	3489*	1,3
GPLE60-3S-160	160	44	70	91	<15	6,4	72	3489*	1,3
GPLE60-3S-200	200	40	64	91	<15	6,4	72	3489*	1,3
GPLE60-3S-256	256	44	70	91	<15	6,4	72	3489*	1,3
GPLE60-3S-320	320	40	64	91	<15	6,4	72	3489*	1,3
GPLE60-3S-512	512	18	29	91	<15	6,4	72	3489*	1,3

* Bei den Motorgrößen NEMA 23 und 24 beträgt die Zwischenstufenlänge L1 24,3 mm, bei NEMA 34 Motoren 39 mm.



GPLE60
Präzisionsplanetengetriebe



TECHNISCHE DATEN

Schutzart	IP54
Lebensdauer*	30.000 h
Kombination mit Motor	NEMA 23, 24, 34
Betriebstemperatur	-25°C bis +50°C
zulässige radiale/axiale Wellenbelastung (N)	340/450 (Lebensdauer* 10.000 h; 400/500 N)
Antriebsdrehzahl max.	13.000 U/min

* Die Lebensdauer ist bei den angegebenen Nennmomenten und einer Umgebungstemperatur von 30°C sowie bei den angegebenen Bedingungen und aufgrund der zarten Oberflächenbeschaffenheit genauer Angaben möglich.

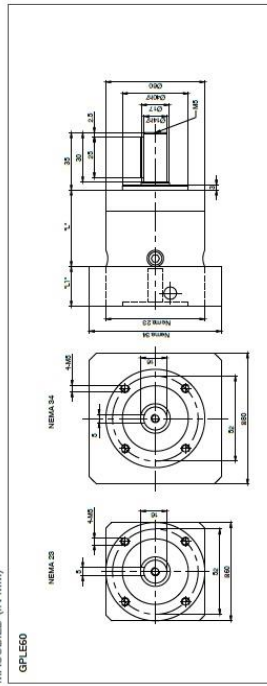
BESTELLBEZEICHNUNG

GPLE60-1S-3
= für NEMA 23, 24 Motoren
-F37 = für NEMA 34 Motoren

ZUBEHÖR

MKDHS-11-GPLE Distanzhülse

MASSBILD (IN MM)



A.1.2 Kupplungsaktor

Wie in Abschnitt 4.3 erläutert, ist während der Durchführung einer automatischen Bremsung die Kupplung zu trennen, um eine bessere Bremswirkung zu erzielen und Beschleunigen des Fahrzeugs durch unbeabsichtigte Eingaben am Gasdrehgriff zu verhindern. Der Zustand der

geöffneten Kupplung beschreibt für den Versuch einen „sicheren Zustand“, da keine Zugkraft mehr übertragen werden kann. Dieser sichere Zustand ist konsequenterweise neben dem automatischen Bremsengriff auch im Fehlerfall sowie im stromlosen Zustand einzustellen. Des Weiteren wird beim Abbremsen bis in den Stillstand durch ein automatisches Öffnen der Kupplung sichergestellt, dass der Motor weiterläuft und somit die Spannungsversorgung der Messtechnik durchgehend gewährleistet ist.

Um die Kupplung öffnen zu können, ohne den Fahrer durch eine Betätigung des Kupplungshebels zu beeinflussen, wird ein Kupplungsaktor eingesetzt. Die Konstruktion besitzt als Energiespeicher eine vorgespannte Feder, die durch zwei Elektromagnete gehalten wird. Sind die Magnete stromlos, entspannt sich die Feder und betätigt über ein Drahtseil den Ausdrückbolzen der Kupplung direkt am Getriebegehäuse. Im bestromten/vorgespannten Zustand hängt das Drahtseil spannungsfrei zwischen Aktor und Ausdrückbolzen, sodass die manuelle Betätigung der Kupplung störungsfrei möglich ist. So ist es dem Fahrer möglich, vor einer Auslösung der Bremsung normal zu beschleunigen und zu schalten. Erst nach einer automatisierten Betätigung von Bremse und Kupplung ist keine Fahrerbetätigung mehr möglich. Der Aktor und seine Funktionsweise sind in Abbildung A-2 dargestellt. Abbildung A-3 zeigt den Aktor in eingebautem Zustand.

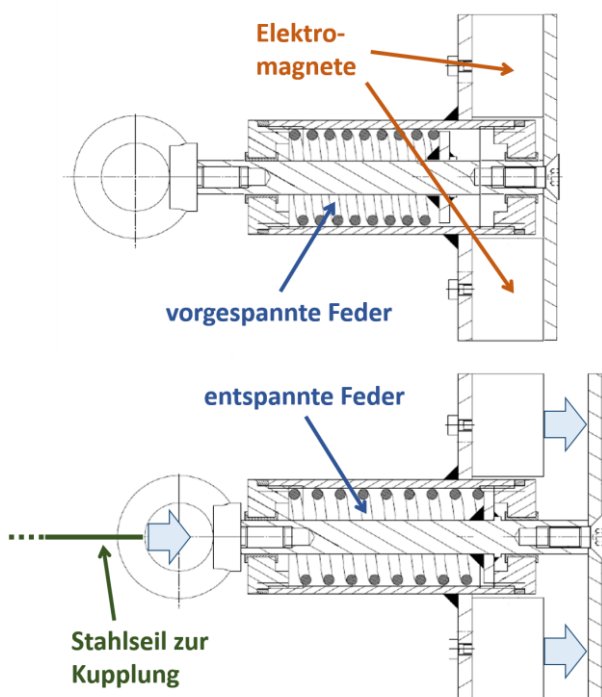


Abbildung A-2: Aufbau des Kupplungsaktors



Abbildung A-3: Kupplungsaktor im eingebauten Zustand

A.1.3 Messung Fahrerreaktion

Fahreroberkörperbeschleunigung

Zur Erfassung der Oberkörperbewegung wird auf einen Beschleunigungssensor zurückgegriffen, der am Fahrerrücken auf Höhe der Schulterblätter angebracht wird.

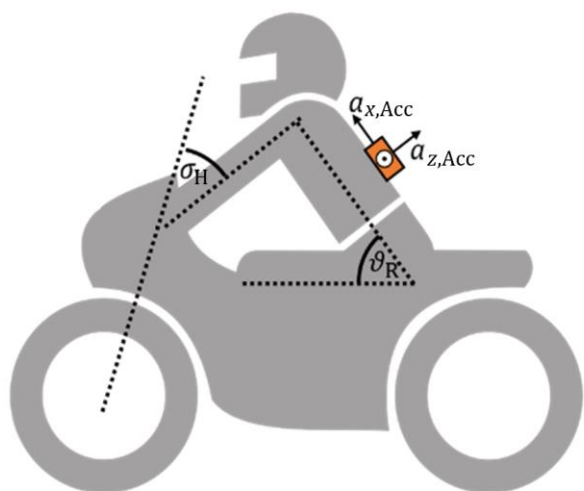


Abbildung A-4: Sensorposition zur Messung der Fahreroberkörperbeschleunigung

Beim Sensor handelt es sich um einen dreiachsigen, analogen Beschleunigungssensor mit einem Messbereich von $\pm 1,5 \text{ g}$. Unter Annahme eines konstanten Fahrernickwinkels ϑ_R (Abbildung A-4) errechnet sich die Fahrerlängsbeschleunigung $a_{x,R}$ mit den vom Beschleunigungssensor gemessenen Werten $a_{x,Acc}$ und $a_{z,Acc}$ gemäß Formel (A-1).

$$a_{x,R} = -a_{x,Acc} \cdot \cos(\vartheta_R) + a_{z,Acc} \cdot \sin(\vartheta_R) \quad (A-1)$$

Der Fahrernickwinkel wird dabei abgeschätzt unter der Annahme, dass der Fahrer kurz vor dem automatischen Bremsengriff in der konstanten Geradeausfahrt eine im Wesentlichen gleichbleibende Sitzposition hat und somit nur die Erdbeschleunigung auf ihn wirkt. Die Abschätzung des dabei vorliegenden Oberkörperwinkels ϑ_R erfolgt mithilfe der zum entsprechenden Zeitpunkt gemessenen Beschleunigungswerte in der Sagittalebene $a_{x,Acc}$ und $a_{z,Acc}$. Der aus diesen Beschleunigungswerten gebildete Vektor entspricht gemäß der Annahme der Erdbeschleunigung. Entsprechend wird der Neigungswinkel des Sensors, der dem Fahreroberkörpernickwinkel entspricht nach Formel (A-2) als Winkel zu den theoretischen Messwerten eines in der Nulllage befindlichen Sensors berechnet¹⁰⁹.

$$\vartheta_R = \cos^{-1} \left(\frac{\begin{pmatrix} 0 \\ -9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{x,Acc} \\ a_{z,Acc} \end{pmatrix}}{\left| \begin{pmatrix} 0 \\ -9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \end{pmatrix} \right| \cdot \left| \begin{pmatrix} a_{x,Acc} \\ a_{z,Acc} \end{pmatrix} \right|} \right) \quad (A-2)$$

Durch die Annahme eines konstanten Fahrernickwinkels sind Ungenauigkeiten in den Fahrerlängsbeschleunigungen zu erwarten. Da aber für die Beschreibung der Transition in erster Linie das dynamische Verhalten des Anstiegs der Fahrerlängsbeschleunigung betrachtet wird, ist die Annahme für die Auswertung der ersten Probandenstudie vertretbar.

¹⁰⁹ Vorgehen nach Basten, T.: BaTh, Messung der Oberkörperbewegung (2018).

Datenblatt Beschleunigungssensor

https://www.distrelec.de/Web/Downloads/65/71/dis_sensors_qg40n_kaxyzh_1.5_AV_PT_2014_eng_tds.pdf, Zugriff: 15.11.2021

QG series


QG40N-KAXYZh-1,5-AV-PT


Acceleration sensor
3 axis horizontal mounting


Output
0,5 - 4,5 V

Supply voltage
10 - 30V dc

Measuring range
± 1,5 G







QG40N-KAXYZh-1,5-AV-PT	General specifications v20151013
Housing	Plastic injection molded housing (Quadro40, PBTP black)
Dimensions (indicative)	40x40x25 mm
Mounting	2x M3x25 mm zinc plated steel pozidrive screws included
Ingress Protection (IEC 60529)	IP67
Relative humidity	0 - 100%
Weight	ca 45 gr (excl cable)
Supply voltage	10 - 30V dc
Polarity protection	Yes
Current consumption	≤ 15 mA
Operating temperature	-25 .. +85°C
Storage temperature	-25 .. +85°C
Measuring range	± 1,5 G
Centering function	Yes (2,5 V = 0 G), range ±5°
Frequency response (-3dB)	0 - 120 Hz
Accuracy (2σ)	overall 0,02g typ.
Offset error	< ± 0,3% F.S. (after zeroing)
Non linearity	< ± 0,3% F.S.
Sensitivity error	< ± 1%
Resolution	0,001 g
Temperature coefficient	± 1 mg/K
Max mechanical shock	10.000g
Output	0,5 - 4,5 V
Output load	Rload ≥20kΩ, Cload ≤20 nF
Short circuit protection	Yes (max 10 s)
Output refresh rate	< 1,3 ms

© DIS Sensors - Oostergracht 40 - 3763 LZ SOEST - The Netherlands www.dis-sensors.com Subject to change without notice

Page 1 2015-10-13

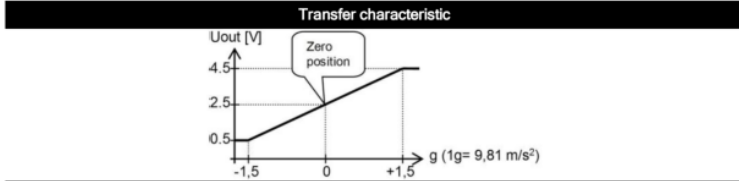
QG series



QG40N-KAXYZh-1,5-AV-PT

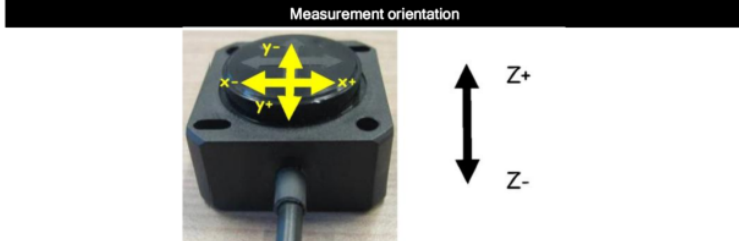
$V_{out} = 2,5 + 1,33 \cdot g$ [V]

Clipping outside measuring range



QG40N-KAXYZh-1,5-AV-PT

The default zero position is when the sensor is mounted horizontally and no acceleration is applied. Z-axis compensated for 1g gravity.



