



WHZ Westsächsische
Hochschule Zwickau
Hochschule für Mobilität

Diplomarbeit

Untersuchung des Einflusses eines radarbasierten Kollisionswarnsystems auf das Reaktions- und Bremsverhalten eines Motorradfahrers in einer defi- nierten Gefahrensituation

eingereicht an der Fakultät Kraftfahrzeugtechnik der

Westsächsischen Hochschule Zwickau

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: cand. ing. Körner, Oliver geb. am: 23.07.2001

Studiengang: Kraftfahrzeugtechnik

Studienschwerpunkt: Instandhaltung und Unfallanalyse

Ausgegeben von: Prof. Dr. Klaus-Dieter Brösdorf

Erstbetreuer: Prof. Dr. Klaus-Dieter Brösdorf

Zweitbetreuer: Prof. Dr.-Ing. Lutz Nagel

Autorenreferat

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit modernen Sicherheitseinrichtungen und Fahrerassistenzsystemen bei Motorrädern. Im Mittelpunkt steht die Untersuchung eines radarbasierten Kollisionswarnsystems an einer BMW R 1300 GS. Ziel der Arbeit ist es, den Einfluss eines solchen Systems auf das Brems- und Sicherheitsverhalten eines Motorradfahrers in definierten Gefahrensituationen zu betrachten.

Zu Beginn werden die Grundlagen der Motorradsicherheit, typische Risikofaktoren sowie passive und aktive Sicherheitssysteme dargestellt. Anschließend werden aktuelle Fahrerassistenzsysteme, insbesondere radarbasierte Kollisionswarnsysteme und deren Bedeutung für zukünftige Notbremsassistentensysteme, erläutert.

Im praktischen Teil der Arbeit erfolgt eine experimentelle Untersuchung unter realen Fahrbedingungen. Dabei werden verschiedene Gefahrensituationen nachgestellt und das Systemverhalten mit sowie ohne aktivem Kollisionswarnsystem betrachtet.

Die Arbeit soll einen Beitrag zur Bewertung des sicherheitstechnischen Potenzials moderner Motorradassistentensysteme leisten und mögliche Anforderungen an zukünftige motorradspezifische Notbremsassistentensysteme aufzeigen.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit in allen Teilen selbstständig angefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form in noch keiner anderen Prüfung vorgelegen hat. Mir ist bewusst, dass ich Autor der vorliegenden Arbeit bin und volle Verantwortung für den Text trage. ☒

Ich erkläre, dass ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken – dazu gehören auch Internetquellen – übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht und die entsprechenden Quellen angegeben habe. ☒

Mir ist bewusst, dass meine Arbeit auf Plagiate überprüft werden kann. Mir ist bekannt, dass es sich bei der Abgabe eines Plagiats um ein schweres akademisches Fehlverhalten handelt und dass Täuschungen nach der für mich gültigen Prüfungsordnung geahndet werden. ☒

Zusätzlich versichere ich, dass ich auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Werkzeuge nur in Absprache mit den Prüfern verwendet habe. Dabei stand meine eigene geistige Leistung im Vordergrund, und ich habe jederzeit den Prozess steuernd bearbeitet. ☒

Diese Werkzeuge habe ich im Quellenverzeichnis in der Rubrik „Übersicht verwendeter Hilfsmittel“ mit ihrem Produktnamen und einer Übersicht des im Rahmen dieser Diplomarbeit genutzten Funktionsumfangs unter Angabe der Textstelle in der Arbeit vollständig aufgeführt. ☒

Ich versichere, dass ich keine KI-basierten Tools verwendet habe, deren Nutzung die Prüfer explizit schriftlich ausgeschlossen haben. Ich bin mir bewusst, dass die Verwendung von Texten oder anderen Inhalten und Produkten, die durch KI-basierte Tools generiert wurden, keine Garantie für deren Qualität darstellt. ☒

Ich verantworte die Übernahme jeglicher von mir verwendeter maschinell generierter Passagen vollumfänglich selbst und trage die Verantwortung für eventuell durch die KI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte, fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate. ☒

Ort, Datum

Thesau, 05.08.2026

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

I	Verzeichnis der Bilder.....	VII
II	Verzeichnis der Tabellen	IX
III	Verzeichnis der Abkürzungen.....	X
IV	Verzeichnis der Kurzzeichen.....	XI
V	Verzeichnis der Formeln.....	XII
1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit und Forschungsfrage.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Theoretische Grundlagen der Motorradsicherheit.....	5
2.1	Aufbau und Fahrdynamik von Motorrädern	5
2.1.1	Einteilung der Motorräder in Deutschland.....	6
2.1.2	Fahrzeugaufbau.....	7
2.1.3	Fahrdynamische Besonderheiten gegenüber PKWs	8
2.2	Unfallgeschehen bei Motorrädern	8
2.3	Typische Unfallursachen und Risikofaktoren.....	10
3	Stand der Technik von Sicherheitssystemen.....	13
3.1	Überblick über Fahrerassistenzsysteme für Motorräder.....	16
3.2	Passive Sicherheitssysteme.....	18
3.3	Aktive Sicherheitssysteme	20
3.3.1	Antiblockiersystem - ABS.....	21
3.3.2	Inertial Measurement Units - IMU System (Trägheitsmesseinheit)	21
3.3.3	Kurven ABS	22
3.4	Wahrnehmungspsychologie und Fahrerreaktion	22
3.4.1	Wahrnehmung und Informationsverarbeitung.....	23
3.4.2	Reaktionszeit in Gefahrensituationen	24

3.4.3	Bedeutung für Fahrerassistenzsysteme	24
3.5	Fahrerassistenzsysteme bei Motorrädern	25
3.6	Kollisionswarnsysteme - Forward Collision Warning, FCW	25
3.6.1	Technische Komponenten des Kollisionswarnsystems	26
3.6.2	Radar-Sensorik als Grundlage für Fahrerassistenzsysteme	27
3.6.3	Kamerabasierte Systeme als Grundlage für Fahrerassistenzsysteme	29
3.6.4	LiDAR-Sensorik als Grundlage für Fahrerassistenzsysteme	31
3.6.5	Vergleich der Sensortechnologie für Fahrerassistenzsysteme	32
3.7	Notbremsassistenzsystem (MAEB)	33
3.7.1	Funktionsprinzip Notbremsassistenzsystem	33
3.7.2	Unterschied PKW und Motorrad Notbremsassistent	35
3.8	Bremstechnologie	36
3.8.1	Bremsverhalten Motorrad und PKW	36
3.8.2	Integralbremssystem	40
4	Experimentelle Untersuchung des Kollisionswarnsystems	41
4.1	Ziel der experimentellen Untersuchung	41
4.2	Versuchsstrategie und Versuchsmatrix	42
4.2.1	Versuchsreihe 1 – stehendes Hindernis	43
4.2.2	Versuchsreihe 2 – bewegtes Hindernis	44
4.2.3	Realversuch statt Simulation	44
5	Versuchsaufbau	45
5.1	Versuchsfahrzeug 1 - Motorrad	46
5.2	Versuchsfahrzeug 2 – PKW	48
5.3	Versuchsgelände	50
5.3.1	Versuchsgelände – Versuchsreihe 1	50
5.3.2	Versuchsgelände – Versuchsreihe 2	52
5.4	Beschreibung stehendes Hindernis	54
5.5	Beschreibung bewegtes Hindernis	55

6	Versuchsdurchführung	56
6.1	Vorbereitung vor jedem Durchlauf	57
6.2	Videodokumentation der Versuche.....	59
6.3	Versuchsdurchführung – Versuchsreihe 1	60
6.4	Versuchsdurchführung – Versuchsreihe 2.....	62
7	Auswertung der Messergebnisse	63
7.1	Vorgehensweise der Datenauswertung.....	64
7.2	Auswertung der Versuchsreihe 1	64
7.3	Auswertung der Versuchsreihe 2	65
7.3.1	Auswertung des verbleibenden Sicherheitsabstands	65
7.3.2	Bewertung des Reaktionsverhaltens	68
7.3.3	Einordnung Systemwirkung und Zusammenfassung der Ergebnisse	69
7.4	Bewertung der Hypothesen.....	70
7.5	Fehleranalyse der Messwerte	71
8	Diskussion der Versuchsergebnisse	73
8.1	Interpretation der Ergebnisse und Bewertung Sicherheitsgewinn	73
8.2	Einordnung, Übertragbarkeit und Grenzen der Untersuchung	74
8.3	Beispielhafte Bewertung des Einflusses der Bremsreaktionszeit	76
9	Bewertung des Potentials zukünftiger Notbremssysteme	78
10	Fazit und Ausblick.....	80
VI	Literaturverzeichnis	XIII
VII	Anlagenverzeichnis	XIX

I Verzeichnis der Bilder

Abbildung 1: Aufbau und Struktur der Arbeit: [Eigene Darstellung] [48]	5
Abbildung 2: Einteilung der Motorräder in Deutschland: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [7] [48]	7
Abbildung 3: Anzahl der Verunglückten bei Straßenverkehrsunfällen in Deutschland nach Art der Beteiligung von 1980 bis 2024: [10].....	9
Abbildung 4: Verunglückte und Getötete bei Unfällen mit Motorrädern in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2024: [12]	10
Abbildung 5: Abhängigkeit des Anhaltewegs von der Reaktionszeit: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [14] [48].....	12
Abbildung 6: Sicherheit des Straßenverkehrs: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [16] [49]	14
Abbildung 7: Ausgelöster Gold Wing Airbag: [21]	20
Abbildung 8: Gierrate und Schräglage am Motorrad: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [9] [48]	21
Abbildung 9: Vergleich von Sensorsystemen für Fahrassistenzsysteme: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [46] [28] [48].....	32
Abbildung 10: Motorrad Achslastverteilung: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [48] [23]	37
Abbildung 11: Motorrad und KFZ Dynamische Achslastverteilung / Bremskraftverteilung: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an: [48] [23].....	38
Abbildung 12: Lenkmoment bei der Kurvenbremsung: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [48] [23]	39
Abbildung 13: BMW R 1300 GS - Technische Merkmale: [Eigene Darstellung] [48]	46
Abbildung 14: Menüpunkt Frontkollisionswarnung BMW GS: [Eigene Darstellung] [40].....	47
Abbildung 15: Menüpunkt Frontkollisionswarnung BMW GS: [Eigene Darstellung] [40].....	47
Abbildung 16: BMW GS 1300 mit Fahrassistenz-Paket (ACC, FCW...): [Eigene Darstellung] [40]	48
Abbildung 17: Versuchsfahrzeug 2 - Technische Merkmale und Abmessungen: [Eigene Darstellung] [48]	49
Abbildung 18: Versuchsfahrzeug 2 - Mercedes Vito: [Eigene Darstellung] [40].....	49
Abbildung 19: Übersicht der geraden Teststrecken zur Durchführung des Fahrversuchs: [Eigene Darstellung] [50]	50
Abbildung 20: Überblick Draufsicht Versuchsreihe 1: [Eigene Darstellung] [49].....	51

Abbildung 21: Versuchsaufbau mit Karton als Hindernis und 5m Markierung: [Eigene Darstellung] [40]	51
Abbildung 22: Übersicht der geraden Teststrecken zur Durchführung des Fahrversuchs: [Eigene Darstellung] [50]	52
Abbildung 23: Versuchsaufbau mit Auto als Hindernis: [Eigene Darstellung] [40]	53
Abbildung 24: Überblick Draufsicht Versuchsreihe 2: [Eigene Darstellung] [49]	53
Abbildung 25: Hindernis Karton für Versuch präpariert: [Eigene Darstellung] [40]	54
Abbildung 26: Hindernis Mercedes Vito für Versuch präpariert: [Eigene Darstellung] [40]	55
Abbildung 27: Versuch mit Aktivierten FCW und rotem Symbol als Warnung für mögliche Kollision: [Eigene Darstellung] [40]	56
Abbildung 28: Gewählte Einstellung FCW bei Aktivierten Versuchsfahrten: [Eigene Darstellung] [40]	58
Abbildung 29: Gewählte Einstellung FCW bei Deaktivierten Versuchsfahrten: [Eigene Darstellung] [40]	58
Abbildung 30: Versuchsfahrer mit Kameraperspektive aus Fahrersicht: [Eigene Darstellung] [40]	59
Abbildung 31: Versuch mit eingezogenem Hindernis und Bremsung ohne FCW bis zum Stillstand: [Eigene Darstellung] [40]	60
Abbildung 32: Versuch mit anschließendem Ausweichen vor Hindernis: [Eigene Darstellung] [40]	61
Abbildung 33: Versuchsaufbau Fahrerperspektive mit eingehaltenem Abstand vor Bremsversuch: [Eigene Darstellung] [40]	62
Abbildung 34: Versuchsfahrt mit Auto als bewegtes Hindernis 6m voraus: [Eigene Darstellung] [40]	63
Abbildung 35: Versuchsreihe 2 als Säulendiagramm dargestellt: [Eigene Darstellung].	66
Abbildung 36: Beispielhafte Kollisionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Bremsreaktionszeit bei 50 km/s: [Eigene Darstellung]	77

II Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Übersicht Auswahl an Fahrerassistenzsystemen: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [1]	Seite: 17
Tabelle 2:	Versuchsmatrix: [Eigene Darstellung]	Seite: 43
Tabelle 3:	Gemessener verbleibender Abstand zwischen Versuchsfahrzeug 1 und 2: [Eigene Darstellung]	Seite: 66
Tabelle 4:	Statistische Kennwerte des verbleibenden Sicherheitsabstandes: [Eigene Darstellung]	Seite: 67
Tabelle 5:	Kollisionsgeschwindigkeit bei 50 km/h: [Eigene Darstellung]	Seite: 77

III Verzeichnis der Abkürzungen

Begriff	Erläuterung
ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control (Adaptiver Abstandsregeltempomat)
AEB	Autonomous Emergency Braking
AEBS	Autonomous Emergency Braking System
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
ASR	Antischlupfregelung
DEKRA	Deutscher Kraftfahrzeug-Überwachungs-Verein
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ESR	Electronically Scanning Radar
EU	Europäische Union
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
FCW	Front Collision Warning
FeV	Fahrerlaubnis Verordnung
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
IMU	Inertial Measurement Unit
LiDAR	Light Detection and Ranging
LRR3	Long Range Radar 3. Generation
PKW	Personenkraftwagen
Radar	Radio Detection and Ranging
RDKS	Reifendruckkontrollsystem
TCS	Traction Control System (Traktionskontrolle)
TTC	Time to Collision
UN	United Nations

IV Verzeichnis der Kurzzeichen

Kurzzeichen	Einheit	Erläuterung
a	m/s ²	Verzögerung / Beschleunigung
α	°	Erfassungswinkel des Sensors
f	GHz	Sende-/Empfangsfrequenz des Radarsensor
l	cm	Gemessene Längen
	m	Gemessene Längen
m	kg	Masse
P	kw	Leistung
λ	nm	Wellenlänge LiDAR-Laserimpulse
s _A	m	Anhalteweg
s _R	m	Reaktionsweg
s _{Schw}	m	Schwellweg
s _B	m	Bremsweg
t	s	Zeit
t _R	s	Reaktionszeit
t _{Schw}	t	Schwellzeit
T	°C	Temperatur
v	km/h	Versuchsgeschwindigkeit
	m/s	Versuchsgeschwindigkeit

V Verzeichnis der Formeln

Nummerierung	Erläuterung
1	Anhalteweg
2	Mittelwert
3	Standartabweichung
4	Differenz der Mittelwerte
5	Prozentuale Veränderung
6	Anhalteweg vereinfacht
7	Bremsweg separiert
8	Kollisionsgeschwindigkeit

1 Einleitung

Die Sicherheit von Motorradfahrern stellt seit vielen Jahren eine besondere Herausforderung im Straßenverkehr dar. Aufgrund der einspurigen Fahrdynamik, der fehlenden schützenden Fahrzeugstruktur und der hohen Verletzungsgefahr bei Unfällen besitzen Maßnahmen zur Unfallvermeidung im Motorradbereich eine besondere Bedeutung. Während passive Schutzmaßnahmen wie Helm und Schutzkleidung die Folgen eines Unfalls reduzieren können, zielen moderne aktive Sicherheitssysteme und Fahrerassistenzsysteme zunehmend darauf ab, kritische Situationen frühzeitig zu erkennen und Unfälle möglichst zu vermeiden. Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Untersuchung eines radarbasierten Kollisionswarnsystems an einem modernen Serienmotorrad. Dabei wird analysiert, inwieweit ein solches System das Brems- und Sicherheitsverhalten eines Motorradfahrers in definierten Gefahrensituationen beeinflussen kann. Die Arbeit verbindet hierzu eine theoretische Betrachtung aktueller Sicherheitssysteme mit einem experimentellen Realversuch.

Die nachfolgenden Unterkapitel beschreiben zunächst die Problemstellung, die Zielsetzung sowie den Aufbau der Arbeit.

1.1 Problemstellung und Motivation

Motorräder zählen trotz ihres vergleichsweise geringen Anteils am Gesamtverkehr zu den risikoreichsten motorisierten Verkehrsmitteln. Nach Angaben des Statistischen Bundesamt sind Motorradfahrer im Straßenverkehr überproportional häufig in schwere Unfälle verwickelt. Während Krafträder nur einen geringen Anteil am gesamten Verkehrsaufkommen ausmachen. So zeigen aktuelle Unfallstatistiken, dass Motorradfahrer ein fünfmal höheres Risiko tragen, bei einem Unfall schwer oder tödlich verletzt zu werden. [2]

Zu den Hauptursachen zählen neben infrastrukturellen und verkehrsbedingten Einflüssen insbesondere menschliche Faktoren wie Fehleinschätzungen, überhöhte Geschwindigkeit sowie verzögerte Reaktionen in kritischen Situationen. Darüber hinaus verfügen Motorräder im Vergleich zu Pkw über keine schützende Fahrzeugstruktur, wodurch die passive Sicherheit erheblich eingeschränkt ist. [3]

Die Vermeidung von Unfällen stellt daher die zentrale Herausforderung im Bereich der Motorradsicherheit dar. Insbesondere die Reduktion von Reaktionszeiten in Gefahrensituationen spielt hierbei eine entscheidende Rolle.

Im Automobilbereich haben sich Fahrerassistenzsysteme in den letzten Jahren als wirksames Mittel zur Erhöhung der Verkehrssicherheit etabliert. Systeme wie Notbremsassistenten und Spurhalteassistenten tragen nachweislich zur Reduktion von Auffahrunfällen bei, obwohl die Zahl der Fahrzeuge in Deutschland stetig steigt. [4] [5]

Die Übertragung solcher Systeme auf Motorräder ist jedoch mit erheblichen technischen Herausforderungen verbunden. Die fahrdynamischen Besonderheiten, insbesondere die einspurige Bauweise, sowie die Abhängigkeit von Schräglage und Stabilität, erschweren automatisierte Bremseingriffe erheblich. Ein unkontrollierter Eingriff in die Bremsanlage kann im schlimmsten Fall zum Sturz führen.

Vor diesem Hintergrund gewinnen vorgelagerte Systeme wie Kollisionswarnsysteme zunehmend an Bedeutung. Diese unterstützen den Fahrer durch frühzeitige Warnungen vor potenziellen Kollisionen, ohne aktiv in die Fahrzeugdynamik einzugreifen. Dadurch können sie die Reaktionszeit des Fahrers verkürzen und somit einen Beitrag zur Unfallvermeidung leisten. [6]

1.2 Zielsetzung der Arbeit und Forschungsfrage

Ziel dieser Arbeit ist die experimentelle Untersuchung des Einflusses eines radarbasierten Kollisionswarnsystems auf das Reaktions- und Bremsverhalten eines Motorradfahrers in einer definierten Gefahrensituation.

Hierzu wird ein realer Fahrversuch auf einem abgesperrten Testgelände durchgeführt, bei dem das Verhalten des Fahrers mit und ohne Unterstützung durch ein Kollisionswarnsystem analysiert wird. Im Mittelpunkt stehen dabei insbesondere die Reaktionszeit sowie der resultierende Anhalteweg.

Auf Basis der gewonnenen Messergebnisse soll eine Bewertung des sicherheitstechnischen Potenzials solcher Systeme erfolgen. Darüber hinaus wird untersucht, inwieweit sich aus den Ergebnissen Rückschlüsse auf zukünftige Notbremsassistentensysteme für Motorräder ableiten lassen.

Aus der dargestellten Problemstellung ergibt sich folgende zentrale Forschungsfrage:

Welchen Einfluss hat ein radarbasiertes Kollisionswarnsystem auf die Reaktionszeit und den Anhalteweg von Motorradfahrern in einer definierten Gefahrensituation im realen Fahrversuch, und welches sicherheitstechnische Potenzial ergibt sich daraus für zukünftige Notbremsassistentensysteme?

Zur Beantwortung dieser Fragestellung werden folgende Hypothesen formuliert:

- H1: Der Einsatz eines Kollisionswarnsystems verkürzt die Zeitspanne bis zur Einleitung der fahrerseitigen Bremsreaktion.
Diese Hypothese basiert auf der Annahme, dass das Kollisionswarnsystem den Fahrer frühzeitig auf eine kritische Annäherungssituation aufmerksam macht. Dadurch kann die Gefahreninformation früher aufgenommen und verarbeitet werden, wodurch die Bremsbetätigung zu einem früheren Zeitpunkt eingeleitet werden kann.
- H2: Die reduzierte Reaktionszeit führt zu einer Verkürzung des Anhaltewegs.
Da sich der Anhalteweg aus Reaktionsweg und Bremsweg zusammensetzt, wirkt sich eine frühere Bremsbetätigung insbesondere auf den Reaktionsweg aus. Der eigentliche Bremsweg wird dabei nicht zwangsläufig verkürzt, da dieser vor allem von Geschwindigkeit, Verzögerung, Fahrbahnzustand und Bremskraft abhängt. Durch die frühere Bremsreaktion kann jedoch der Gesamtanhalteweg reduziert werden.
- H3: Der Einsatz eines Kollisionswarnsystems vergrößert den verbleibenden Sicherheitsabstand zum Hindernis nach dem Stillstand.
Es wird angenommen, dass die frühere Reaktion des Fahrers zu einer früher eingeleiteten Bremsung führt und dadurch eine größere Sicherheitsreserve zum Hindernis verbleibt. Ein größerer Abstand zum Hindernis nach Abschluss des Bremsvorgangs kann dabei als Indikator für eine erhöhte Sicherheitswirkung des Systems betrachtet werden.

Die aufgestellten Hypothesen bilden die Grundlage für die nachfolgende experimentelle Untersuchung sowie die spätere Auswertung der erhobenen Messdaten.