QG40N-KAXYZh-1,5-AV-PT

Connection

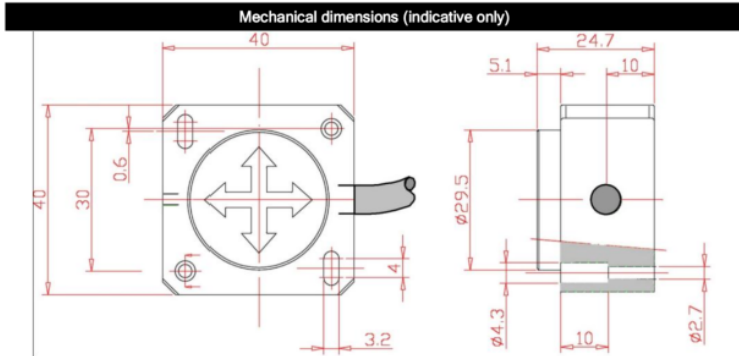
Wire / pin coding

Connectivity (length ±10%)

2 m PUR/TPE Li12y11y, black Ø 5,4 mm, wires: 6x0,34 mm² DIN colors

White	Zeroing
Brown	+ Supply Voltage
Green	GND
Yellow	Output X
Grey	Output Y
Pink	Output Z
(Blue)	(nc)
(Red)	(nc)

QG40N-KAXYZh-1,5-AV-PT



QG40N-KAXYZh-1,5-AV-PT

Zero function

Zeroing should be done within 1 min. after power up.
 After zeroing you've 1 min. left for another centering.
 Normally the zero input should be left unconnected.
 Connect zero input to ground for more than 0,5s

Fahreroberkörper- und Kopfbewegung

Spezifikation der genutzten MTw Awinda Motion-Tracker¹¹⁰



11 Appendices

11.1 MTw Technical Specifications

11.1.1 MTw Performance

	Angular velocity	Acceleration	Magnetic field	Pressure
Dimensions	3 axes	3 axes	3 axes	-
Full Scale	± 2000 deg/s	± 160 m/s ²	± 1.9 Gauss	300 -1100 mBar ¹⁰
Non-linearity	0.1 % of FS	0.5 % of IFS	0.1 % of FS	0.05 % of FS
Bias stability ¹¹	10deg/hr	0.1mg	-	100 Pa/year
Noise	0.01deg/s/√Hz	200 µg/√Hz	0.2mGauss/√Hz	0.85 Pa/√Hz
Alignment error	0.1 deg	0.1 deg	0.1 deg	-
Bandwidth	180Hz	180 Hz	10-60 Hz (var.)	-

11.1.2 Orientation Performance

Dynamic Range	all angles in 3D
Static accuracy (Roll/Pitch)	0.5 deg RMS
Static Accuracy ¹² (Heading)	1 deg RMS
Dynamic Accuracy (Roll/Pitch)	0.75 deg RMS
Dynamic Accuracy (Heading) ¹³	1.5 deg RMS

11.1.3 MTw Physical Properties

Accelerometers	MEMS solid state, capacitive readout
Rate gyroscope	MEMS solid state, capacitive readout
Magnetometer	Magneto-Impedance sensor elements
Barometer	Piezo-resistive sensor element
Weight	16g
Housing dimensions	47 x 30 x13mm

¹⁰ (-500 -.9000 m above sea level)

¹¹ As measured from the Allan variance diagram.



¹² In homogeneous, undisturbed magnetic environment

¹³ In homogeneous, undisturbed magnetic environment

¹¹⁰ Xsens: MTw Awinda User Manual (2018), S. 62.

A.2 Fragebogen

Fragebogen der ersten Probandenstudie – Fragebogen bei zweiter Probandenstudie hat die gleiche Form, entwickelt im Rahmen einer Studienarbeit¹¹¹

FZD Probandenstudie – Projekt „SVEN“		 TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT
Probandennummer:	Datum:	 FAHRZEUGTECHNIK TU DARMSTADT
<p><i>Vielen Dank, dass Sie sich bereit erklären, an der Probandenstudie im Rahmen des Forschungsprojektes „SVEN“ am Fachgebiet Fahrzeugtechnik Darmstadt teilzunehmen. Die Studie wird aus insgesamt drei Teilen bestehen. Im ersten Teil erfragen wir allgemeine Informationen zu Ihrer Person, Ihrer Fahrrountine und Ihrem Motorrad. Im zweiten Teil wird ein Fahrversuch auf dem Motorrad stattfinden, der auf der nächsten Seite erläutert wird. Es handelt sich dabei um ein mit Messtechnik ausgestattetes Versuchsmotorrad. Im dritten Teil der Studie werden Sie gebeten, eine Beurteilung zum Fahrversuch abzugeben.</i></p> <p><i>Sie nehmen an dieser Studie freiwillig teil und haben jederzeit die Möglichkeit, den Versuch abzubrechen. Alle von Ihnen zur Verfügung gestellten Daten werden vertraulich und anonymisiert behandelt.</i></p>		
<h3>I Allgemeine Informationen</h3>		
Geschlecht <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich <input type="checkbox"/> keine Angabe	Alter <div style="text-align: center;">Jahre</div>	Haltdauer Führerschein Klasse A2 / A <div style="text-align: center;">Jahre</div>
Jährliche Kilometerleistung (Motorrad) <input type="checkbox"/> ≤ 1.000 km <input type="checkbox"/> 1.001 km - 5.000 km <input type="checkbox"/> 5.001 km - 10.000 km <input type="checkbox"/> 10.001 km – 15.000 km <input type="checkbox"/> > 15.000 km	Fahrrountine <input type="checkbox"/> täglich <input type="checkbox"/> mehrmals wöchentlich <input type="checkbox"/> 1 - 4 mal pro Monat <input type="checkbox"/> 1 - 11 mal pro Jahr <input type="checkbox"/> weniger als 1 mal im Jahr	Nutzung des Motorrads <input type="checkbox"/> Stadtverkehr <input type="checkbox"/> Freizeit <input type="checkbox"/> Landstraße <input type="checkbox"/> Arbeit <input type="checkbox"/> Autobahn <input type="checkbox"/> Transport <small>Hauptsächlichste Nutzung ankreuzen - Mehrfachauswahl möglich</small>
Marke (z.B. Honda)¹ <div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%;"></div>	Modell (z.B. CB 600F) <div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%;"></div>	Baujahr (z.B. 2007) <div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%;"></div>
<p>¹ Angabe zum eigenen Motorrad</p>		
BASt Projekt – SVEN – Fragebogen Teil I		1 von 5

¹¹¹ Scheid, K.: SA, Subjektivbewertung von Notbremsversuchen (2018).

FZD Probandenstudie – Projekt „SVEN“



Probandennummer:

Datum:



II Fahrversuch

Im folgenden Fahrversuch wird das Abstandsverhalten von Motorradfahrern während einer Folgefahrt untersucht. Dazu folgen Sie auf dem Motorrad dem Versuchsfahrzeug „EVITA“ auf der Teststrecke. In der Heckscheibe befindet sich eine Ampel, die den Abstand zwischen Motorrad und „EVITA“ anzeigt. Die Ampel zeigt mit den drei Farben rot (Abstand zu gering), grün (Abstand korrekt) und blau (Abstand zu groß) den momentanen Abstand an. Ihre Aufgabe wird es sein, dem Fahrzeug zu folgen und dabei dafür zu sorgen, dass Sie sich immer möglichst an der Grenze zwischen „grün“ und „blau“ bewegen.

Signalerläuterung:



Aufgabenstellung: *Versuchen Sie dem Fahrzeug auf der Geraden im richtigen Abstand zu folgen (Ampel grün, an der Grenze zu blau) und diesen Abstand auch einzuhalten.*



FZD Probandenstudie – Projekt „SVEN“



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Probandennummer:

Datum:



FZD
FAHRZEUGTECHNIK
TU DARMSTADT

II Fahrversuch

Während des Fahrversuchs wurde bewusst ein automatisches Bremsmanöver eingeleitet. Für die Notbremsung war es erforderlich, dass der Proband unvorbereitet ist, damit er die Situation unvoreingenommen subjektiv bewerten kann.

Bitte geben Sie im Folgenden eine subjektive Bewertung der Kontrollierbarkeit des Bremsmanövers ab. Geben Sie die Bewertung auf der angegebenen Skala von 0 bis 10 ab.

nicht kontrollierbar	10	Objektiver oder subjektiver Verlust der Kontrolle
gefährlich	9	Der Eingriff war gefährlich und kritisch – er war nicht mehr tolerierbar
	8	
	7	
unangenehm	6	Der Eingriff war unangenehm und erforderte einen deutlichen kompensatorischen Aufwand – dieser war aber noch tolerierbar/vertretbar
	5	
	4	
harmlos	3	Der Eingriff war harmlos und hatte keine bzw. leichte Auswirkungen auf die Kontrolle des Motorrads
	2	
	1	
nichts bemerkt	0	

Beschreiben Sie bitte kurz die Notbremssituation. Gab es besondere Auswirkungen auf die Stabilität oder die Kontrolle des Motorrads? Wie haben sie reagiert? Was war die größte Herausforderung?

Wie sind Sie auf die Notbremsung des Motorrads aufmerksam geworden?

FZD Probandenstudie – Projekt „SVEN“



Probandennummer:

Datum:



III Abschließende Beurteilung

Vielen Dank für die Teilnahme am Fahrversuch. Im Folgenden möchten wir Sie noch zu Ihrer Beurteilung von Fahrerassistenzsystemen und automatischen Notbremssystemen im Motorrad befragen. Bitte geben Sie auf der 6-stufigen Skala an, wie sehr Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Fahrerassistenzsysteme im Motorrad sind z.B.: ABS, Navigation, Traktionskontrolle.

Fahrerassistenzsysteme im Motorrad sind wichtig.	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Weiß ich nicht
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Automatische Notbremssysteme (im Folgenden nur **ANB Systeme**) im Motorrad sollen eine Kollision frühzeitig erkennen und bremsen das Fahrzeug **ohne den Eingriff des Fahrers** automatisch ab. Dadurch sollen die Auswirkungen eines Unfalls vermindert oder sogar eine Kollision verhindert werden. Der Fahrer muss dabei das Motorrad kontrollieren und stabilisieren. Bitte bewerten Sie im Folgenden ein potientiell serien-taugliches ANB System.

ANB Systeme im Motorrad unterstützen die Fahraufgabe.	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Weiß ich nicht
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

ANB Systeme erhöhen die Verkehrssicherheit auf dem Motorrad.	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Weiß ich nicht
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

ANB Systeme können zu gefährlichen Situationen führen.	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Weiß ich nicht
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fahren mit einem ANB System macht das Motorradfahren langweilig.	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Weiß ich nicht
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

FZD Probandenstudie – Projekt „SVEN“


 TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Probandennummer:

Datum:



III Fortsetzung: Abschließende Beurteilung

	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Weiß ich nicht
<i>ANB Systeme erhöhen den Fahrspaß.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Weiß ich nicht
<i>Ich kann mich auf das ANB System verlassen.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Weiß ich nicht
<i>Ich vertraue darauf, dass das ANB System in meinem Interesse handelt.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Weiß ich nicht
<i>Beim Kauf eines Motorrads wäre ein ANB System ein Auswahlkriterium für mich.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Nun folgen noch Aussagen zur Auslegung von automatischen Notbremssystemen.

	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Weiß ich nicht
<i>ANB Systeme sollen eine Abschaltfunktion besitzen.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Weiß ich nicht
<i>Das Motorrad soll mich vor einer Notbremsung warnen.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Weiß ich nicht
<i>Wenn ich wüsste, dass ein ANB System eingebaut ist, könnte ich den Eingriff besser kontrollieren.</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

A.3 Studienergebnisse

A.3.1 Expertenstudie

Tabelle A-1: Zusammenfassung Expertenversuche *Blockprofil*

Probanden-ID	Ausgangs- geschwindigkeit (soll) in km/h	Ausgangs- geschwindigkeit (ist) in km/h	Erreichter Bremsdruck in bar	Erreichte Verzögerung in m/s^2	Zumutbarkeit	Kontrollierbar- keit	Beschreibung der Notbremssituation
1	70	62,79	13,72	-2,47	✓	1	kein großer Unterschied zur Rampenfunktion spürbar
	70	62,86	25,45	-4,51	✓	1	durchaus zumutbar; Stabilität 1A; deutlich angenehmer als Rampenfunktion
	70	63,2	31,82	-6,08	(✓)	2	alles Gut, versucht weich zu sitzen (Schenkeldruck), Stabilität vorhanden, Gas offen gelassen
	45	42,4	30,64	-6,09	✓	1	gefällt besser als vorher (Block besser als Rampe)
	90	80,27	35,81	-6,74	✗	1	Mit Beinen arbeiten; deutlicher Druck am Lenker; Beine geklammert um Bremskraft abzufangen
	90	80,21	23,06	-4,69	✓	1	
2	70				✓	3	Proband war überrascht, ist eingenickt, Knie genutzt um Spannung zu erzeugen
	70	62,38	13,97	-2,54	✓	1	Gas wird kurz stehen gelassen, Finger gehen reflexartig nach vorne (an Kupplung und Bremse → Wachmacher); Beine gehen zusammen (Klammern); Körperspannung wird erhöht; Stabilität weiterhin vorhanden
	70	62,67	18,95	-3,78	✓	2	sanfte Bremsung durch das Bremsen am Hinterrad; Motorrad taucht durch Hinterradbremse hinten ein; man hat das Bedürfnis selbst zu bremsen
	70	63,26	27,31	-5,34	✓	3	schnellere Bremsung als vorher; Gas offen gelassen; Bremskraft linear; Bremsung nicht zu hart; erstaunlich wie schnell Bremsdruck aufgebaut ist; Bremsung kam härter und unerwartet
	70	61,32	33,84	-6,22	(✓)	3	war an der Grenze für den Normalfahrer
	45	40,38	30,28	-5,54	✗	3	bei geringeren Geschwindigkeiten ist die Zeit sehr kurz um zu reagieren
	45	39,39	19,2	-3,78	✓	1	zumutbar, smooth, angemessen
	90	80,65	31,42	-6,49	✓	3	das war gut beherrschbar, die hohe Geschwindigkeit sorgt für gute Bremsstabilität, subjektiv nicht gefährlich; bei niedrigen Geschwindigkeiten eher instabil
	90	78,45	36,72	-6,04	(✓)	3	"Proband begeistert"; das war gut; es kommt einem zu Gute dass man so schnell ist (hohe Stabilität, lange Zeit nachzudenken)

3	70	64,28	14,87	-2,44	✓	1	Gasstoß ist ein zusätzlicher Stressfaktor; Experte meint, in einer Stresssituation (Notbremsung) sollte man versuchen, möglichst andere Stresseinflüsse zu vermeiden
	70	62,31	21,64	-4,09	✓	1	Block ist sehr hart; besser ist ein weicherer Aufbau; würde Stress verhindern
	70	63,11	29,38	-5,28	✗	2	durch Bewusstsein, dass Bremsung eintritt entspannt;
	45	41,58	14,66	-2,47	✓	1	Experte sieht keinen großen Unterschied zur Rampe bei 45 km/h
	45	40,94	21,68	-3,87	✓	1	etwas heftiger Bremsanstieg; sanfter wäre besser; Bremsverlauf ist aber gut
	45	40,98	32,7	-5,22	✗	1	spontanes starkes Einbremsen; trauen sich nicht viele; erzeugt Stress
	90	76,67	12,71	-2,2	✓	1	relativ schwach; Aufmerksamkeit kann nachlassen, wenn man weiß, dass das Motorrad selbst bremst (gefährlich); Motorrad soll kurz vor Stillstand sanft abbremse
	90	77,49	18,95	-3,68	✓	1	es wird schwieriger, die Kontrollierbarkeit einzuschätzen; am Anfang wurde es kritischer betrachtet
	90	75,84	27,33	-5,08	✗	1	nicht vertretbar für den Normalfahrer
4	70				✓	2	"das ist klasse"
	70	64,01	15,06	-2,68	✓	2	"sehr nett "
	70	67,65	20,77	-4,07	✓	2	konstante Bremskraft angenehmer
	70	63,02	28,37	-5,37	(✓)	2	deutliche Tendenz in Richtung nicht zumutbar; schön wäre ein Warnhinweis, dass das Motorrad bremst (während der Bremsung)
	70	65,63	29,56	-5,63	✓	2	deutlicher Hinweis "Hey, bremsen!"; Warnhinweis in Bedienungsanleitung
	90	81,31	14,76	-2,67	✓	2	Gefühl, man müsste mitbremsen, weil das Motorrad selbst nicht so stark bremst; Bremsung zu schwach wenn Fahrer nicht unterstützt
	90	81	29,02	-5,67	✗	2	einem Fahrer mit weniger als 1000 km im Jahr nicht zuzumuten
	90	81	19,21	-3,67	✓	2	
	45	42,23	13,29	-2,16	✓	2	sehr moderat
	45	42,05	28,28	-4,82	✓	2	nett (hilfreich), es könnte dazu verleiten, sich darauf zu verlassen
5	70	61,77	12,25	-1,98	✓	1	
	70	63,49	18,02	-3,48	✓	1	
	70	62,27	25,91	-5	✓	1	
	70	60,97	fehlt	-5,97	✓	2	
	90	79,49	27,11	-5,35	✓	1	
	90	82,32	32,68	-6,91	✓	2	
	45	41,5	27,55	-4,89	✓	1	

Tabelle A-2: Zusammenfassung Expertenversuche *Rampenprofil*

Probanden-ID	Ausgangs- geschwindigkeit (soll) in km/h	Ausgangs- geschwindigkeit (ist) in km/h	Steigung Rampe in m/s ³	Erreichte Verzögerung in m/s ²	Zumutbarkeit	Kontrollierbar- keit	Beschreibung der Notbremssituation
1	70	63,34	-3,67	-5,41	(✓)	2	Gas offen gelassen, Kupplung nicht gezogen, lange auf den Tacho geguckt
	70	62,09	-3,93	-5,32	✓	2	angenehmer, besser als Bremsung vorher
	70	63,88	-6,17	-5,64	✓	2	wackelt nicht, Gas wird nicht mehr geöffnet sondern geschlossen
	70	61,97	-7,04	-5,53	✓	1	relativ einfach, besser als vorher, Bremsung angenehmer
	70	62,63	-8,43	-6,38	✓	2	sehr leichte Bremsung, Proband hat versucht, leicht im Oberkörper zu bleiben, Bremskraft leicht im Oberkörper aufnehmbar
	45	40,45	-3,18	-5,39	✓	2	absolut zumutbar, aber gefällt subjektiv nicht so gut wie der Block
	45	41,42	-7,68	-5,62	✓	2	marginaler Unterschied zur vorherigen Bremsung (ebenso Rampe)
	90	80,66	-4,29	-6,07	✓	2	
	90	78,06	-9,54	-6,35	✓	2	
2	70	65,58	-3,53	-5,60	✓	2	am Schluss nicht sehr stark; Erwartung: bis zum Schluss progressive Steigerung
	70	67,38	-4,21	-5,58	✓	2	sehr langsamer Aufbau der Bremsung; stabil geblieben, dadurch dass nur Hinterrad bremst
	70	61,36	-4,65	-5,68	✓	2	mehr nach meinem Geschmack; sehr angenehm; progressive Bremsung kommt einer Notbremsung näher; progressive Bremsung gefällt besser; wenn Motorradfahrer eingreift ist, System schnell an der Blockade / ABS
	70	64,89	-7,34	-5,70	✓	2	Zeit zwischen Kupplung und Bremsung zu viel; zu lang
	70	62,02	-9,09	-6,00	(✓)	3	Zeitspanne gleich; relativ starke Bremsung; händelbar aber sehr zügig
	45	40,97	-3,35	-5,55	✓	2	große Spanne zwischen Kupplung und Bremsung; es bleibt viel Zeit, um nachzudenken
	45	42,48	-7,75	-5,59	✓	2	war besser, zielführend (schnell Verzögerung aufbauen)
	90	80,80	-3,20	-5,72	✓	2	leicht händelbar; sehr viel Zeit, um zur Not mitzubremsten
90	79,55	-9,68	-5,79	✓	2	gut händelbar	
3	70	62,41	-2,71	-4,53	✓	1	Experte hat versucht, geistig woanders zu sein; Reaktion: Rumpfmuskulatur anspannen; Arme locker
	70	62,92	-6,83	-5,10	✓	2	Gewöhnungseffekt tritt ein; fühlt sich wie eine weiche Bremsung an
	45	41,64	-2,95	-5,02	✓	1	sanfter Bremsdruckaufbau; Gas stört; es macht einen Unterschied ob eine Gefahr vorliegt

	45	42,83	-7,71	-4,97	✓	1	kein großer Unterschied zur vorherigen Bremsung erkennbar; angenehme Verzögerung und gut händelbar
	90	79,57	-2,57	-2,56	(✓)	1	Experte musste sich über die Hände abstützen; man hatte Zeit sich zu überlegen, wie man reagiert
	90	78,66	-7,40	-4,64	(✓)	1	
4	70	64,05	-3,90	-5,86	✓	1	super schwach; viel zu wenig; fast irritierend; wird nicht als Bremsassistent wahrgenommen; Verlangen mitzubremesen; Rampe wird nicht wahrgenommen
	70	61,26	-4,10	-5,63	✓	2	Gas offen gelassen; starkes Bedürfnis mitzubremesen
	70	65,17	-5,43	-5,53	✓	2	angenehmer, wenn es fester bremst; Rampe spürbar; man gewöhnt sich schnell an das automatische Bremsen
	70	64,39	-9,12	-5,70	✓	2	wieder besser als die letzte Bremsung; Impuls zu bremsen deutlicher
	70	64,02	-7,62	-5,44	✓	2	bemerkt, dass Bremsdruck ansteigt
	90	80,37	-3,77	-5,54	✓	2	zunehmender Bremsdruck spürbar
	90	80,93	-1,38	-5,75	✓	2	
	45	43,14	-3,23	-5,01	✓	2	Für Notbremsung Rampe besser, auch wenn Block angenehmer ist, weil man sich besser darauf einstellen kann
	45	41,76	-6,99	-5,00	✓	2	war besser als die langsame Rampe
5	70	63,47	-3,67	-5,45	✓	1	
	70	61,66	-4,62	-5,69	✓	1	
	70	66,31	-4,92	-5,80	✓	1	
	70	65,57	-6,73	-5,69	✓	1	
	70	63,00	-11,6	-5,67	✓	1	
	90	77,63	-4,07	-5,80	✓	1	
	90	79,76	-8,72	-5,84	✓	1	
	45	40,88	-2,83	-4,76	✓	1	
	45	41,87	-8,37	-5,42	✓	1	

Tabelle A-3: Zusammenfassung Expertenversuche *Impulsprofil*

Probanden-ID	Ausgangs- geschwindigkeit (soll) in km/h	Ausgangs- geschwindigkeit (ist) in km/h	Erreichter Bremsdruck in bar	Erreichte Verzögerung in m/s ²	Zumutbarkeit	Kontrollierbar- keit	Beschreibung der Notbremssituation
1	70	62,53	15,34	-3,14	✓	1	
	70	62,27	18,36	-4,17	✓	1	Bremsruck geht spurlos an mir vorbei, Bremsruck erzeugt Körpersteifigkeit
	70	62,53	33,08	-6,06	(✓)	1	sehr leichter Bremsruck, und dadurch gefährlicher als der stärkere Bremsruck, weil es auch andere Gründe haben könnte (lag was auf der Straße?); zu lange Überlegezeit; Proband reagiert auf starken Ruck besser
	45	39,91	35,46	-7,16	✓	1	man ist direkt dabei und aufmerksam
	90	80,00	38,82	-7,74	✓	1	"geile Nummer", Wachmacher
2	70	62,32	15,82	-3,15	✓	2	harmlos, sofort Körperspannung; Proband hat versucht entspannt zu bleiben; reicht aus als Ruck
	70	62,78	21,04	-4,74	✓	3	war heftiger als der zuvor; aber dadurch dass er kurz war, ok
	70	64,57	33,27	-5,83	X	4	
	70	64,30	43,32	-7,36	X	4	wird gefährlich bei Kurvenfahrt
	45	42,54	31,97	-5,59	✓	1	guter Wachmacher; gut händelbar; nicht zu stark und nicht zu schwach
90	82,36	32,63	-5,76	✓	3	Impuls ok, deutlich mehr eher nicht	
3	70	60,67	15,01	-2,91	✓	1	sanftes Wachrütteln, aber kann verwechselt werden mit Gaswegnahme oder Fahrbahnunebenheiten; würde wahrscheinlich auch einhändig oder freihändig gehen
	70	61,14	23,14	-4,26	✓	1	deutlich besser als Impuls zuvor; markantes Signal; kein normales Signal im Fahrbetrieb - macht also aufmerksam
	70	64,47	36,13	-5,63	X	1	wenn ein Fahrer an ein solches Bremsmanöver gewöhnt ist dann ja, in der Probandenstudie nein; Reflexartig: Muskelanspannung als Reaktion; zu scharf für den Normalfahrer
	45	39,78	15,14	-1,72	✓	1	zu schwach; kann irgendwas auf der Straße sein
	45	37,86	22,76	-2,87	✓	1	viel besser als vorher; gut um zu warnen
	45	40,00	34,35	-5,29	✓	1	gut wenn die Hände am Lenker sind; wenn die Hände am Navi sind zu stark
	90	77,52	14,36	-3,49	✓	1	ganz wenig gemerkt; könnte auch was anderes sein
	90	78,65	19,04	-3,66	✓	1	angenehm; absolute Warnsignalfunktion; stört aber nicht und keine Verwechslung mit sonstigen Einflüssen
90	77,20	28,66	-4,78	(✓)	1	Impuls könnte einen Moment länger sein; wird aber dann einen Schreck hervorrufen	