1.3 Aufbau der Arbeit

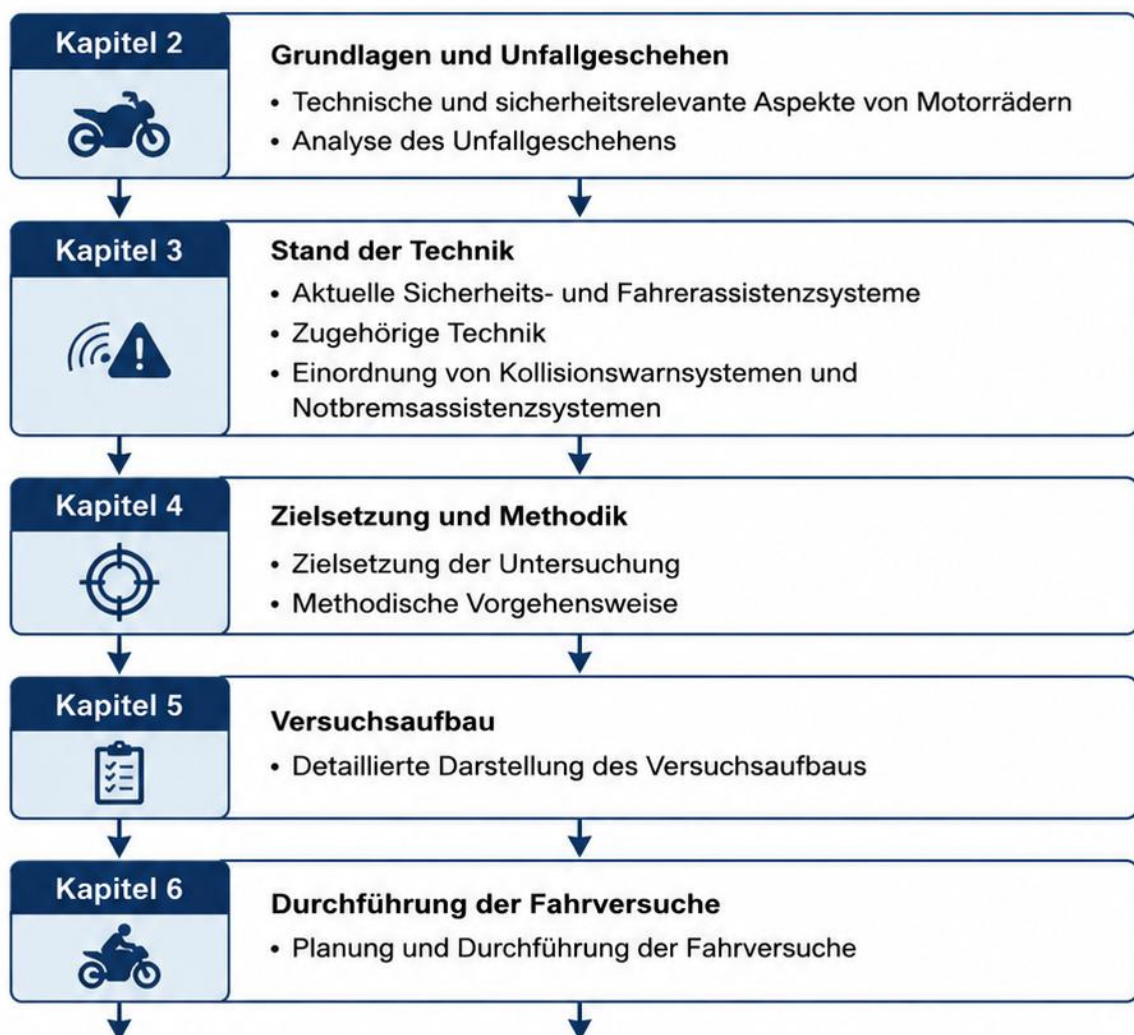
Die vorliegende Arbeit gliedert sich in mehrere aufeinander aufbauende Kapitel, wie in Abbildung 1 verdeutlicht. Zunächst werden in Kapitel 2 die grundlegenden technischen

und sicherheitsrelevanten Aspekte von Motorrädern sowie das Unfallgeschehen analysiert. Kapitel 3 behandelt den Stand der Technik aktueller Sicherheits- und Fahrerassistenzsysteme sowie die dazugehörige Technik und ordnet insbesondere Kollisionswarnsysteme ebenso Notbremsassistentensysteme ein.

In Kapitel 4 werden die Zielsetzung sowie die methodische Vorgehensweise der Untersuchung beschrieben. Der Versuchsaufbau wird in Kapitel 5 detailliert dargestellt, während Kapitel 6 die Durchführung der Fahrversuche umfasst.

Die Auswertung und Analyse der erhobenen Daten erfolgt in Kapitel 7. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse in Kapitel 8 diskutiert und kritisch bewertet. Kapitel 9 widmet sich der Ableitung des Potenzials zukünftiger Notbremsassistentensysteme für Motorräder.

Abschließend werden in Kapitel 10 die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen im Bereich der Motorradsicherheit gegeben.



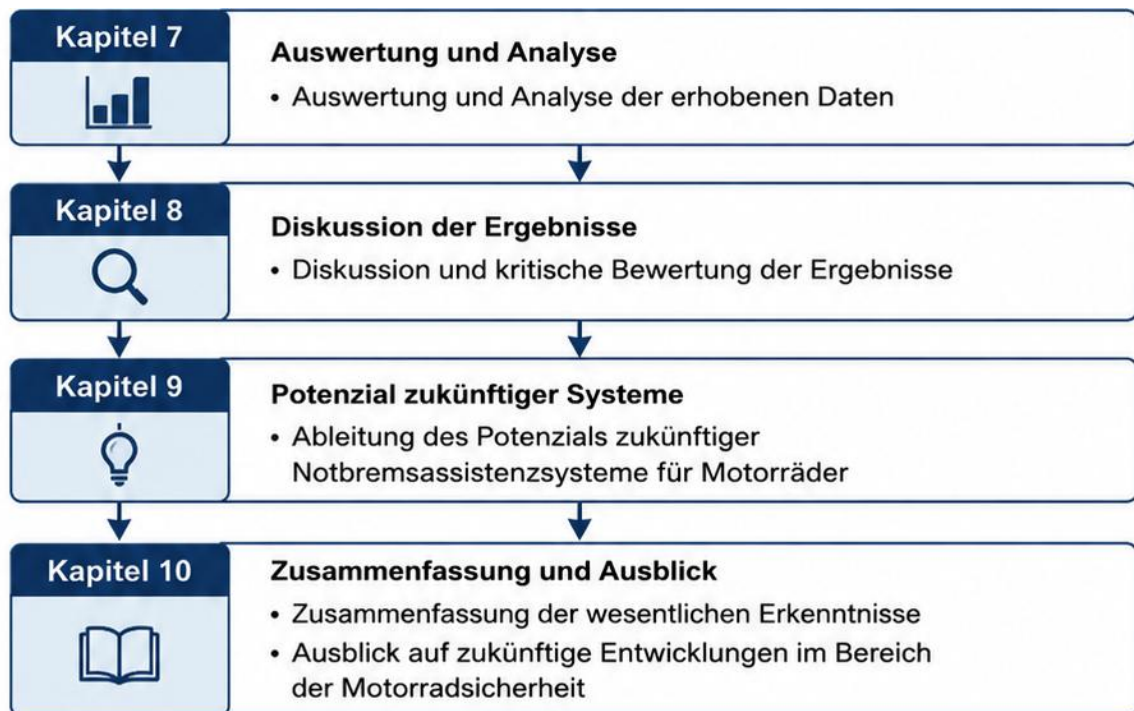


Abbildung 1: Aufbau und Struktur der Arbeit: [Eigene Darstellung] [48]

2 Theoretische Grundlagen der Motorradsicherheit

Die Motorradsicherheit wird durch eine Vielzahl technischer, fahrdynamischer und menschlicher Einflussfaktoren bestimmt. Im Vergleich zum Pkw weist das Motorrad aufgrund seiner einspurigen Fahrweise, der geringeren Eigenstabilität und der fehlenden schützenden Karosseriestruktur besondere sicherheitstechnische Anforderungen auf. Dadurch kommt sowohl dem Fahrverhalten des Fahrers als auch der technischen Ausstattung des Motorrads eine zentrale Bedeutung zu.

In diesem Kapitel werden zunächst der grundlegende Aufbau und die fahrdynamischen Eigenschaften von Motorrädern betrachtet. Anschließend werden Unfallstatistiken und typische Risikofaktoren analysiert, um die Relevanz aktiver Sicherheitssysteme im Motorradbereich einzuordnen. Damit bildet das Kapitel die Grundlage für das Verständnis der später betrachteten Fahrerassistenzsysteme und der experimentellen Untersuchung des Kollisionsswarnsystems.

2.1 Aufbau und Fahrdynamik von Motorrädern

Motorräder unterscheiden sich in ihrem konstruktiven Aufbau und ihrem fahrdynamischen Verhalten grundlegend von mehrspurigen Fahrzeugen wie Personenkraftwagen. Diese Unterschiede haben einen wesentlichen Einfluss auf

- die Fahrstabilität,
- die Fahrdynamik bzw. die Beherrschbarkeit,
- sowie die sicherheitstechnischen Eigenschaften

und sind daher im Kontext der Unfallanalyse und der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen von zentraler Bedeutung.

2.1.1 Einteilung der Motorräder in Deutschland

Die Abbildung 2 veranschaulicht die systematische Einteilung von Motorrädern in Deutschland auf Grundlage der geltenden Fahrerlaubnisklassen. Diese Klassifizierung basiert auf den gesetzlichen Vorgaben der Fahrerlaubnis-Verordnung (FeV) und dient der Regelung, welche Fahrzeugtypen von welchen Fahrerlaubnisinhabern geführt werden dürfen. [7]

Die Darstellung gliedert sich in vier Hauptklassen: AM, A1, A2 und A, die hierarchisch angeordnet sind und eine stufenweise Erweiterung der Fahrberechtigung widerspiegeln.

Die Klasse AM stellt die Einstiegsklasse dar und erlaubt das Führen von Kleinkrafträdern und Rollern mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von maximal 45 km/h sowie einem Hubraum von bis zu 50 cm³ bei Verbrennungsmotoren bzw. einer Leistung von bis zu 4 kW bei Elektromotoren. Das Mindestalter liegt je nach Bundesland zwischen 15 und 16 Jahren.

Die Klasse A1 umfasst Leichtkrafträder mit einem maximalen Hubraum von 125 cm³ und einer Motorleistung von höchstens 11 kW. Zusätzlich darf das Leistungsgewicht 0,1 kW/kg nicht überschreiten. Diese Klasse kann in Deutschland ab einem Mindestalter von 16 Jahren erworben werden.

Die Klasse A2 bildet die nächste Stufe und erlaubt das Führen von Motorrädern mit einer maximalen Leistung von 35 kW und einem Leistungsgewicht von höchstens 0,2 kW/kg. Sie ist ab einem Mindestalter von 18 Jahren zugänglich und dient häufig als Übergangsklasse zu leistungstärkeren Fahrzeugen.

Die Klasse A stellt die höchste Führerscheinkategorie dar und berechtigt zum Führen aller Motorräder ohne Leistungsbeschränkung. Sie kann entweder direkt ab einem Alter von 24 Jahren oder im Rahmen eines Aufstiegs von der Klasse A2 bereits ab 20 Jahren erworben werden. [7]

Insgesamt verdeutlicht die Abbildung das abgestufte System der Motorradführerscheine in Deutschland, welches sowohl sicherheitsrelevante Aspekte als auch die schrittweise Heranführung an leistungstärkere Fahrzeuge berücksichtigt.

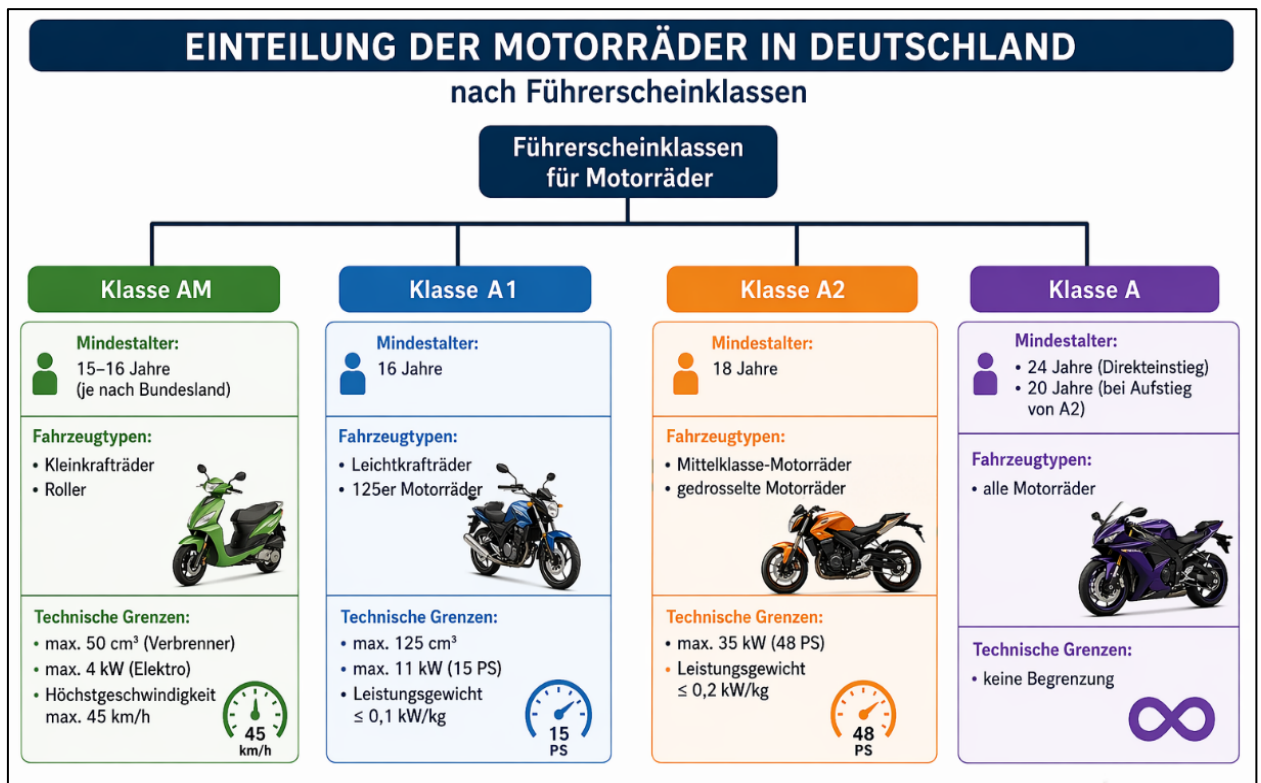


Abbildung 2: Einteilung der Motorräder in Deutschland: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [7] [48]

2.1.2 Fahrzeugaufbau

Ein Motorrad ist ein einspuriges Fahrzeug, das im Wesentlichen aus einem Rahmen, einem Vorder- und Hinterrad, einer Lenk- und Bremsanlage sowie dem Antriebssystem besteht. Im Gegensatz zu Pkw fehlt eine selbsttragende Karosseriestruktur, wodurch Motorräder keine nennenswerte passive Sicherheit bieten. Der Fahrer ist weitgehend ungeschützt und stellt einen integralen Bestandteil des Gesamtsystems dar.