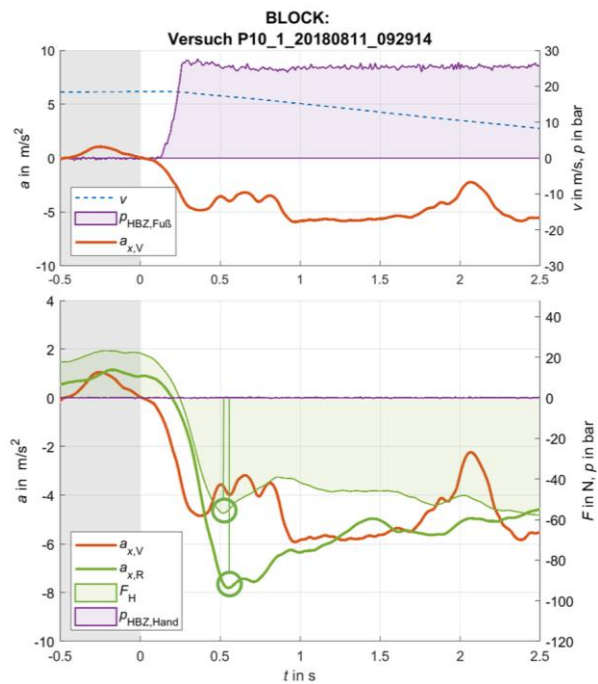
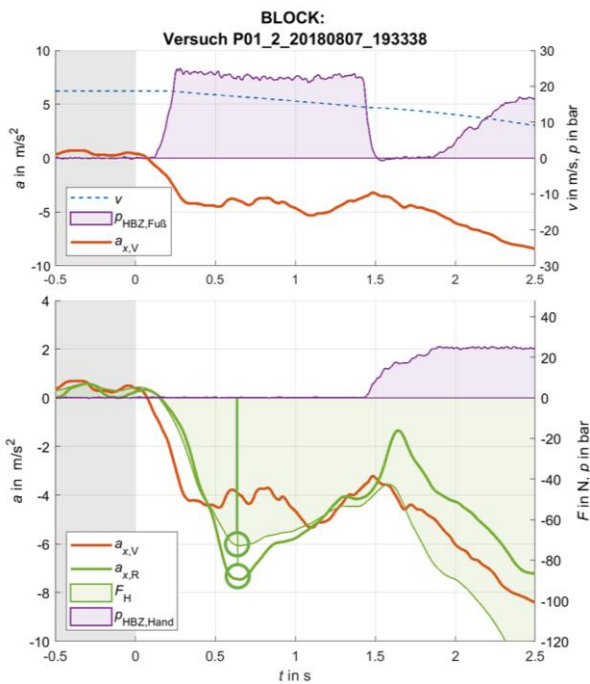
4	70	63,47	15,07	-2,11	✓	4	stört (Vorstellung in städtischem Verkehr); Aufmerksamkeit wird abgelenkt, Signal schwierig zu deuten; Signal nicht klar → entweder bremsen oder nicht; unangenehm
	70	62,52	22,54	-4,28	(✓)	4	intensiverer Impuls weniger störend; hat eher Hinweischarakter
	70	60,58	34,84	-5,66	(✓)	4	hilfreich; aber weniger hilfreich als konstante Bremsung; erzeugt Schreckmoment beim Normalfahrer → mögliche Fehlbedienung; generell nicht überzeugt vom Impuls
	90	83,02	12,49	-2,16	✓	4	störend, kein Hinweischarakter, aber besser als bei 70 km/h
	90	82,04	18,19	-4,26	X	5	sehr unangenehm, aber eher weil es störend ist; händelbar aber trotzdem unangenehm
	90	79,86	26,64	-5,04	(✓)	4	bringt einen aus dem Konzept
	45	42,29	13,89	-1,92	✓	3	immer noch störend
	45	39,96	30,40	-4,43	(✓)	3	für jemanden mit einer Fahrleistung unter 1000 km im Jahr unzumutbar
5	70	66,46	13,62	-2,77	✓	0,5	
	70	64,54	21,63	-4,47	✓	1	
	70	60,19	30,40	-4,58	✓	1	
	90	82,17	19,55	-5,25	✓	1	
	90	81,29	32,49	-6,89	(✓)	1	
	45	40,76	15,75	-1,86	✓	1	
	45	40,13	22,33	-4,58	✓	1	
	45	39,94	30,95	-5,48	✓	1	

A.3.2 Probandenstudie 1

Blockprofil

Tabelle A-4: Zusammenfassung Probandenstudie 1, *Blockprofil*

Probanden-ID	Erreichte Verzögerung in m/s^2	Ende Verzögerungsaufbau (Fahrzeug) in s	Ende Verzögerungsaufbau (Fahrer) in s	Ende Lenkerkraftaufbau in s	Kontrollierbarkeit	Beschreibung der Notbremssituation
1	4,50	0,52	0,66	0,65	2	leicht nach links gezogen
10	4,84	0,38	0,55	0,52	2	Vorne was bewegt; Motorrad hat gebremst; angenehm abgebremst, kein Kontrollverlust, Stabilität behalten;
11	5,36	0,53	0,74	0,71	3	Kupplung rutscht durch? Kein Gas mehr angenommen; alles stabil, dachte Motorrad kaputt, Kupplung gezogen, wollte nicht, dass es ausgeht, keine Panik bekommen
14	4,47	0,42	0,54	0,52	3	Viel angenehmer, weil er wusste was passiert → nicht so stark, sehr stabil, Kupplung gezogen
17	4,16	0,34	0,46	0,48	4	



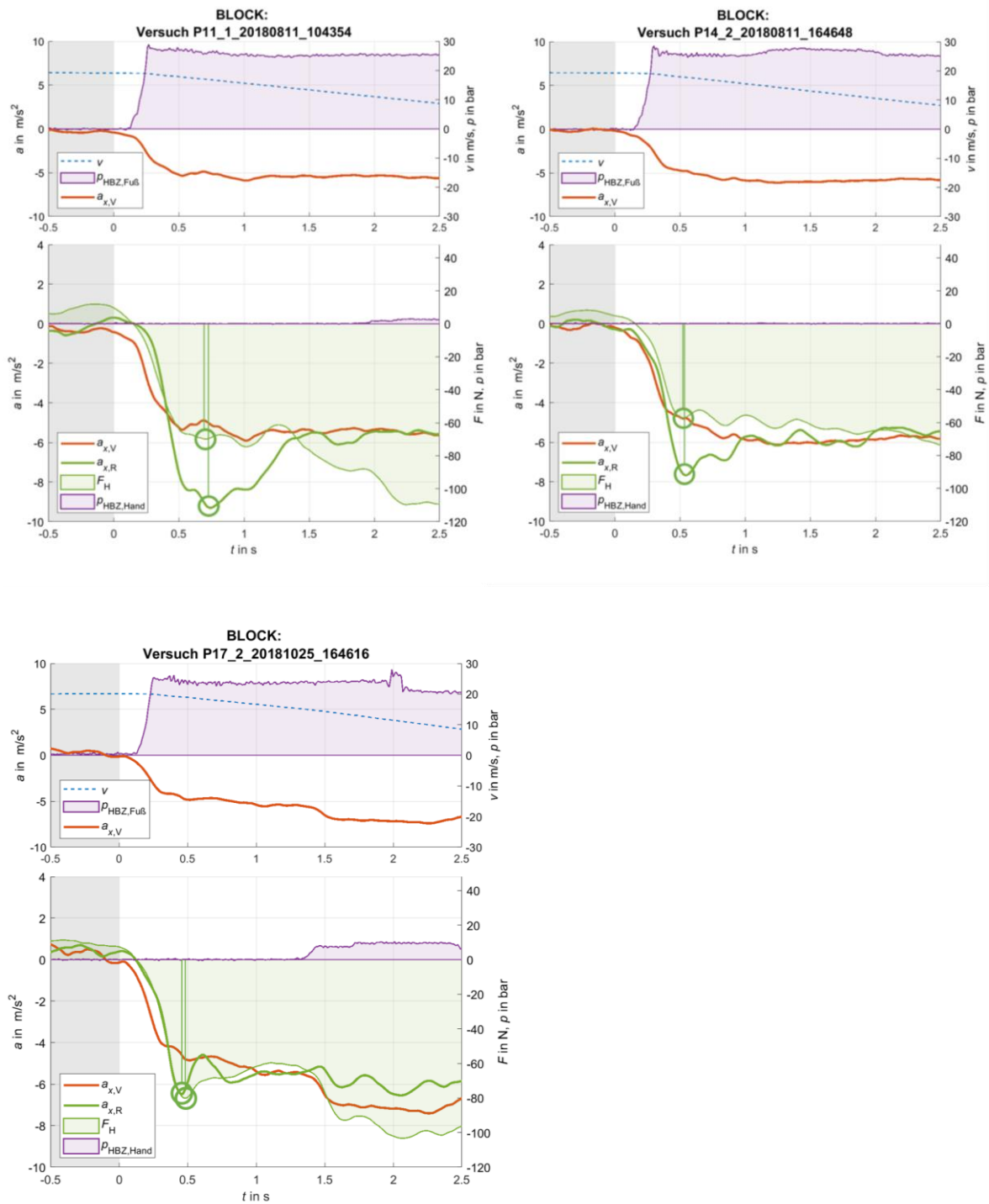
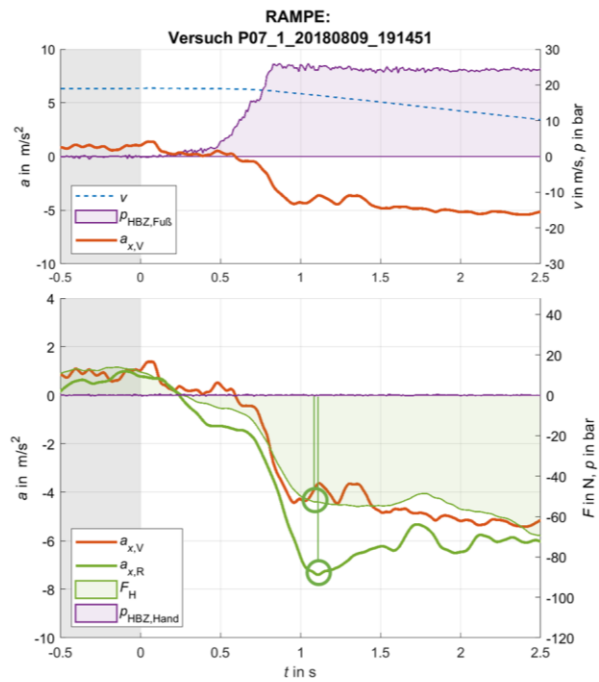
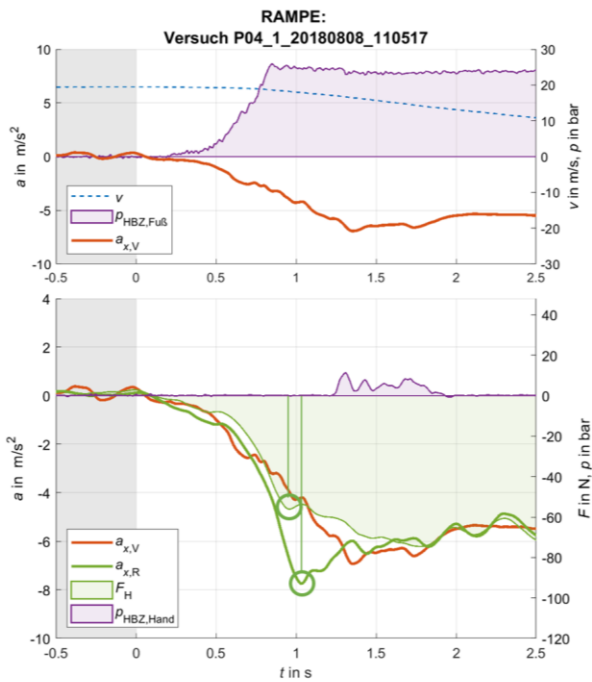


Abbildung A-5: Aufgezeichnete Messdaten der *Blockbremsungen* in der ersten Probandenstudie

Rampenprofil

Tabelle A-5: Zusammenfassung Probandenstudie 1, *Rampenprofil*

Probanden-ID	Erreichter Verzögerungsgradient in m/s^3	Ende Verzögerungsaufbau (Fahrzeug) in s	Ende Verzögerungsaufbau (Fahrer) in s	Ende Lenkerkraftaufbau in s	Kontrollierbarkeit	Beschreibung der Notbremssituation
4	8,15	1,35	1,03	0,96	6	Erstaunlich stabil; Gesamtsituation sehr belastend, überfordernd; Versuch zu analysieren, was das Motorrad abbremst
7	9,63	0,96	1,11	1,09	4	hat irgendwie gebremst, reflexartig Kupplung gezogen, überlegt, ob Kupplung kaputt ist, Zugkraft war weg, Motor kaputt, hat nicht so stark gewirkt, wie bei normaler Bremsung
8	10,45	0,99	1,11	1,06	1	dachte erst, es wäre etwas kaputt, nicht erschrocken, war relativ sanft, spurtreu
12	10,20	1,13	1,05	1,04	2	wurde laut, hat gebremst; ein bisschen weniger Kontrolle, Herausforderung: Hinten drauf fahren?
18	10,84	0,94	1,03	1,04	4	



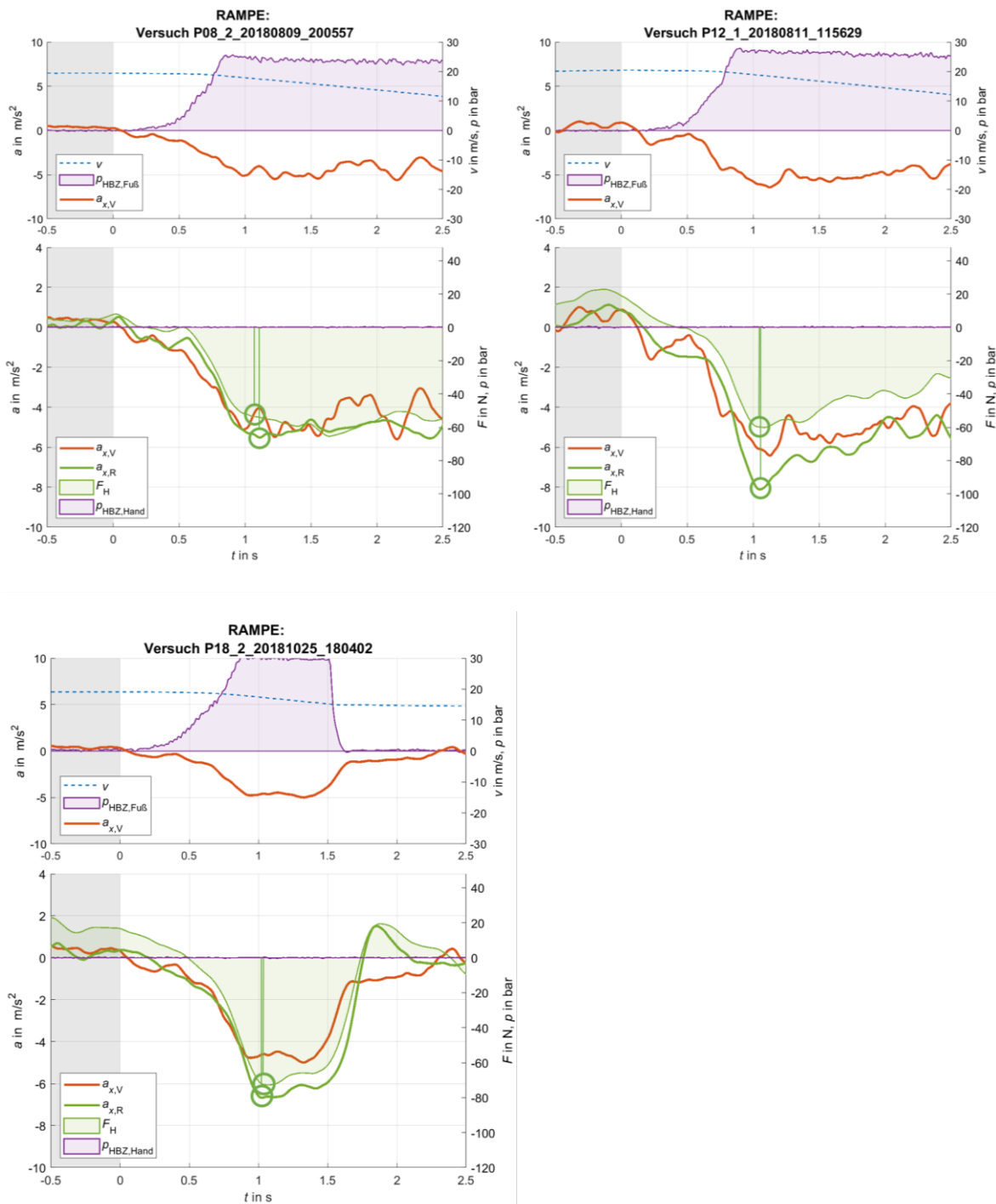
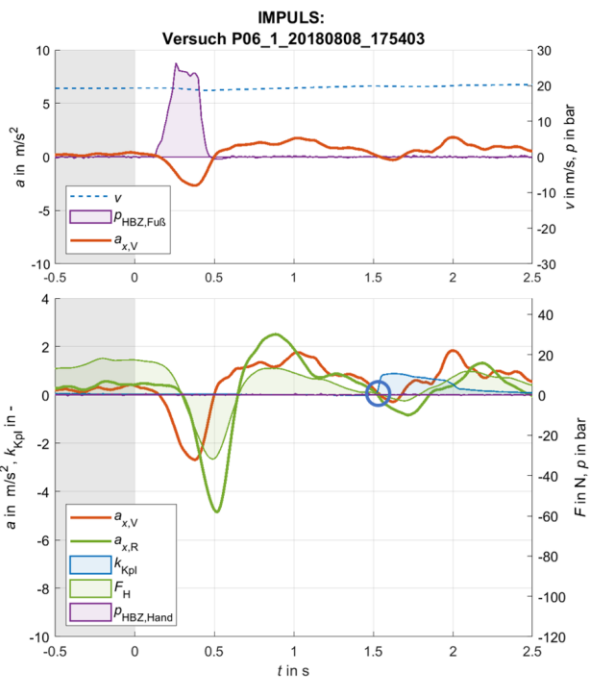
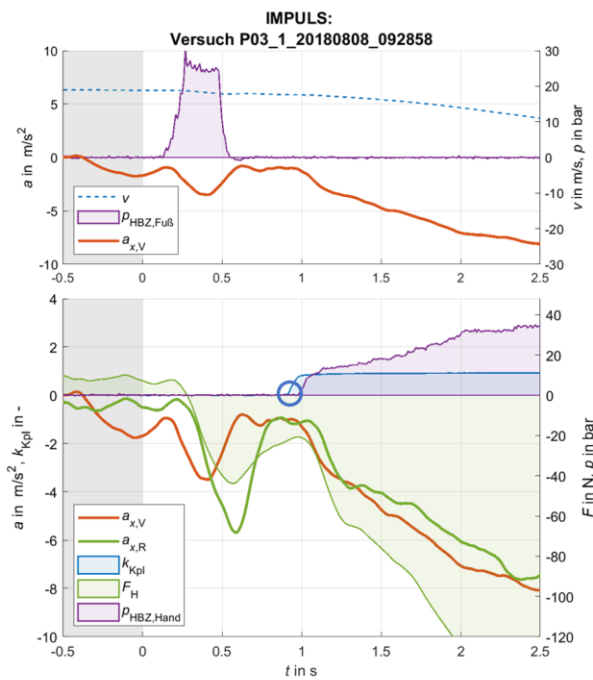


Abbildung A-6: Aufgezeichnete Messdaten der *Rampenbremsungen* in der ersten Probandenstudie

Impulsprofil

Tabelle A-6: Zusammenfassung Probandenstudie 1, *Impulsprofil*

Probanden-ID	Erreichte Verzögerung in m/s^2	Zeitpunkt max. Verzögerung (Fahrzeug) in s	Zeitpunkt Kupplungs-betätigung in s	Beginn Bremsdruck-aufbau in s	Kontrollierbar-keit	Beschreibung der Notbremssituation
3	3,49	0,41	0,92	0,99	4	Motorrad hat gebremst, dann EVITA bremsen gesehen, hätte schneller selbst abgebremst; erst nachgesehen, was das Motorrad macht; eher unangenehm; hat aufgeweckt
6	2,68	0,38	1,53	2,95	4	zweimal kurz gebremst, man wusste, es stimmt etwas nicht. Dann normale Bremsung → es ist etwas nicht in Ordnung; Lenker fester in die Hand genommen
9	3,55	0,36	1,86	1,84	3	Nicht damit gerechnet; es war etwas ungewöhnlich, nicht außer Kontrolle; erst gewartet, dann gebremst; gemerkt es wird langsamer; Bremsen bis Stillstand
11	3,59	0,37	1,19	1,28	3	selbst gebremst (Motorrad hat wenig gebremst), Stabilität normal, ist etwas ausgewichen
15	5,30	0,49	0,92	1,39	6	



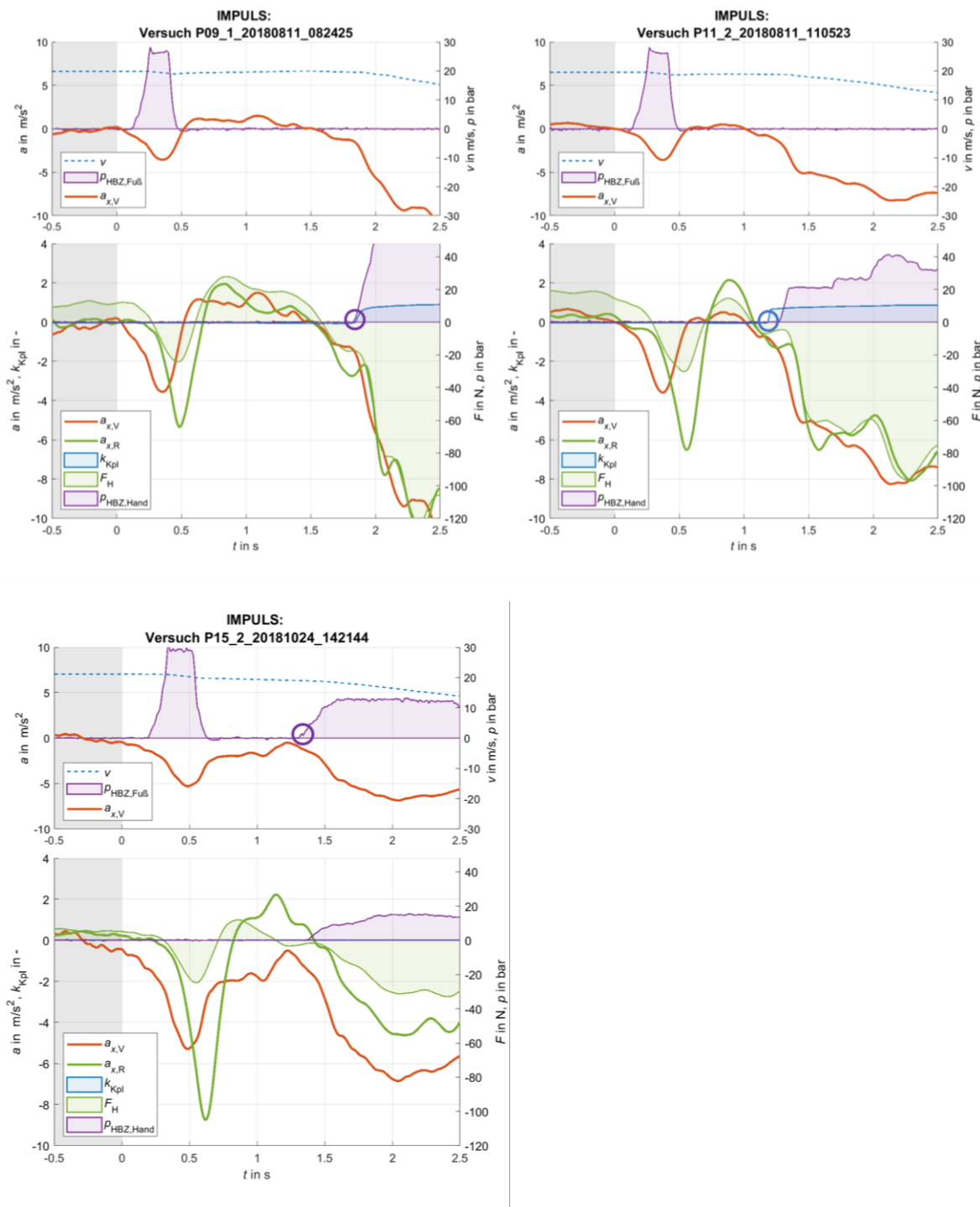
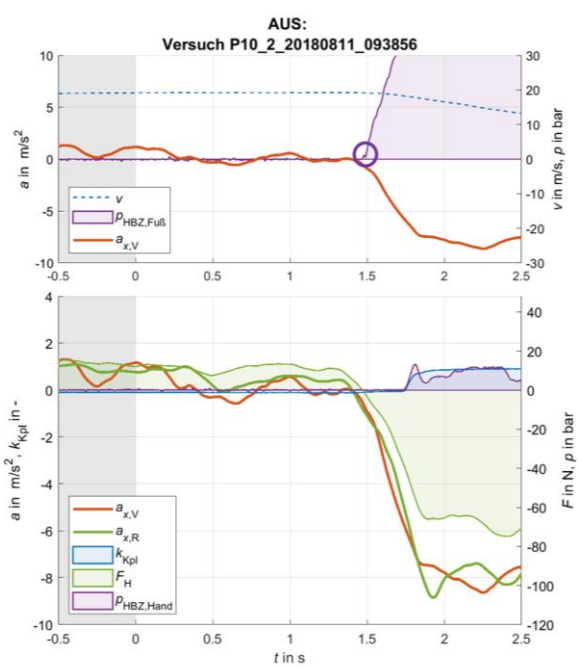
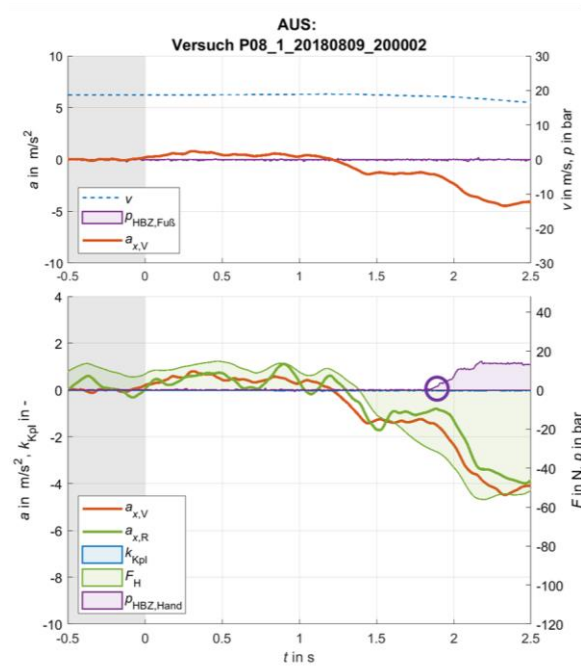