Der Rahmen bildet die tragende Struktur des Fahrzeugs und verbindet alle wesentlichen Komponenten miteinander. Die Fahrwerksgeometrie, insbesondere Radstand, Lenkkopfwinkel und Nachlauf, beeinflusst maßgeblich das Fahrverhalten. Moderne Motorräder verfügen zudem über komplexe Fahrwerkssysteme mit Federung und Dämpfung, die eine Anpassung an unterschiedliche Fahrzustände ermöglichen.

Die Bremsanlage besteht in der Regel aus hydraulisch betätigten Scheibenbremsen an Vorder- und Hinterrad. Aufgrund der dynamischen Radlastverlagerung beim Bremsen

wird ein Großteil der Verzögerung über das Vorderrad erzeugt. Zur Verbesserung der Fahrstabilität sind moderne Motorräder häufig mit Antiblockiersystemen (ABS) ausgestattet, die ein Blockieren der Räder verhindern. [8]

2.1.3 Fahrdynamische Besonderheiten gegenüber PKWs

Die Fahrdynamik von Motorrädern ist durch die einspurige Bauweise und die Notwendigkeit des Gleichgewichtserhalts geprägt. Im Gegensatz zu Pkw, die statisch stabil sind, erfordert das Motorradfahren eine kontinuierliche Stabilisierung durch den Fahrer. Insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten ist das Motorrad instabil und muss aktiv ausbalanciert werden. Ein wesentliches Merkmal der Fahrdynamik ist das Kurvenfahren durch Schräglage. Zur Erzeugung der notwendigen Zentripetalkraft wird das Motorrad in die Kurve geneigt, wodurch sich eine komplexe Kopplung zwischen Lenkbewegung, Fahrzeuglage und Reifenkräften ergibt. Diese Abhängigkeit stellt eine besondere Herausforderung für die Entwicklung von Assistenzsystemen dar, da Eingriffe in Brems- oder Antriebssysteme das Gleichgewicht des Fahrzeugs beeinflussen können.

Ein weiterer entscheidender Aspekt ist die dynamische Radlastverlagerung beim Bremsen. Durch die Verzögerung verschiebt sich die Last auf das Vorderrad, während das Hinterrad entlastet wird. Dies kann im Extremfall zum Abheben des Hinterrads oder zum Verlust der Fahrstabilität führen. Die optimale Nutzung der verfügbaren Reibungskräfte erfordert daher ein fein abgestimmtes Bremsverhalten. [9]

2.2 Unfallgeschehen bei Motorrädern

Das Unfallgeschehen von Motorradfahrern weist im Vergleich zu anderen Verkehrsteilnehmern signifikante Besonderheiten auf. Trotz eines vergleichsweise geringen Anteiles am Gesamtverkehr, tragen Motorradfahrer ein überproportional hohes Risiko, bei Verkehrsunfällen schwer oder tödlich verletzt zu werden. [10]

Nach Angaben des Statistisches Bundesamt lag die Zahl der bei Motorradunfällen Getöteten in Deutschland im Jahr 2022 bei 492 Personen. Auch die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden ist hoch: Im Jahr 2023 wurden über 26.000 Motorradunfälle mit Personenschaden registriert. Diese Zahlen sind trotz der steigenden Anzahl von Motorrädern in Privathaushalten in Deutschland rückläufig, was für verbesserte Sicherheitseinrichtungen und Schutzausrüstung spricht. [11]

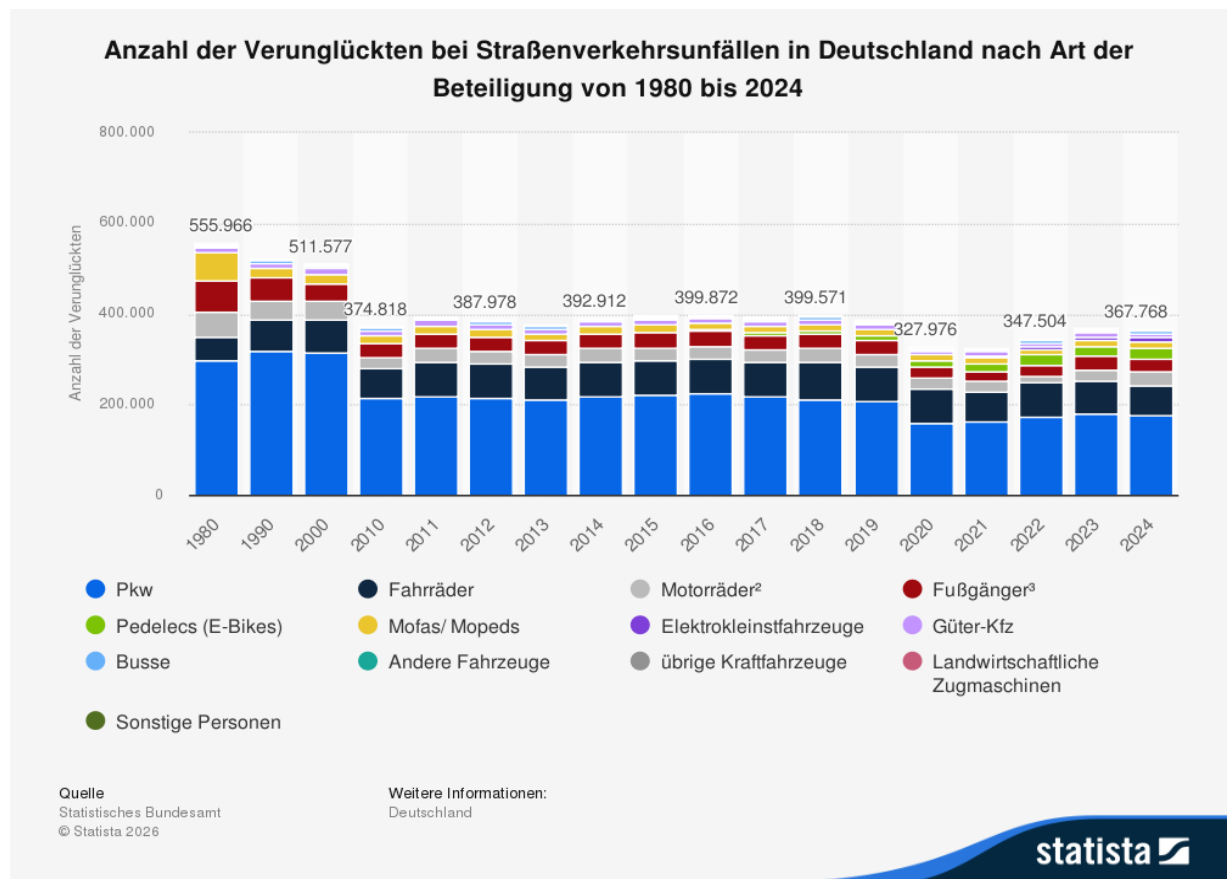


Abbildung 3: Anzahl der Verunglückten bei Straßenverkehrsunfällen in Deutschland nach Art der Beteiligung von 1980 bis 2024: [10]

Die Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Verunglückten im Straßenverkehr in Deutschland nach Art der Beteiligung im Zeitraum von 1980 bis 2023. Es wird deutlich, dass der größte Anteil der Verunglückten auf Pkw-Insassen entfällt. Motorradfahrer stellen im Vergleich dazu eine kleinere Gruppe dar.

Jedoch ist zu erkennen, dass der Anteil der Motorradfahrer im Verhältnis zu ihrer geringen Verkehrsleistung überproportional hoch ist. Während die Gesamtzahl der Verunglückten im Zeitverlauf tendenziell rückläufig ist, bleibt das Risiko für Motorradfahrer weiterhin auf einem hohen Niveau. Dies unterstreicht die besondere Gefährdung dieser Verkehrsteilnehmergruppe.

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der Motorradunfälle in Deutschland im Zeitraum von 2005 bis 2024. Sie verdeutlicht eine insgesamt schwankende, jedoch tendenziell stabile Unfalllage. Die Anzahl der Verletzten bewegt sich in diesem Zeitraum zwischen 34828 und 27421 Personen pro Jahr.

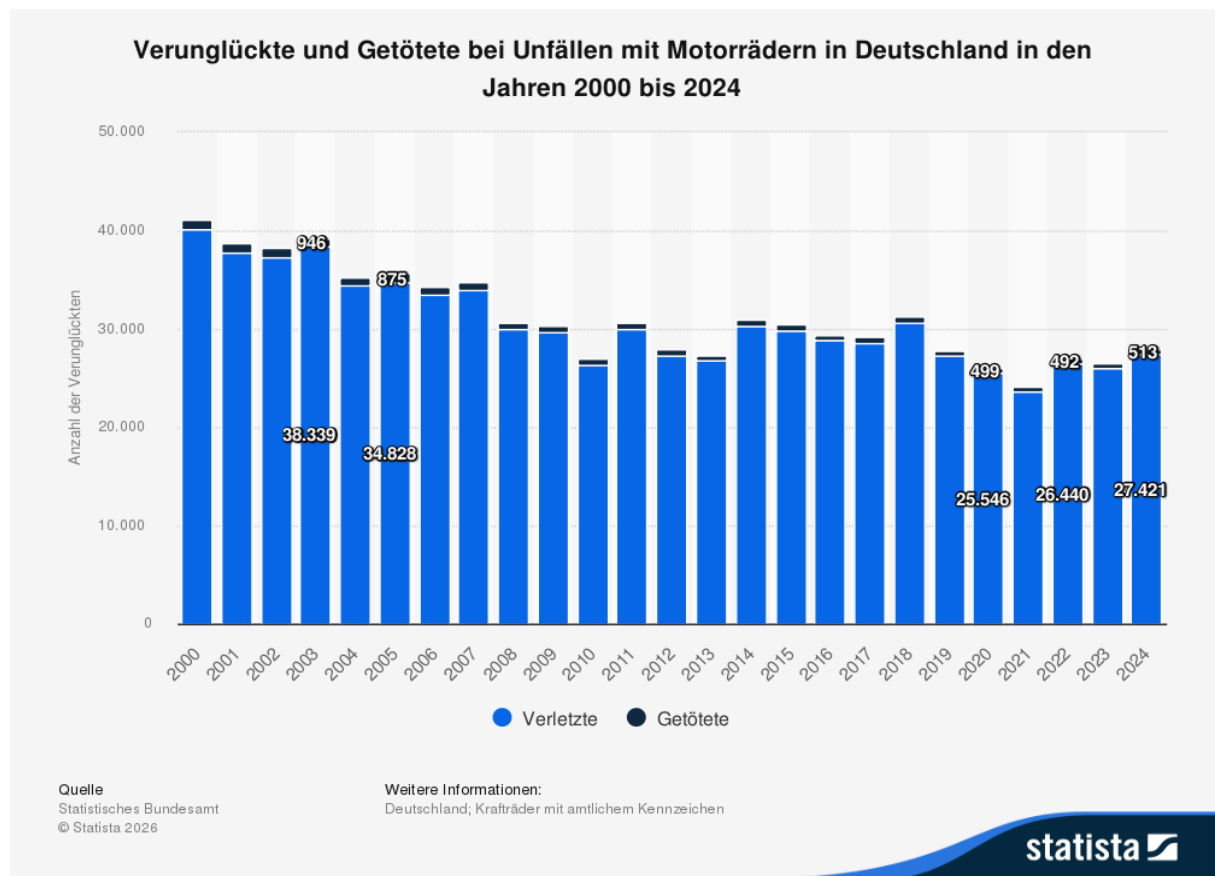


Abbildung 4: Verunglückte und Getötete bei Unfällen mit Motorrädern in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2024: [12]

Besonders auffällig ist, dass die Zahl der Getöteten trotz moderner Sicherheitssysteme weiterhin auf einem hohen Niveau liegt. In den betrachteten Jahren schwankt sie zwischen 875 und 513 Todesopfern jährlich.