Abbildung A-7: Aufgezeichnete Messdaten der Impulsbremsungen in der ersten Probandenstudie

Referenz (kein Eingriff)

Tabelle A-7: Zusammenfassung Probandenstudie 1, Referenzmanöver

Probanden-ID	Erreichte Verzögerung in m/s^2	Ende Verzögerungsaufbau (Fahrzeug) in s	Zeitpunkt Kupplungs-betätigung in s	Beginn Bremsdruck-aufbau in s	Kontrollierbarkeit	Beschreibung der Notbremssituation
8	4,478	2,33		1,87	fehlt	
10	7,453	1,87	1,76	1,75	1	Er war aufmerksamer, hat selbst gebremst um Abstand zu halten
12	5,415	0,52	3,11	0,32	2	er hat Anhänger verloren, musste bremsen, keine Stabilitäts- und Kontrollprobleme. Herausforderung: Abstand halten während Bremsen
16	9,11	2		1,59	5	



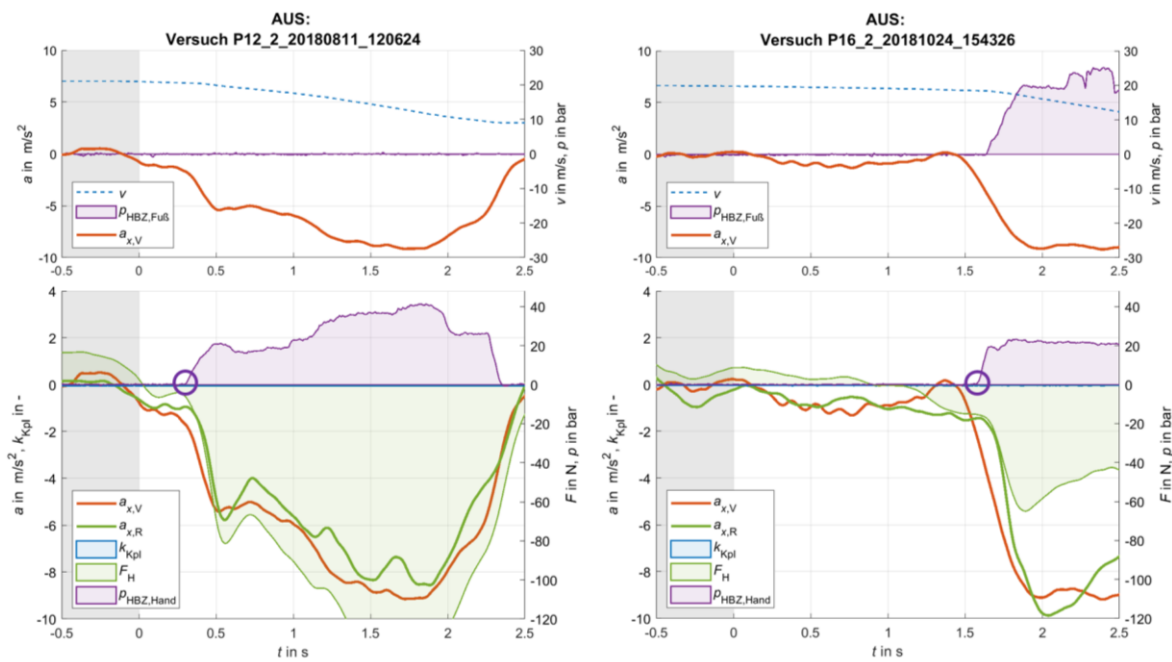


Abbildung A-8: Aufgezeichnete Messdaten der Referenzbremsungen in der ersten Probandenstudie

A.3.3 Probandenstudie 2

Tabelle A-8: Zusammenfassung Probandenstudie 2, automatische Bremsengriffe

Probanden-ID	Ausgangsgeschwindigkeit (ist) in km/h	Erreichte Verzögerung in m/s^2	Zeit bis Nickratenmaximum in s	Zeit bis max. Kraftanstiegsrate in s	Kontrollierbarkeit	Beschreibung der Notbremssituation
1	68,85	-4,05	0,27	0,24	4	keine Auswirkung auf Stabilität, kurzer Schreckmoment; Reaktion: primär Kupplung mitbekommen
2	68,06	-4,74	0,27	0,21	3	(wie wenn der Motor ausgegangen wäre); richtige Bremsung, noch Kontrolle, stabil bis zum Schluss
3	70,78	-4,66	0,37	0,22	5	hat gebremst, Gas nicht weggenommen
4	67,84	-8,38 ¹¹²	0,28 ¹¹²	0,15	5	Reaktion: bremsen; wegen tiefstehender Sonne Kopf evtl. nach vorne geneigt
5	70,00	-4,76	0,29	0,19	5	unangenehm, keine Herausforderung
6	66,38	-4,47	0,34	0,21	3	Keine Herausforderung, "huch"
7	67,66	-4,54	0,26	0,24	4	keine Herausforderung für Fahrzeugstabilität; Wegfall der Kontrolle über das Fzg ist unangenehm
8	69,82	-3,95	0,39	0,25	6	Keine Auswirkung auf Stabilität
9	<i>Ausfall der Messtechnik</i>				4	Was ist passiert? - Stau; Reaktion: mitgebremst
10	<i>Ausfall der Messtechnik</i>				3	Motorrad hat gebremst, überraschend, dass das Motorrad bremst
11	66,78	-2,95	0,26	0,26	2	wie Auffahrunfall, Motorrad hat mitgebremst; sehr sanft
12	58,68	-4,82	0,33	0,33	6	Motorrad hat gebremst, erschreckend, nicht damit gerechnet
13	68,01	-4,99	0,30	0,30	3	Bremsung progressiv
14	70,24	-4,01	0,43	0,43	3	Anhänger löst sich, überraschendes Hindernis, Kupplung ziehen, bremsen

¹¹² Fahrer hat selbst mitgebremst

Tabelle A-9: Zusammenfassung Probandenstudie 2, manuelle Bremsenriffe

Probanden-ID	Ausgangsgeschwindigkeit (ist) in km/h	Zeit bis Nickratenmaximum in s	Zeit bis max. Kraftanstiegsrate in s	Kontrollierbarkeit	Beschreibung der Notbremssituation
1	67,90	0,23	0,19	4	tadellos funktioniert
2	69,13	0,25	0,17	3	"Gefahrenbremsung" ist schon unangenehm, aber noch gut händelbar
3	70,20	0,22	0,17	6	EVITA kam näher, deutlicher Eingriff nötig, obwohl unbekanntes Motorrad ok
4	69,15	0,39	0,25	5	gedacht, es reicht nicht aus; Stabilität ok, ungewohntes Bremsgefühl im Gegensatz zu eigenem Fzg
5	66,92	0,95	0,21	7	<i>[kritische Bewertung]</i> weil kein Bremslicht
6	69,06	0,48	0,42	1	
7	69,56	0,37	0,24	3	
8	67,75	0,27	0,22	2	
9	Ausfall der Messtechnik			2	das Unangenehme ist die Erinnerung an die Situation vorher; gehnt, dass vorne gebremst wird
10	Ausfall der Messtechnik			3	genug Verzögerung; vergessen, Kupplung zu ziehen
11	63,72	0,46	0,31	3	man wusste, dass es irgendwann kommt; bisschen härtere Bremsung
12	64,76	0,43	0,28	4	kam nicht überraschend
13	69,29	0,36	0,25	2	
14	67,74	0,21	0,15	3	

A.4 Ethik

A.4.1 Freigabe Probandenstudie 1

EINGEGANGEN
13. Sep. 2018



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Technische Universität Darmstadt | Karolinenplatz 5 | 64289 Darmstadt

Herrn
Professor Hermann Winner
Fachbereich Maschinenbau

L1 | 01 – im Hause

Ihr Antrag EK 32/2018: Automatische Notbremssysteme für Motorräder

Sehr geehrter Herr Kollege Winner,

haben Sie Dank für Ihren Antrag vom 07.08.2018. Die Ethikkommission hat diesen eingehend erörtert. Er schildert ein komplexes Vorhabensdesign, das einen – auch angesichts der geplanten Geschwindigkeiten – insgesamt risikoreichen Fahrversuch beschreibt. Die Kommission hat mehrere Punkte erörtert:

- Welche Schutzkleidung tragen die Fahrer/innen? Damit die Schutzkleidung der Versuchspersonen ein garantiertes Sicherheitsniveau aufweist, sollte diese, so die Sicht der Kommission, von Seiten der TU gestellt werden.
- Eine Sturzgefahr ist bei dem Versuch gegeben. Die Ethikkommission bittet um Angaben dazu, wie die Versuchspersonen im Falle eines Sturzes und/oder der Beschädigung von Ausrüstungsgegenständen versichert sind.
- Vor Beginn des Experiments müssen Herz-Kreislauf-Erkrankungen bei den Versuchspersonen ausgeschlossen werden. Geben Sie uns bitte an, wie Sie vorgehen möchte, um das sicherzustellen.
- Bei der Durchführung der Bremsversuche sollte eine Person mit Ersthelfer-Ausbildung anwesend sein.
- Ergänzend sei der Hinweis erlaubt, dass entgegen der Angabe auf der Checkliste bei dem Versuch sehr wohl Gefahrenstoffe im Einsatz sind (Benzin, Motoröl). Die Kommission geht davon aus, dass diesbezügliche Schutz- und Vorsichtsmaßnahmen eingehalten werden. Bitte beachten Sie in künftigen Fällen die Relevanz der betreffenden Frage im Formular.

Die Ethikkommission spricht sich außerdem – nicht nur aus Risikogründen – dagegen aus, unerfahrene Fahrer in die Studie einzubeziehen.

Zum einen ist ein Gefahrenpotential durch das Auslösen automatischer Bremsvorgänge gegeben; wie hoch die Sturzgefahr „unerfahrener“ Personen ist, lässt sich in dieser Situation aber nicht bewerten (dies hat seinen Grund auch darin, dass die Kategorie „unerfahren“ ein ganzes Spektrum von fehlenden Kompetenzen erfassen könnte).

Prof. Dr. Petra Gehring
Vorsitzende der Ethikkommission

Karolinenplatz 5
64289 Darmstadt

Tel. +49 6151 16 - 57333
Fax +49 6151 16 - 57488
gehring@phil.tu-darmstadt.de

12.09.2018

Seite: 1/13

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Zum anderen ist auf Basis des Antrages nicht ersichtlich, warum es wissenschaftlich geboten ist, auch „unerfahrene“ Fahrer einzubeziehen. Der Fahrertyp „unerfahren“ wird bei insgesamt nur 20 Versuchspersonen (von denen die Hälfte „erfahren“ sein soll) nur eine sehr geringe und vermutlich sehr heterogene Personenzahl umfassen. Eine Aussage über „unerfahrene“ Personen (als Gruppe) erscheint so gar nicht möglich. Anders gesagt: Brauchbare (Positiv-) Ergebnisse über das Verhalten/die Risiken dieses unbestimmt definierten Personenkreises dürfte durch den geplanten Versuch nicht zu gewinnen sein. In einem solchen Fall aber ist es auch nicht vertretbar, die unerfahrenen Personen dem Risiko des Fahrversuchs auszusetzen.

Die Ethikkommission spricht mit den oben genannten Auflagen ein positives Votum für die Durchführung der Studie mit erfahrenen Fahrer/innen aus. Den Einsatz von unerfahrenen Fahrer/innen lehnt die Ethikkommission jedoch ab.

Wir freuen uns über eine Rückmeldung zur Einhaltung der Auflagen bis spätestens 5.12., dann stellen wir Ihnen gern ein endgültiges positives Votum für den Fahrversuch mit erfahrenen Fahrer/innen aus.

Die Ethikkommission wünscht für die geplanten Forschungen viel Erfolg.

Mit freundlichem Gruß

Prof. Dr. Petra Gehring, Vorsitzende der Ethikkommission

EINGEGANGEN
20. Dez. 2018



Technische Universität Darmstadt | Karolinenplatz 5 | 64289 Darmstadt

Herrn
Professor Hermann Winner
Fachbereich Maschinenbau

LI|01 – im Hause

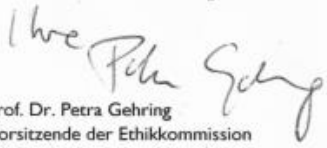
Ihr Antrag EK 32/2018: Automatische Notbremssysteme für Motorräder

Sehr geehrter Herr Kollege Winner,

haben Sie Dank für Ihre Stellungnahme vom 30. November 2018 im Nachgang zu Ihrem Antrag vom 07. August 2018.

Aufgrund der von Ihnen mitgeteilten Erläuterungen und Änderungen sind die im Votum der Ethikkommission vom 12. September 2018 ausgesprochenen Auflagen erfüllt.

Mit freundlichem Gruß und guten Wünschen für Ihre Forschungen


Prof. Dr. Petra Gehring
Vorsitzende der Ethikkommission

Prof. Dr. Petra Gehring
Vorsitzende der Ethikkommission

Kontakt über:
Geschäftsstelle der Ethikkommission
Dr. Sebastian Hartmann

Karolinenplatz 5
64289 Darmstadt

Tel. +49 6151 16-20543
ethikkommission@tu-darmstadt.de

18.12.2018

A.5 Freigabe Probandenstudie 2

EINGEGANGEN
20. Sep. 2019 *Wi → Me*

 TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Technische Universität Darmstadt | Karolinenplatz 5 | 64289 Darmstadt

Herrn
Professor Dr. Hermann Winner
Fachbereich Maschinenbau

LI|01 403- im Hause

Ihr Antrag EK 39/2019: Projekt PIONEERS (Protective Innovations of New Equipment for Enhanced Rider Safety)

Sehr geehrter Herr Kollege Winner,
haben Sie Dank für Ihren Antrag vom 03.09.2019.

Die Ethikkommission hat den Antrag eingehend erörtert. Das Vorhaben ist gut beschrieben und erscheint in allen relevanten Details umsichtig geplant.

Einziger Punkt: Es fehlen Angaben zu den vorgesehenen Fahrgeschwindigkeiten. Die Kommission geht in diesem Punkt davon aus, dass bei der Studie im Wesentlichen ähnliche Höchstgeschwindigkeiten wie bei den im Antrag EK 32/2018 beschriebenen Fahrversuchen verwendet werden.

Die Ethikkommission bedankt sich für den gut ausgearbeiteten Antrag und erteilt ein positives Votum. Wir wünschen Ihnen für Ihre Forschungen viel Erfolg.

Mit freundlichem Gruß

Prof. Dr. Petra Gehring
Vorsitzende der Ethikkommission

Prof. Dr. Petra Gehring
Vorsitzende der Ethikkommission

Kontakt über:
Geschäftsstelle der Ethikkommission
Dr. Sebastian Hartmann

Karolinenplatz 5
64289 Darmstadt

Tel. +49 6151 16 - 20543
ethikkommission@tu-darmstadt.de

19.09.2019

Seite: 1/1

Literaturverzeichnis

Basten, T.: BaTh, Messung der Oberkörperbewegung (2018)

Basten, Tilman: Entwicklung eines Systems zur Messung der Oberkörperbewegung von Motorradaufsassen während Notbremsmanövern, Bachelorthesis Nr. 1305/17, Technische Universität Darmstadt, 2018

BMW Group: BMW ACC Pressematerial (2020)

BMW Group: BMW Motorrad Active Cruise Control (ACC);
<https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0309885DE/die-neue-bmw-motorrad-active-cruise-control-acc?language=de>, 2020, Zugriff 23.08.2021

Braun, H.; Ihme, J.: Definition kritischer Situationen (1983)

Braun, H.; Ihme, J.: Definition kritischer Situationen im Kraftfahrzeugverkehr - Eine Pilotstudie, in: Automobil Industrie (3), S. 367–375, 1983

Brockmann, M.: Code of Practice (2009)

Brockmann, Martin: Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS;
<http://www.acea.be/publications/article/code-of-practice-for-the-design-and-evaluation-of-adas>, 2009, Zugriff 17.11.2021

Chung, D.: Honda MAEB Patent (2017)

Chung, Dennis: Honda Patents Automatic Emergency Braking Technology;
<https://www.motorcycle.com/manufacture/honda/honda-patents-automatic-emergency-braking-technology.html>, 2017, Zugriff 23.08.2021

Continental Teves AG & Co.oHG: Abstandsregeltempomat (2021)

Continental Teves AG & Co.oHG: Intelligenter Abstandsregeltempomat;
<https://www.continental-automotive.com/DE/2-Wheeler/Safe-Mobility/ARAS/Adaptive-Cruise-Control>, 2021, Zugriff 23.08.2021

DEKRA: Verkehrssicherheitsreport Motorrad 2010 (2010)

DEKRA Automobil GmbH: Verkehrssicherheitsreport Motorrad 2010, Stuttgart, 2010

Euro NCAP: Autonome Notbremssysteme (2020)

Euro NCAP: 2013 Autonome Notbremssysteme Tests | Euro NCAP;
<https://www.euroncap.com/de/fahrzeugsicherheit/sicherheitskampagnen/2013-autonome-notbremssysteme-tests/>, 2020, Zugriff 27.02.2020

Europäisches Parlament: EU-Verordnung 168/2013 (2013), Europäisches Parlament Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen, 15. Januar 2013

Fecher, N. et al.: EVITA (2015)

Fecher, Norbert; Hoffmann, Jens; Winner, Hermann: EVITA - Das Prüfverfahren zur Beurteilung von Antikollisionssystemen, in: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Fonck, K.-H.: Radar bremst bei Gefahr (1955)

Fonck, K.-H.: Radar bremst bei Gefahr, in: Auto, Motor & Sport (22), S. 30, 1955

Ginther, B. et al.: Harley MAEB Patent (2018)

Ginther, Brian; Miller, Cindy A.; Rasmussen, Matthew D.: Saddle-ride vehicle with autonomous braking and method of operating same, Patent US 10,029,683, Patent Anmeldenummer: 15/415,107, 2018

Giovannini, F. et al.: Minimum swerving distance for MAEB (2013)

Giovannini, Federico; Savino, Giovanni; Pierini, Marco; Baldanzini, Niccolò: Analysis of the minimum swerving distance for the development of a motorcycle autonomous braking system, in: Accident Analysis and prevention, Jahrgang 59, S. 170–184, 2013

Graham, R.: Auditory Icons (1999)

Graham, Robert: Use of auditory icons as emergency warnings: evaluation within a vehicle collision avoidance application, in: Ergonomics (9), Jahrgang 42, S. 1233–1248, 1999

Grant, R. et al.: PISa (2008)

Grant, Rachel; Frampton, Richard; Peldschus, Steffen; Schuller, Erich; St.Clair, Vincent; McCarthy, Michael; Babu, Rengarajan; Pierini, Marco; Savino, Giovanni: PISa - Powered two-wheeler Integrated Safety. Project objectives, achievements and remaining activities, in: Institut für Zweiradsicherheit e.V. (Hrsg.): ifz Forschungsheft Nr. 13 - Tagungsband der 7. Internationalen Motorradkonferenz, Köln, 2008

Green, M.: How Long Does It Take to Stop? (2000)

Green, Marc: How Long Does It Take to Stop?, in: Transportation Human Factors (3), Jahrgang 2, S. 195–216, 2000

Hans, S. et al.: Motorradsicherheit durch Automatisierung (2018)

Hans, Stefan; Köbe, Markus; Prokop, Günther: Warum Automatisierung die Zukunft der Motorradsicherheit ist!, in: Institut für Zweiradsicherheit e.V. (Hrsg.): ifz Forschungsheft Nr. 18 - Tagungsband der 12. Internationalen Motorradkonferenz, Köln, 2018

Hellmann, A.: Motorrad-Messfahrten (2014)

Hellmann, Adrian: Untersuchung zur Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Motorrad-Messfahrten im Realverkehr, Darmstadt, 2014

Hoffmann, J.: Diss., EVITA (2008)

Hoffmann, Jens: Das Darmstädter Verfahren (EVITA) zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2008

Honda Deutschland: Honda Moto Riding Assist (2017)

Honda Deutschland: Honda Moto Riding Assist;
<https://www.honda.de/motorcycles/experience-honda/news-and-events/2017-01-27-honda-moto-riding-assist.html>, 2017, Zugriff 23.08.2021

Hummel, T. et al.: Ermittlung des Sicherheitspotentials (2011)

Hummel, Thomas; Kühn, Matthias; Bende, Jenö; Lang, Antje: Fahrerassistenzsysteme, Forschungsbericht / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. FS, Fahrzeugsicherheit / Unfallforschung der Versicherer, Jahrgang 03, GDV, Berlin, 2011

Institut für Zweiradsicherheit e.V.: ifz Forschungsheft Nr. 14 (2010)

Institut für Zweiradsicherheit e.V. (Hrsg.) ifz Forschungsheft Nr. 14 - Tagungsband der 8. Internationalen Motorradkonferenz, 2010

Institut für Zweiradsicherheit e.V.: ifz Forschungsheft Nr. 17 (2016)

Institut für Zweiradsicherheit e.V. (Hrsg.) ifz Forschungsheft Nr. 17 - Tagungsband der 11. Internationalen Motorradkonferenz, 2016

Institut für Zweiradsicherheit e.V.: ifz Forschungsheft Nr. 18 (2018)

Institut für Zweiradsicherheit e.V. (Hrsg.) ifz Forschungsheft Nr. 18 - Tagungsband der 12. Internationalen Motorradkonferenz, 2018

Kopischke, S.: Diss., Entwicklung einer Notbremsfunktion (2000)

Kopischke, Stephan: Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2000

KTM Sportmotorcycle GmbH: Super Adventure Pressematerial (2021)

KTM Sportmotorcycle GmbH: Out Now: The New KTM 1290 Super Adventure S Launches a New Era of Engineering Mastery and Performance-Focused Technology; <https://media.ktm.com/assetbank-ktm/action/viewAsset?id=374642&index=1&total=18&view=viewSearchItem>, 2021

Kühn, M.; Hannawald, L.: Verkehrssicherheit und Potentiale von FAS (2015)

Kühn, Matthias; Hannawald, Lars: Verkehrssicherheit und Potenziale von Fahrerassistenzsystemen, in: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Kuschefski, A. et al.: Bremsen oder Ausweichen (2016)

Kuschefski, Achim; Haasper, Matthias; Vallese, André: Bremsen oder Ausweichen? Oder sogar Beides?, in: Institut für Zweiradsicherheit e.V. (Hrsg.): ifz Forschungsheft Nr. 17 - Tagungsband der 11. Internationalen Motorradkonferenz, Köln, 2016

Magiera, N. et al.: Schätzung der Fahrfertigkeiten (2016)

Magiera, N.; Janssen, H.; Heckmann, M.; Winner, H.: Ein Ansatz zur Schätzung der Fahrfertigkeiten – Überblick über Methoden und Ergebnisse, in: Institut für Zweiradsicherheit e.V. (Hrsg.): ifz Forschungsheft Nr. 17 - Tagungsband der 11. Internationalen Motorradkonferenz, Köln, 2016

Merkel, N. L. et al.: MAEB Expertenstudie (2018)

Merkel, Nora L.; Pleß, Raphael; Scheid, Konstantin; Winner, Hermann: Einsatzgrenzen automatischer Notbremsysteme für Motorisierte Zweiräder - eine Expertenstudie, in: Institut für Zweiradsicherheit e.V. (Hrsg.): ifz Forschungsheft Nr. 18 - Tagungsband der 12. Internationalen Motorradkonferenz, Köln, 2018

Merkel, N. L. et al.: Abschlussbericht BASt MAEB (2022)