Ein temporärer Rückgang der Unfallzahlen ist im Jahr 2020 zu beobachten, was unter anderem auf veränderte Verkehrsbedingungen zurückgeführt werden kann. In den Folgejahren steigen die Zahlen jedoch wieder an, was auf eine weiterhin bestehende Gefährdung hinweist. [12]

2.3 Typische Unfallursachen und Risikofaktoren

Die Ursachen von Motorradunfällen sind vielfältig und lassen sich sowohl auf fahrerbedingte als auch auf umgebungsbedingte Faktoren zurückführen. Einen wesentlichen Anteil nehmen dabei menschliche Einflussgrößen ein. Häufige Unfallursachen sind insbesondere eine nicht angepasste oder überhöhte Geschwindigkeit, Fehleinschätzungen

von Kurvenverläufen sowie unzureichende Fahrpraxis. Darüber hinaus spielt die verzögerte Reaktion des Fahrers in plötzlich auftretenden Gefahrensituationen eine zentrale Rolle. [3]

Ein weiterer bedeutender Aspekt ist die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern. Motorräder werden aufgrund ihrer schmalen Silhouette und geringeren visuellen Präsenz im Straßenverkehr häufig spät oder gar nicht wahrgenommen. Dies führt insbesondere an Kreuzungen oder beim Abbiegen zu kritischen Situationen, in denen andere Verkehrsteilnehmer die Geschwindigkeit oder Entfernung eines Motorrads falsch einschätzen. [3]

Neben den direkten Unfallursachen existieren verschiedene Risikofaktoren, die die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls zusätzlich erhöhen. Dazu zählen insbesondere ungünstige Witterungsbedingungen wie Nässe, Laub oder Verschmutzungen der Fahrbahn, welche die Haftung der Reifen reduzieren. Auch die fahrdynamischen Eigenschaften von Motorrädern, wie hohe Beschleunigungswerte und eine vergleichsweise instabile Fahrdynamik im Grenzbereich, tragen zur erhöhten Gefährdung bei. Die instabile Fahrdynamik ist einhergehend zum Vergleich von einem einspurigen Fahrzeug zu einem mehrspurigen Fahrzeug. Hinzu kommt die Tendenz zur Selbstüberschätzung des eigenen Fahrkönnens, insbesondere bei weniger erfahrenen oder saisonal fahrenden Motorradfahrern. Hierbei spielt die Wahl des richtigen Motorrades auch eine kompetente Rolle. Junge und unerfahrene Fahrer mit hochmotorisierten Maschinen, haben nachweislich sehr hohe Motorradunfälle mit Personenschaden. Die Altersgruppe bis 24 Jahre macht zwar nur 2 % der Motorradführerscheine in Deutschland aus, hat jedoch 34 % an der Verteilung der Unfälle. [9] [13]

Von besonderer Bedeutung ist die Reaktionszeit in der Zeitspanne bis zur motorischen Umsetzung des Fahrers. Bereits geringe Verzögerungen bei der Wahrnehmung und Verarbeitung einer Gefahrensituation führen zu einer signifikanten Verlängerung des Anhaltewegs. Dieser Zusammenhang ist insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten sicherheitskritisch, da sich die zusätzlich zurückgelegte Strecke proportional zur Reaktionszeit erhöht. [14]

Anhalteweg (Formel 1):

$$s_A = s_R + s_{Schw} + s_B = v \times t_R + 0,5 \times a \times t_{Schw}^2 + \frac{v^2}{2 \times a}$$

Der Reaktionsweg s_R ist direkt proportional zur Reaktionszeit t_R und beschreibt die Zeitspanne bis zur Einleitung der Fahrerseitigen Bremsreaktion.

Der Schwellweg s_{Schw} entsteht während der Schwellzeit t_{Schw} , bei der die Verzögerung linear ansteigt.

Der Bremsweg s_B ist (bei konstanter Verzögerung) unabhängig von der Reaktionszeit.

Einfluss von Reaktionszeit und Schwellzeit auf den Anhalteweg

Beispiel: $v = 50 \text{ km/h}$ ($13,9 \text{ m/s}$), $a = 7 \text{ m/s}^2$, $t_{Schw} = 0,4 \text{ s}$ (Schwellzeit)

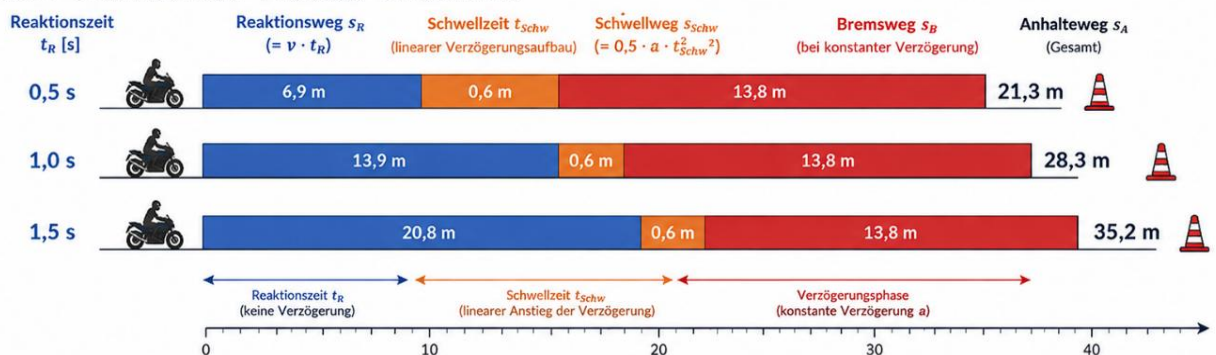


Abbildung 5: Abhängigkeit des Anhaltewegs von der Reaktionszeit: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [14] [48]

Abbildung 5 verdeutlicht den Einfluss der Reaktionszeit von der Reaktionsaufforderung bis zur Einleitung der Fahrerseitigen Bremsreaktion auf den Anhalteweg eines Motorrads. Während der Bremsweg bei konstanter Verzögerung unverändert bleibt, nimmt der Reaktionsweg proportional mit der Reaktionszeit zu, wodurch sich der gesamte Anhalteweg deutlich verlängert. Die durchschnittliche Reaktionszeit unvorbereiteter Fahrer liegt dabei bei etwa 0,8 s nach BURG et al. [15]

Nach der eigentlichen Reaktion erfolgt jedoch nicht unmittelbar die maximale Verzögerung. Stattdessen steigt die Bremsverzögerung zunächst linear an, bis die gewünschte Bremskraft erreicht wird. Dieser Zeitraum wird als Schwellzeit bezeichnet und liegt typischerweise zwischen 0,3 und 0,6 s. Erst anschließend beginnt die eigentliche Verzögerungsphase. Die dabei erreichbaren Verzögerungswerte mit einer Kombination aus Vorderrad- und Hinterradbremse unterscheiden sich je nach Fahrkönnen deutlich: Anfänger erreichen etwa 4,5 bis 7,5 m/s^2 , fortgeschrittene Fahrer 6,5 bis 8,5 m/s^2 und professionelle Fahrer bis zu 10 m/s^2 .

Am Beispiel einer Geschwindigkeit von 50 km/h wird deutlich, dass bereits eine Erhöhung der Reaktionszeit von 0,5 s auf 1,5 s zu einer Verlängerung des Anhaltewegs um mehrere

Meter führt. Dieser Zusammenhang unterstreicht die sicherheitstechnische Relevanz schneller Reaktionen sowie den potenziellen Nutzen von Fahrerassistenzsystemen, die den Fahrer frühzeitig warnen und somit die Reaktionszeit verkürzen können.

Die dargestellten Ursachen und Risikofaktoren verdeutlichen, dass die Verbesserung der Motorradsicherheit in erster Linie durch die Vermeidung von Unfällen erreicht werden kann. Da Motorräder im Vergleich zu Pkw nur über eingeschränkte passive Sicherheit verfügen, kommt aktiven Sicherheitssystemen eine zentrale Bedeutung zu. Insbesondere Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer frühzeitig auf potenzielle Gefahrensituationen hinweisen oder ihn bei der Fahrzeugkontrolle unterstützen, bieten ein erhebliches Potenzial zur Reduktion von Unfallzahlen.

Vor diesem Hintergrund ist die Untersuchung solcher Systeme von großer Relevanz. Insbesondere Kollisionswarnsysteme können durch eine frühzeitige Warnung die Reaktionszeit des Fahrers verkürzen und somit einen entscheidenden Beitrag zur Unfallvermeidung leisten. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte experimentelle Analyse knüpft direkt an diese Zusammenhänge an und untersucht den Einfluss eines solchen Systems auf das Fahrerverhalten unter realen Bedingungen.

3 Stand der Technik von Sicherheitssystemen

Hierbei wird die Straßenverkehrssicherheit nicht ausschließlich auf das Fahrzeug bezogen, sondern als ganzheitliches Zusammenspiel der drei Bereiche Mensch, Fahrzeug und Umwelt verstanden. Ziel ist die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer, der Verkehrsmittel sowie der Verkehrswege. Maßnahmen zur Verbesserung der Straßenverkehrssicherheit werden grundsätzlich in unfallvermeidende und unfallfolgenmindernde Maßnahmen unterteilt. [16]

Das in Abbildung 6 dargestellte Schema unterscheidet dementsprechend zwischen aktiver und passiver Sicherheit. Ergänzend dazu gewinnt in der modernen Fahrzeugsicherheit zunehmend der Begriff der integralen Sicherheit an Bedeutung. Darunter wird die ganzheitliche Verknüpfung aktiver und passiver Sicherheitsmaßnahmen verstanden, bei der Unfallvermeidung, Unfallfolgenminderung sowie unterstützende Maßnahmen vor, während und nach einem Unfall gemeinsam betrachtet werden. [17]