Merkel, Nora L.; Pleß, Raphael; Winner, Hermann; Hammer, Thomas; Schneider, Norbert; Will, Sebastian: Automatische Notbremsysteme für Motorräder - Abschlussbericht zum Projekt FE 82.0661/2015, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe F: Fahrzeugtechnik (147), Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, Bremen, 2022

Merkel, N. L.; Winner, H.: Measures for Rider's Adaption (2019)

Merkel, Nora L.; Winner, Hermann: Measures for the Evaluation of Riders' Adaption to the Changing Vehicle State during Autonomous Emergency Braking Maneuvers on Motorcycles, in: BMD Conference Committee (Hrsg.): Proceedings of the 2019 Bicycle and Motorcycle Dynamics Conference, University of Padova, 2019

Merkel, N. L.; Winner, H.: Characteristic Rider Reactions (2020)

Merkel, Nora L.; Winner, Hermann: Characteristic Rider Reactions to Autonomous Emergency Braking Maneuvers on Motorcycles, in: Institut für Zweiradsicherheit e.V. (Hrsg.): ifz Forschungsheft Nr. 19 - Tagungsband der 13. Internationalen Motorradkonferenz, Köln/Online, 2020

Neukum, A. et al.: ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten (2008)

Neukum, A.; Lübbecke, T.; Krüger, H.-P.; Mayser, C.; Steinle, J.: ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen, in: Maurer, M.; Stiller, C. (Hrsg.): 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme - FAS2008, Karlsruhe, 2008

Neukum, A.: Beherrschbarkeit fehlerhafter Eingriffe (2015)

Neukum, A.: Beherrschbarkeit fehlerhafter Eingriffe in die Fahrzeugquerdynamik, in: Kompaß, K. (Hrsg.): Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit, Haus der Technik Fachbuch, expert verlag, Renningen, 2015

Neukum, A.; Krüger, H.-P.: Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen (2003)

Neukum, A.; Krüger, H.-P.: Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien, in: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn, VDI-Berichte Nr. 1791, Düsseldorf, 2003

Pfeiffer, C.: Motorrad-Notbremsassistent (2019)

Pfeiffer, Christian: Mehr Sicherheit mit Motorrad-Notbremsassistent, in: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift (9), Jahrgang 121, S. 64–69, 2019

Pleß, R. et al.: Manöverumsetzung auf Motorrad Fahrsimulator (2016)

Pleß, Raphael; Will, Sebastian; Hofmann, Marius; Winner, Hermann: Manöverumsetzung auf einem dynamischen Motorrad Fahrsimulator, in: Institut für Zweiradsicherheit e.V. (Hrsg.): ifz Forschungsheft Nr. 17 - Tagungsband der 11. Internationalen Motorradkonferenz, Köln, 2016

Reschka, A. et al.: Entwicklungsprozess von FVCX (2015)

Reschka, Andreas; Rieken, Jens; Maurer, Markus: Entwicklungsprozess von Kollisionsschutzsystemen für Frontkollisionen: Systeme zur Warnung, zur Unfallschwereminderung und zur Verhinderung, in: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Robert Bosch GmbH: Radarbasierte Assistenzsysteme (2020)

Robert Bosch GmbH: Radar-basierte Assistenzsysteme; <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/assistenzsysteme/radarbasierte-assistenzsysteme-2rad/>, 2020, Zugriff 23.08.2021

Roll, G. et al.: Effectiveness of ABS for Motorcycles (2009)

Roll, Georg; Hoffmann, Oliver; König, Jens: Effectiveness Evaluation of Antilock Brake Systems (ABS) for Motorcycles in Real-World Accident Scenarios, in: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) (Hrsg.): The 21st ESV Conference Proceedings, Stuttgart, Germany, 2009

Roll, G.; Hoffmann, O.: Sicherheitsgewinn durch Bremsenregelsysteme (2010)

Roll, Georg; Hoffmann, Oliver: Untersuchung des Sicherheitsgewinns durch elektronische Bremsenregelsysteme in Einspurfahrzeugen, in: Institut für Zweiradsicherheit e.V. (Hrsg.): ifz Forschungsheft Nr. 14 - Tagungsband der 8. Internationalen Motorradkonferenz, Köln, 2010

Savino, G. et al.: ITS development, implementation and testing (2010)

Savino, Giovanni; Pierini, Marco; Grant, Rachel; Frampton, Richard; Talbot, Rachel; Peldschus, Steffen; Schuller, Erich; Oudenhuijzen, Aernout; Pauwelussen, Jasper; Scheepers, Bart; Teerhuis, Arjan; Karanam Venkata, Mangaraju; Babu, Rengarajan; Roessler, Bernd; Nanetti, Matteo; Guggia, Roberto; McCarthy, Michael; Hulshof, Wesley: PISa - Powered two-wheeler Integrated Safety. Development, implementation and testing of PTW integrated safety systems, in: Institut für Zweiradsicherheit e.V. (Hrsg.): ifz Forschungsheft Nr. 14 - Tagungsband der 8. Internationalen Motorradkonferenz, Köln, 2010

Savino, G. et al.: Decision logic of MAEB (2012)

Savino, Giovanni; Pierini, Marco; Baldanzini, Niccolò: Decision logic of an active braking system for powered two wheelers, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering (8), Jahrgang 226, S. 1026–1036, 2012

Savino, G. et al.: Acceptability of unexpected decelerations (2016)

Savino, Giovanni; Pierini, Marco; Thompson, Jason; Fitzharris, Michael; Lenne, Michael G.: Exploratory field trial of motorcycle autonomous emergency braking (MAEB):, in: Traffic injury prevention (8), Jahrgang 17, S. 855–862, 2016

Scheid, K.: SA, Subjektivbewertung von Notbremsversuchen (2018)

Scheid, Konstantin: Entwicklung einer Methodik zur subjektiven Bewertung von automatischen Notbremsungen auf dem Motorrad im Probandenversuch, Studienarbeit Nr. 1320/18, Technische Universität Darmstadt, 2018

Schröter, K. et al.: Bremslenkmomentoptimierte Kurvenbremsung (2013)

Schröter, Kai; Wallisch, Michael; Weidele, Alois; Winner, Hermann: Bremslenkmomentoptimierte Kurvenbremsung von Motorrädern, in: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift (5), Jahrgang 115, S. 436–443, 2013

Schröter, K. et al.: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder (2015)

Schröter, Kai; Pleß, Raphael; Seiniger, Patrick: Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder, in: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle bis 2018 (2019)

Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle - Zeitreihen 2018; <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-zeitreihen-pdf-5462403.html>, 2019, Zugriff 10.07.2019

Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle bis 2020 (2021)

Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle - Zeitreihen 2020; <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-zeitreihen-pdf-5462403.html>, 2021, Zugriff 30.11.2021

Symeonidis, I. et al.: Stability of PTW riders (2012)

Symeonidis, Ioannis; Kavadarli, Gueven; Erich, Schuller; Graw, Matthias; Peldschus, Steffen: Analysis of the stability of PTW riders in autonomous braking scenarios, in: Accident Analysis and prevention (49), S. 212–222, 2012

Wiesbeck, W.: Radar Systems Engineering (2009)

Wiesbeck, Werner: Radar Systems Engineering - Vorlesungsskript WS 2009/2010, 2009

Winner, H.: Grundlagen von Frontkollisionsschutzsystemen (2015)

Winner, Hermann: Grundlagen von Frontkollisionsschutzsystemen, in: Winner, Hermann et al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Winner, H. et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme (2015)

Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages: Lkw-Auffahrunfälle auf BAB (2016)

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages: Vermeidung von LKW-Auffahrunfällen auf Bundesautobahnen durch Notbremssysteme, 2016, Zugriff 05.04.2020

Xsens: MTw Awinda User Manual (2018)

Xsens: MTw Awinda User Manual;

https://www.xsens.com/hubfs/Downloads/Manuals/MTw_Awinda_User_Manual.pdf, 2018, Zugriff 11.11.2019

Yamaha Motor Co., Ltd.: What is Motobot? (2015)

Yamaha Motor Co., Ltd.: What is Motobot?; https://global.yamaha-motor.com/design_technology/technology/motobot/, 2015, Zugriff 23.08.2021

Eigene Veröffentlichungen

- Merkel, N.; Pleß, R.; Scheid, K., Winner, H.:** Einsatzgrenzen automatischer Notbremsysteme für motorisierte Zweiräder – eine Expertenstudie, In: 12. Internationale Motorradkonferenz, Köln, 2018
- Merkel, N.; Pleß, R.; Winner, H., Hammer, T.; Schneider, N.; Will, S.:** Tolerability of Unexpected Autonomous Emergency Braking Maneuvers on Motorcycles – A Methodology for Experimental Investigation, In: Conference on the Enhances Safety of Vehicles (ESV), Eindhoven, Niederlande, 2019
- Merkel, N.; Winner, H.:** Measures for the Evaluation of Riders' Adaption to the Changing Vehicle State during Autonomous Emergency Braking Maneuvers on Motorcycles, In: Symposium on Bicycle and Motorcycle Dynamics, Padua, Italien, 2019
- Merkel, N.; Pleß, R.; Winner, H.; Hammer, T.; Schneider, N.; Will, S.:** Automatische Notbremssysteme für Motorräder - Abschlussbericht zum Projekt FE 82.0661/2015, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe F: Fahrzeugtechnik (147), Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, Bremen, 2022
- Merkel, N.; Winner, H.:** Characteristic Rider Reactions to Autonomous Emergency Braking Maneuvers on Motorcycles, In: 13. Internationale Motorradkonferenz, Köln, 2020
- Pleß, R.; Büttner A.; Merkel N. und Winner, H.:** Einfluss der Fahrerbewegung auf Realfahrzeug und Motorradsimulator, In: 12. Internationale Motorradkonferenz, Köln, 2018
- Wiegemann, S.; Fecher, N.; Merkel, N.; Winner, H.:** Automatic Heat Crack Detection of Brake Discs on the Dynamometer, EB2016-SVM-057, In: Eurobrake 2016, Mailand, Italien, 2016
- Winner, H.; Merkel, N.:** Mode-Confusion und Inkompatibilitäten in der Migrationsphase des automatisierten Fahrens, In: Winner, H.; Bruder, R. (Hrsg.): (Wie) Wollen wir automatisiert fahren?, 8. Darmstädter Kolloquium „mensch + fahrzeug“, S. 53-64, Darmstadt, 2017

Betreute studentische Arbeiten

Basten, Tilman: Entwicklung eines Systems zur Messung der Oberkörperbewegung von Motorradaufsassenden während Notbremsmanövern. Bachelorthesis Nr. 1305/17, 2018.

Becker, Dennis; Berger, Stefan Arnd; Bergmann, Tim; Müller, Lina Andrea; Schott, Caroline: Entwurf eines Auslegersystems zur Sturzvermeidung an einem Messmotorrad. Advanced Design Project Nr. 90/17, 2017.

Betschinske, Daniel; Haas, Julia; Hackelbörger, Stefan; Lausch, Maximilian: Erweiterung eines Messkonzepts zur Messung der Oberkörperbewegung von Motorradfahrern im Fahrversuch. Advanced Design Project Nr. 117/19, 2019.

Bopp, Christian; Dechant, Simon; Elbaek, Erik; Henke, Tilman; Lotz, Markus; Völzel, Constantin: Finalisierung der Konstruktion und Fertigungsunterlagen des Advanced Abrasion Resistance Tester. Advanced Design Project Nr. 93/17, 2017.

Eggert, Lukas; Holzmann, Hendrik; Pfliegensdörfer, Felix; Weiler, Henrik Paul: Konstruktion einer Schutzhaube des „Advanced Abrasion Resistance Tester“ (AART). Advanced Design Project Nr. 85/16, 2017.

Gleibs, Thomas; Hecht, Matthias; Schmidt-Rose, Nikolaus; Weber, Rico; Wallenborn, Michael: Inbetriebnahme von EVITA und Messmotorrad zur Durchführung automatischer Notbremsversuche. Advanced Design Project Nr. 95/17, 2017.

Haas, Sebastian: Leistungssteigerung und Evaluierung eines Externen Bremsaktors an einem Messmotorrad. Bachelorthesis Nr. 1303/17, 2018.

Kraft, Michael: Entwicklung eines Herstellungsprozesses von Prüffahrbahnen des Abriebprüfstandes nach dem Darmstädter Verfahren für Schutzkleidungsprüfung. Masterthesis Nr. 635/16, 2017.

Parthey, Franziska: Durchführung und Auswertung von Motorrad-Referenzmanövern in Real- und Simulatorfahrt. Bachelorthesis Nr. 1329/18, 2019.

Scheid, Konstantin: Entwicklung einer Methodik zur subjektiven Bewertung von automatischen Notbremsungen auf dem Motorrad im Probandenversuch. Studienarbeit Nr. 1320/18, 2018.

Walther, Lukas: Entwurf Pseudokritischer Testmanöver für den Motorradfahrversuch. Masterthesis Nr. 717/16, 2019.