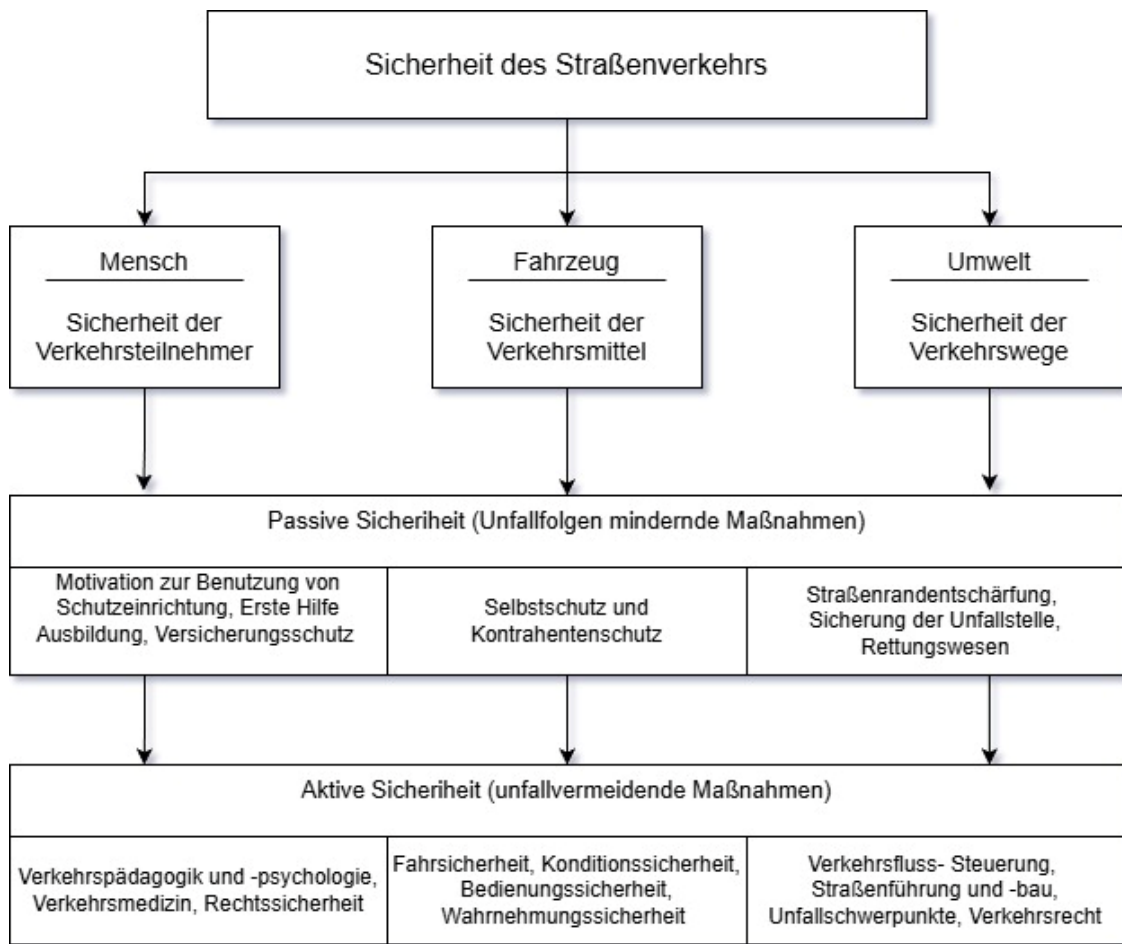


Abbildung 6: Sicherheit des Straßenverkehrs: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [16] [49]

Die aktive Sicherheit umfasst alle Maßnahmen, die der Vermeidung von Unfällen dienen und somit die Unfallhäufigkeit reduzieren sollen. Dazu zählen im Bereich Mensch beispielsweise Verkehrspädagogik, Verkehrspsychologie, Verkehrsmedizin und Rechtssicherheit. Im Bereich Fahrzeug gehören dazu:

- die Fahrsicherheit
- die Konditionssicherheit
- die Bedienungssicherheit
- die Wahrnehmungssicherheit

Für den Bereich Umwelt gibt es folgende wesentliche Bestandteile:

- die Verkehrsflusssteuerung
- die Straßenführung
- der Straßenbau
- die Beseitigung von Unfallschwerpunkten
- das Verkehrsrecht

Die passive Sicherheit hingegen umfasst Maßnahmen, die nicht den Unfall selbst verhindern, sondern dessen Folgen begrenzen sollen. Sie wird daher als unfallfolgenmindernde Sicherheit verstanden. Im Bereich Mensch zählen hierzu die Motivation zur Nutzung von Schutzeinrichtungen, die erste Hilfe Ausbildung sowie der Versicherungsschutz. Die passive Fahrzeugsicherheit konzentriert sich auf den Schutz der Fahrzeuginsassen bzw. des Fahrers selbst sowie auf den Schutz anderer Verkehrsteilnehmer bei einer Kollision. Typische technische Maßnahmen sind hierbei energieabsorbierende Fahrzeugstrukturen, Sicherheitsgurte, Airbags und weitere Rückhaltesysteme. Im Bereich Umwelt tragen Straßenrandentschärfung, die Sicherung der Unfallstelle sowie das Rettungswesen zur Reduzierung der Unfallfolgen bei.

Der Stand der Technik in der Fahrzeugsicherheit beruht somit nicht mehr ausschließlich auf einer getrennten Betrachtung aktiver und passiver Sicherheit, sondern zunehmend auf deren integraler Verknüpfung. Während die aktive Sicherheit primär auf die Verhinderung eines Unfalls ausgerichtet ist, verfolgt die passive Sicherheit das Ziel, die Verletzungsschwere und das Schadenausmaß im Falle eines unvermeidbaren Unfalls möglichst gering zu halten. Die integrale Sicherheit verbindet beide Ansätze und betrachtet zusätzlich den gesamten Ablauf einer kritischen Verkehrssituation, von der Gefahrenerkennung über die mögliche Unfallvermeidung bis hin zur Reduzierung der Unfallfolgen. Insgesamt zeigt sich, dass moderne Fahrzeugsicherheit nur durch das Zusammenwirken präventiver, reaktiver und integraler Maßnahmen wirksam gewährleistet werden kann. [16] [17]

Speziell die Entwicklung von Sicherheitssystemen im Motorradbereich hat in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte gemacht. Während sich frühe Ansätze primär auf mechanische Verbesserungen konzentrierten, liegt der Fokus heutiger Entwicklungen zunehmend auf elektronischen Systemen zur Unterstützung des Fahrers. Ziel ist es, sowohl die aktive als auch die passive Sicherheit zu verbessern und diese im Sinne einer integralen Sicherheitsbetrachtung miteinander zu verknüpfen. Dadurch sollen sowohl die Unfallwahrscheinlichkeit als auch die Unfallschwere reduziert werden.

Im Vergleich zum Automobilbereich ist die Integration komplexer Sicherheitssysteme bei Motorrädern jedoch deutlich anspruchsvoller. Die fahrdynamischen Besonderheiten, insbesondere die einspurige Bauweise und die Abhängigkeit von Schräglage, Reifenhaftung

und Fahrerreaktion, erfordern speziell angepasste Lösungen. Aktuelle Entwicklungen zeigen jedoch, dass besonders im Bereich der aktiven Sicherheit und der Fahrerassistenzsysteme ein erhebliches Potenzial besteht. [9]

3.1 Überblick über Fahrerassistenzsysteme für Motorräder

Moderne Motorräder verfügen zunehmend über elektronische Assistenzsysteme, die auf einer Kombination aus Sensorik, Steuergeräten und Aktorik basieren. Zu den aktuell verfügbaren Systemen zählen unter anderem Antiblockiersysteme (ABS), Traktionskontrollen (TCS), Kurven-ABS sowie radargestützte Systeme wie die Adaptive Geschwindigkeitsregelung (ACC) und Kollisionswarnsysteme (Forward Collision Warning, FCW). Diese Systeme verfolgen das Ziel, den Fahrer sowohl bei der Fahrzeugstabilisierung als auch bei der Wahrnehmung kritischer Verkehrssituationen zu unterstützen. Insbesondere radargestützte Assistenzsysteme stellen eine bedeutende Weiterentwicklung dar, da sie erstmals eine kontinuierliche Erfassung des Fahrzeugumfelds ermöglichen. Auf dieser Grundlage können Funktionen realisiert werden, die über die reine Fahrdynamikregelung hinausgehen, wie beispielsweise die automatische Abstandsanpassung oder die Warnung vor potenziellen Kollisionen. [1]

Hinsichtlich der regulatorischen Anforderungen ist festzustellen, dass im Motorradbereich bislang nur wenige Assistenzsysteme verpflichtend vorgeschrieben sind. Eine zentrale Maßnahme stellt die Einführung der ABS-Pflicht dar. Seit dem Jahr 2016 müssen neu zugelassene Motorräder über 125 cm³ in der Europäischen Union mit einem Antiblockiersystem ausgestattet sein. Diese gesetzliche Vorgabe aus der EU-Verordnung Nr. 168/2013 basiert auf der nachgewiesenen Wirksamkeit des Systems zur Vermeidung von Sturzunfällen und zur Verbesserung der Bremsstabilität. [18]

Weitere Assistenzsysteme, insbesondere solche mit erweiterter Funktionalität wie ACC oder Kollisionswarnsysteme, sind derzeit nicht verpflichtend vorgeschrieben. Ihre Verbreitung erfolgt primär durch technologische Innovationen seitens der Hersteller sowie durch steigende Anforderungen an die Verkehrssicherheit. Im Gegensatz zum Pkw-Bereich, in dem bestimmte Assistenzsysteme zunehmend regulatorisch gefordert werden, befindet sich der Motorradsektor in dieser Hinsicht noch in einer frühen Entwicklungsphase.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Fahrerassistenzsysteme bei Motorrädern einen wachsenden Beitrag zur aktiven Sicherheit leisten. Während grundlegende Systeme wie ABS bereits verpflichtend sind, stellen weiterführende Assistenzsysteme derzeit noch optionale Technologien dar. In Tabelle 1 werden die wichtigsten derzeit verfügbaren Fahrerassistenzsysteme erläutert, gleichzeitig wird aufgeführt, ob es sich dabei um gesetzlich verpflichtende Systeme handelt. Aufgrund ihres nachgewiesenen Potenzials zur Unfallvermeidung ist jedoch davon auszugehen, dass ihre Bedeutung in Zukunft weiter zunehmen wird. [19]

Tabelle 1: Übersicht Auswahl an Fahrerassistenzsystemen: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [1]

Fahrerassistenzsystem	Wirkung	Nutzen	Gesetzliche Vorschrift Motorrad	Gesetzliche Vorschrift KFZ
Standard-ABS (vorrangig für Geradeausbremsung)	Verhinderung von blockierenden Rädern bei Bremsung bei Geradeausfahrt und Erhaltung der Stabilität	Erhöhung der Sicherheit bei Geradeausfahrt beim Bremsen		
Antischlupfregelung (ASR)	Verhindert bei starker Beschleunigung, dass Entstehen von übermäßigem Schlupf an der antreibenden Achse	Verhindert das ausbrechen des antreibenden Rades, das Durchdrehen wird verhindert		
Kurven-taugliches ABS	Wie Standard-ABS, zusätzlich anwendbar in starker Schräglage	Verhindert das Aufrichten der Maschine inkl. Verlassen der Fahrlinie bei Bremsengriff in Kurvenfahrt		-
Hinterrad Abhebe-kontrolle (Stoppie-Kontrolle)	Verhindert beim starken Bremsen das Abheben des Hinterrades, im Extremfall einen Fahrzeugüberschlag	In Verbindung mit ABS, Erhöhung der Sicherheit bei starken Bremsengriffen		-
Wheelie-Kontrolle	Verhindert das Abheben des Vorderrades beim zu heftigen Beschleunigen	In Verbindung mit ASR Erhöhung der Sicherheit bei starken Beschleunigungen		-
Kurven-taugliche Schlupf-kontrolle	Sichert bei Kurvenfahrt den Grip des Hinterrades	Schutz vor Ausbrechen des Hinterrades		-

	des durch etwaige Begrenzung der Motor-kraft	des bei Beschleunigung in Kurven-fahrt		
Anti-Hopping-Kupplung	Verhindert beim Runterschalten oder Gaswegnehmen ein kurzzeitiges Blockieren des Hinterrades	Sichert damit Grip und Führung des Hinterrads vor allem beim Anbremsen vor engen Kurven		-
Totwinkel-Assistent / Side-View-Assistent	Warnt vor seitlich fahrendem Fahrzeug, das man beim Spurwechsel übersehen könnte	Sichert bei Spurwechsel Fahrer vor überholenden Fahrzeugen		
Abstandsradar (Adaptive Cruise Control)	Funktion wie normaler Tempomat mit Anpassung der Geschwindigkeit an fortlaufenden Verkehr	Funktion ähnlich wie bei Pkw, Steuerung der Motorleistung, autonome Bremsung bis 0,5 g		
Kollision-swarn-system (Forward Collision Warning, FCW)	Überwacht fortlaufend den Abstand zu anderen Fahrzeugen, vorrangig nach vorne gerichtet	Leitet eine Warnung an Fahrer, bei unterschreiten von Abstand ein, Erhöht Sicherheit bei Auffahrunfällen		
Verschiedene Fahrmodi	Motorcharakteristik kann den Witterungs- und Straßenverhältnissen angepasst werden, Umfasst auch Einstellungen von Bremse und Fahrwerk	Sicherheits-gewinn hängt von den Fahrgewohn-heiten ab		
Reifendruck-kontrollsystem (RDKS)	Warnung bei Unterschreitung des empfohlenen Reifendrucks	Sicherung der Stabilität und Erhöhung der Kraftstoff-effizienz		

3.2 Passive Sicherheitssysteme

Passive Sicherheitssysteme dienen dazu, die Folgen eines Unfalls zu minimieren, ohne aktiv in das Fahrgeschehen einzugreifen. Im Motorradbereich sind diese Systeme im Vergleich zu Pkw stark eingeschränkt, da keine schützende Fahrzeugstruktur vorhanden ist. [15]

Zu den wichtigsten Maßnahmen der passiven Sicherheit zählen daher:

- Schutzkleidung
 - Integralhelm oder andere Helmvarianten
 - Schutzkleidung (Sicherheitsjacke, -Hose, -Stiefel, -Handschuhe)

- Protektoren in Schutzkleidung
- Airbagwesten [20]
- konstruktive Maßnahmen am Fahrzeug (z. B. energieabsorbierende Bauteile)

Insbesondere der Motorradhelm stellt das zentrale Element der passiven Sicherheit dar und reduziert nachweislich das Risiko schwerer Kopfverletzungen erheblich. Ergänzend dazu gewinnen Airbagsysteme, die in die Kleidung integriert sind, zunehmend an Bedeutung. Einhergehend damit gibt es Möglichkeiten von Herstellern welche Airbagsysteme direkt in das bestehende Motorrad integrieren. [20]

Das von Honda entwickelte Motorrad-Airbagsystem stellt das erste in Serie produzierte Airbagsystem für Zweiräder dar und markiert damit einen bedeutenden Fortschritt im Bereich der passiven Fahrzeugsicherheit. Zur Validierung und Optimierung dieses Systems wurden speziell angepasste Crash-Test-Dummys eingesetzt. Ziel dieser Versuchsreihen war es, realitätsnahe Bedingungen abzubilden und die Schutzwirkung des Systems insbesondere bei Frontalzusammenstößen zu evaluieren. [21]

Das primäre Ziel des Airbagsystems besteht in der signifikanten Reduktion des Verletzungsrisikos für den Fahrer bei Kollisionen mit frontaler Krafteinwirkung. Hierzu wird die bei einem Aufprall auftretende Vorwärtsenergie des Fahrers teilweise durch das Airbag-System absorbiert. Die Auslösung des Systems erfolgt über eine elektronische Steuereinheit (Airbag Electronic Control Unit, ECU), welche kontinuierlich die Signale von insgesamt vier Crash-Sensoren verarbeitet. Diese Sensoren sind an beiden Seiten der Vorderradgabel angebracht und erfassen die charakteristischen Änderungen der Beschleunigungswerte, die bei einem Frontalzusammenstoß auftreten. Sobald die ECU anhand der Sensorsignale eine Unfallsituation identifiziert, wird ein Gasgenerator aktiviert, der den vor dem Fahrer positionierten Airbag innerhalb kürzester Zeit entfaltet. Das Airbag-Modul, welches sowohl den Airbag selbst als auch den Gasgenerator umfasst, ist so konstruiert, dass es optimal im Frontbereich des Motorrads integriert ist. Durch diese Anordnung kann der Fahrer im Kollisionsfall kontrolliert abgebremst werden, wodurch die auf den Körper wirkenden Kräfte reduziert und das Risiko schwerer Verletzungen minimiert werden. [22] [21]



Abbildung 7: Ausgelöster Gold Wing Airbag: [21]

Während das ursprüngliche, im Fahrzeug integrierte Airbagsystem von Honda zu sehen auf Abbildung 7, bis heute eine technologische Sonderstellung einnimmt, hat sich die Weiterentwicklung der Airbagtechnologie im Motorradbereich überwiegend in Richtung fahrergetragener Systeme verlagert. Diese bieten durch ihre Unabhängigkeit vom Fahrzeug, ihre adaptive Sensorik sowie ihre breitere Schutzwirkung ein deutlich höheres Entwicklungspotenzial und stellen aktuell den Stand der Technik im Bereich der passiven Motorradsicherheit dar. Fahrzeugseitige passive Sicherheitssysteme sind hingegen nur begrenzt umsetzbar und realisierbar. Im Gegensatz zu Pkw können keine Knautschzonen integriert werden. Dies führt dazu, dass der Fokus der Sicherheitsentwicklung im Motorradbereich stärker auf der Vermeidung von Unfällen liegt. [14]

Untersuchungen zeigen, dass die Wirksamkeit passiver Schutzmaßnahmen zwar signifikant ist, jedoch allein nicht ausreicht, um die Unfallfolgen nachhaltig zu reduzieren. Vielmehr ist eine Kombination aus passiven und aktiven Sicherheitsmaßnahmen erforderlich, um eine deutliche Verbesserung der Verkehrssicherheit zu erreichen. [23]

3.3 Aktive Sicherheitssysteme

Aktive Sicherheitssysteme verfolgen das Ziel, kritische Fahrsituationen frühzeitig zu erkennen und den Fahrer bei der Fahrzeugkontrolle zu unterstützen, um Unfälle zu vermeiden oder deren Eintrittswahrscheinlichkeit zu reduzieren. Im Motorradbereich hat sich in den vergangenen Jahren eine deutliche technologische Weiterentwicklung vollzogen,

insbesondere durch den Einsatz elektronischer Regelungssysteme und sensorbasierter Fahrdynamiküberwachung. [15]

3.3.1 Antiblockiersystem - ABS

Als grundlegender Meilenstein der aktiven Motorradsicherheit gilt die Einführung des Antiblockiersystems (ABS). Dieses verhindert ein Blockieren der Räder während des Bremsvorgangs und ermöglicht dadurch eine stabile und lenkbare Verzögerung. Untersuchungen zeigen, dass Motorräder mit ABS signifikant seltener in schwere Unfälle verwickelt sind, insbesondere bei Bremsmanövern auf rutschigem Untergrund. In vielen Ländern ist ABS mittlerweile für neu zugelassene Motorräder gesetzlich vorgeschrieben. [24]

3.3.2 Inertial Measurement Units - IMU System (Trägheitsmesseinheit)

Aufbauend auf dem ABS wurden weitere Systeme entwickelt, die gezielt in die Fahrdynamik eingreifen. Dazu zählen insbesondere Traktionskontrollsysteme (TCS), welche das Durchdrehen des Hinterrads beim Beschleunigen verhindern, sowie elektronische Stabilitätsprogramme, die auf Basis von Sensorik die Fahrzeugbewegung überwachen und regeln. Moderne Motorräder sind hierzu mit Inertialsensoren (Inertial Measurement Units, IMU) ausgestattet, die Größen wie Beschleunigung, Gierrate und Schräglage erfassen. Die Gierrate (oder Giergeschwindigkeit) ist die Winkelgeschwindigkeit, mit der sich ein Fahrzeug um seine vertikale Achse dreht, verdeutlicht in Abbildung 8. [25]

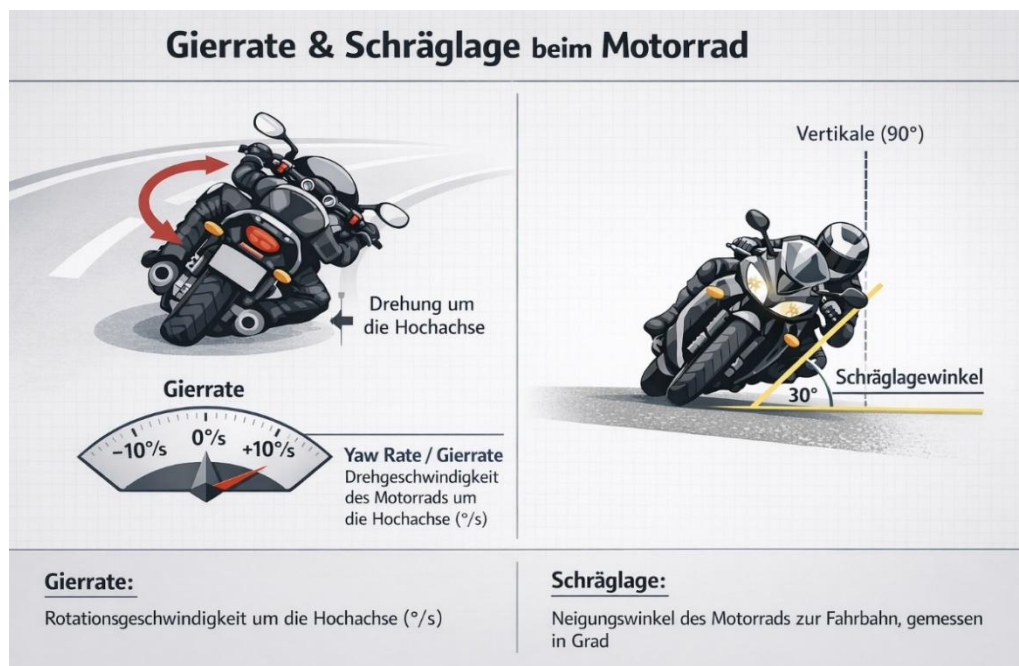


Abbildung 8: Gierrate und Schräglage am Motorrad: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [9] [48]

3.3.3 Kurven ABS

Ein bedeutender Fortschritt stellt das Kurven-ABS dar, welches die Bremskraftverteilung unter Berücksichtigung der Schräglage anpasst. Dadurch kann auch in Kurven eine stabile Verzögerung gewährleistet werden, ohne dass es zu einem Verlust der Haftung kommt. Studien aus der industriellen Forschung zeigen, dass diese Systeme insbesondere in komplexen Fahrsituationen zu einer deutlichen Erhöhung der Fahrstabilität beitragen. [26]

Neben der industriellen Entwicklung existieren zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit der Wirksamkeit aktiver Sicherheitssysteme befassen. Ausarbeitungen von HUGEMANN et al. zeigen, dass insbesondere Systeme zur Stabilisierung der Fahrzeugdynamik einen signifikanten Beitrag zur Unfallvermeidung leisten können. Dabei wird hervorgehoben, dass die Kombination mehrerer Regelungssysteme zu einer verbesserten Gesamtwirkung führt, da unterschiedliche kritische Fahrsituationen adressiert werden. Denn ein stabiles Fahrzeug im Bezug auf die Fahrdynamik ist kontrollierbar und somit in Gefahrensituationen handelbar um die mögliche Kollision zu vermeiden. [23]

Trotz der beschriebenen Fortschritte weisen aktive Sicherheitssysteme im Motorradbereich weiterhin Grenzen auf. Die meisten Systeme greifen erst dann ein, wenn sich das Fahrzeug bereits in einer instabilen oder kritischen Situation befindet. Eine frühzeitige Erkennung potenzieller Gefahrensituationen, beispielsweise durch die Detektion vorausfahrender Objekte, ist nur eingeschränkt Bestandteil dieser Systeme.

Vor diesem Hintergrund verschiebt sich der Fokus aktueller Entwicklungen zunehmend in Richtung prädiktiver Sicherheitssysteme, die auf einer erweiterten Umfeldsensorik basieren. Diese Systeme bilden die Grundlage für moderne Fahrerassistenzsysteme, wie Kollisionswarnsysteme, welche den Fahrer bereits vor dem Eintritt einer kritischen Fahrsituation warnen können. Die Untersuchung solcher Systeme stellt den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar.

3.4 Wahrnehmungspsychologie und Fahrerreaktion

Die Wahrnehmung und Verarbeitung von Informationen stellt einen wesentlichen Bestandteil des Fahrverhaltens im Straßenverkehr dar. Insbesondere im Motorradbereich kommt der menschlichen Informationsverarbeitung eine zentrale Bedeutung zu, da Motorradfahrer aufgrund der hohen Fahrdynamik und der geringen passiven Sicherheit be-

sonders schnell und präzise auf Gefahrensituationen reagieren müssen. Moderne Fahrerassistenzsysteme setzen daher gezielt an den Grenzen menschlicher Wahrnehmung und Reaktion an, um den Fahrer in kritischen Situationen zu unterstützen. [23]

3.4.1 Wahrnehmung und Informationsverarbeitung

Die Teilnahme am Straßenverkehr erfordert die kontinuierliche Aufnahme, Verarbeitung und Bewertung einer Vielzahl von Informationen. Der Fahrer muss dabei gleichzeitig unterschiedliche Reize erfassen und interpretieren wie:

- die Verkehrszeichen
- den Fahrbahnverlauf
- andere Verkehrsteilnehmer
- die Fahrzeugdynamik

Dieser Prozess wird als menschliche Informationsverarbeitung beschrieben und erfolgt in mehreren aufeinanderfolgenden Stufen. [23]

Zunächst werden relevante Reize über die Sinnesorgane wahrgenommen. Im Straßenverkehr spielt dabei insbesondere die visuelle Wahrnehmung eine zentrale Rolle. Anschließend erfolgt die kognitive Verarbeitung der Informationen, bei der die Situation bewertet und mögliche Handlungsoptionen ausgewählt werden. Erst danach wird eine motorische Reaktion, beispielsweise ein Bremsvorgang, eingeleitet. Dieser Prozess benötigt Zeit und ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Dazu zählen unter anderem

- die Aufmerksamkeit
- die Erfahrung
- die Ermüdung
- die Komplexität der Verkehrssituation

Besonders unerwartete Ereignisse führen häufig zu verlängerten Reaktionszeiten, da die Situation zunächst erkannt und eingeordnet werden muss.

Im Motorradbereich ist die kognitive Belastung des Fahrers zusätzlich erhöht. Neben der Beobachtung des Verkehrsgeschehens muss der Fahrer aktiv das Gleichgewicht des Fahrzeugs kontrollieren und auf fahrdynamische Veränderungen reagieren. Dies führt dazu, dass kritische Situationen häufig unter hoher mentaler Beanspruchung bewältigt werden müssen. [9]

3.4.2 Reaktionszeit in Gefahrensituationen

Die Reaktionszeit beschreibt vereinfacht die Zeitspanne zwischen dem Auftreten eines Reizes und der Einleitung einer Handlung. Im Straßenverkehr stellt sie einen entscheidenden Einflussfaktor für die Unfallvermeidung dar, da sich während der Reaktionszeit das Fahrzeug weiterhin mit unveränderter Geschwindigkeit bewegt.

Die gesamte Reaktionszeit setzt sich aus mehreren Teilprozessen zusammen:

- Wahrnehmung der Gefahr
- Verarbeitung und Entscheidungsfindung
- bis zur motorischen Umsetzung der Reaktion

Unter realen Fahrbedingungen liegt die Reaktionszeit eines Fahrers typischerweise zwischen etwa 0,8 s und 1,5 s. In komplexen oder unerwarteten Situationen kann sie jedoch deutlich höher ausfallen. [15]

Der Einfluss der Reaktionszeit auf den Anhalteweg ist insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten erheblich. Bereits geringe Unterschiede können zu mehreren Metern zusätzlichem Reaktionsweg führen.

Im Motorradbereich besitzt die Reaktionszeit eine besondere Bedeutung, da Motorräder im Vergleich zu Pkw nur geringe passive Sicherheitsreserven aufweisen. Eine frühzeitige Reaktion kann daher entscheidend dazu beitragen, Kollisionen zu vermeiden oder deren Folgen zu reduzieren.

3.4.3 Bedeutung für Fahrerassistenzsysteme

Die Grenzen menschlicher Wahrnehmung und Informationsverarbeitung stellen einen zentralen Ansatzpunkt moderner Fahrerassistenzsysteme dar. Ziel dieser Systeme ist es, Gefahrensituationen frühzeitig zu erkennen und den Fahrer rechtzeitig zu warnen oder zu unterstützen. Insbesondere Kollisionswarnsysteme verfolgen das Ziel, die Zeit zwischen Gefahrenerkennung und Reaktion zu verkürzen. Durch akustische, visuelle oder haptische Warnungen wird die Aufmerksamkeit des Fahrers gezielt auf kritische Situationen gelenkt. Dadurch kann die Wahrnehmungs- und Entscheidungsphase verkürzt werden, was zu einer Reduktion der gesamten Reaktionszeit führt.

Untersuchungen zeigen, dass Fahrerassistenzsysteme insbesondere in unerwarteten Gefahrensituationen ein hohes Potenzial zur Verbesserung der Verkehrssicherheit besit-

zen. Dies gilt vor allem für Situationen mit hoher kognitiver Belastung oder eingeschränkter Aufmerksamkeit. Im Motorradbereich kommt diesen Systemen eine besondere Bedeutung zu, da die fahrdynamischen Eigenschaften sowie die geringe passive Sicherheit eine frühzeitige Gefahrenvermeidung erforderlich machen. Kollisionswarnsysteme stellen daher eine wichtige Entwicklungsstufe zwischen klassischen Stabilitätssystemen und vielleicht zukünftigen automatisierten Notbremsassistentensystemen dar. [23]

Die in dieser Arbeit durchgeführte experimentelle Untersuchung knüpft unmittelbar an diese Zusammenhänge an und analysiert den Einfluss eines Kollisionswarnsystems auf das menschliche Reaktionsverhalten unter realen Fahrbedingungen.

3.5 Fahrerassistenzsysteme bei Motorrädern

Fahrerassistenzsysteme stellen die jüngste Entwicklungsstufe der aktiven Sicherheit im Motorradbereich dar. Im Gegensatz zu klassischen fahrdynamischen Regelungssystemen greifen sie nicht ausschließlich in instabilen Fahrsituationen ein, sondern zielen darauf ab, potenzielle Gefahrensituationen frühzeitig zu erkennen und den Fahrer präventiv zu unterstützen. Damit verschiebt sich der Fokus von der reaktiven zur prädiktiven Sicherheit.

Die technische Grundlage moderner Fahrerassistenzsysteme bildet eine erweiterte Umfeldsensorik. Insbesondere radarbasierten Systemen kommt hierbei eine zentrale Bedeutung zu. Diese ermöglichen die kontinuierliche Erfassung des Verkehrsumfelds, speziell von vorausfahrenden Fahrzeugen, und liefern Informationen über Abstand, Relativgeschwindigkeit und Annäherungsrate. Ein wesentliches Anwendungsfeld dieser Technologie ist die Adaptive Geschwindigkeitsregelung (Adaptive Cruise Control, ACC), die eine automatische Anpassung der Fahrgeschwindigkeit an den vorausfahrenden Verkehr ermöglicht.

3.6 Kollisionswarnsysteme - Forward Collision Warning, FCW

Aufbauend auf den radarbasierenden Systemen wurden Kollisionswarnsysteme (Forward Collision Warning, FCW) entwickelt, die den Fahrer bei kritischen Annäherungssituationen warnen. Kollisionswarnsysteme analysieren kontinuierlich die Fahrsituation und berechnen die verbleibende Zeit bis zu einer möglichen Kollision. Wird ein kritischer Schwellenwert unterschritten, erfolgt eine Warnung des Fahrers, in der Regel visuell,

akustisch oder haptisch. Ziel ist es, die Aufmerksamkeit des Fahrers zu erhöhen und eine frühzeitigere Reaktion zu ermöglichen.

Im Vergleich zum Pkw-Bereich befinden sich Fahrerassistenzsysteme für Motorräder jedoch noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Während im Automobilbereich bereits automatisierte Notbremsassistentensysteme (Autonomous Emergency Braking, AEB) weit verbreitet sind, stellt deren Übertragung auf Motorräder eine erhebliche technische Herausforderung dar. Die fahrdynamischen Besonderheiten, insbesondere die Schräglage sowie die instabile Fahrdynamik bei abrupten Bremseingriffen, erschweren eine direkte Umsetzung. Aus diesem Grund konzentrieren sich aktuelle Entwicklungen zunächst auf Systeme, die den Fahrer unterstützen, ohne aktiv in die Fahrzeugdynamik einzugreifen.

Kollisionswarnsysteme stellen hierbei einen wichtigen Zwischenschritt dar, da sie eine Verbesserung der Zeitspanne ab der Reaktionsaufforderung ermöglichen, ohne die Stabilität des Fahrzeugs zu beeinflussen. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt in der Weiterentwicklung hin zu teilautomatisierten Eingriffen, beispielsweise durch Bremskraftunterstützung oder adaptive Warnstrategien.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Fahrerassistenzsysteme, insbesondere Kollisionswarnsysteme, einen vielversprechenden Ansatz zur Erhöhung der Motorradsicherheit darstellen. Sie schließen die Lücke zwischen klassischen fahrdynamischen Regelungssystemen und vielleicht zukünftigen automatisierten Notbremsassistentensystemen. Die experimentelle Untersuchung eines solchen Systems im realen Fahrversuch, wie sie im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wird, liefert daher einen wichtigen Beitrag zur Bewertung ihres tatsächlichen Nutzens unter praxisnahen Bedingungen. [14]

3.6.1 Technische Komponenten des Kollisionswarnsystems

Die Funktionsweise eines Kollisionswarnsystems beruht auf der frühzeitigen Identifikation potenzieller Gefährdungssituationen im Fahrumfeld sowie der automatisierten Ausgabe einer Warnung, sofern keine rechtzeitige Reaktion des Fahrers erfolgt. Die Realisierung dieses Systems erfolgt durch das Zusammenwirken fortschrittlicher Sensortechnologien und algorithmischer Auswertungsverfahren.

Zentraler Bestandteil eines Forward-Collision-Warning-(FCW)-Systems ist die kontinuierliche Erfassung der Fahrzeugumgebung. Diese wird durch den Einsatz verschiedener Sensortypen gewährleistet, zu denen insbesondere Kamerasysteme, Radarsensoren sowie zunehmend auch LiDAR Sensorik zählen. In der Praxis werden diese Sensoren meist

nicht isoliert verwendet, sondern in kombinierter Form eingesetzt. Dieser Ansatz, bekannt als Sensorfusion, ermöglicht eine signifikante Steigerung der Erkennungsgenauigkeit sowie der Qualität bei der Klassifikation und Verfolgung von Objekten. [27] Ziel dieser Umfeldanalyse ist eine möglichst präzise Erfassung relevanter Verkehrsteilnehmer, insbesondere vorausfahrender oder stehender Fahrzeuge. Dabei werden deren Position, Relativgeschwindigkeit sowie Bewegungsrichtung in Bezug auf das eigene Fahrzeug bestimmt, um kritische Situationen frühzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen einzuleiten. Im weiteren Verlauf werden die in den Assistenzsystemen eingesetzten Sensortechnologien darunter Radar-, LiDAR- und Kamerasysteme detailliert betrachtet, um deren jeweilige Funktionsprinzipien sowie deren Zusammenwirken im Kontext der Objekterkennung und Kollisionsvermeidung zu erläutern.

3.6.2 Radar-Sensorik als Grundlage für Fahrerassistenzsysteme

Im Bereich der motorisierten Zweiräder bilden Radarsensoren (Radio Detection and Ranging) derzeit die technologische Kernkomponente für moderne Fahrerassistenzsysteme (FAS). Sie dienen als primäre Datenbasis für sicherheitsrelevante Funktionen wie Kollisionswarnungen (Forward Collision Warning, FCW) sowie adaptive Abstands- und Geschwindigkeitsregelungen (Adaptive Cruise Control, ACC).

Die physikalische Funktionsweise basiert auf der Emission hochfrequenter elektromagnetischer Signale im Millimeterwellenbereich – üblicherweise innerhalb des Frequenzbands von 76 bis 77 GHz. Treffen diese Wellen auf Objekte oder vorausfahrende Fahrzeuge, werden sie gestreut und reflektiert. Die Intensität des reflektierten Echos hängt maßgeblich von der Materialbeschaffenheit und der Dichte des getroffenen Hindernisses ab. Während metallische Oberflächen hervorragende Reflexionseigenschaften aufweisen, erzeugen auch nicht-metallische Objekte wie Holzpaletten oder Kunststoffbehälter messbare Signalarückwürfe. Aus der Laufzeit des reflektierten Signals sowie der Doppler-induzierten Frequenzverschiebung lassen sich fundamentale Kenngrößen wie die Distanz, die Relativgeschwindigkeit und die Bewegungsrichtung der erfassten Objekte präzise ermitteln. In modernen Fahrzeuganwendungen hat sich hierfür das FMCW-Verfahren (Frequency Modulated Continuous Wave) durchgesetzt. Durch die kontinuierliche Modulation der Sendefrequenz lässt sich über den direkten Abgleich von Sende- und Empfangssignal eine hochgenaue Ortung und Geschwindigkeitsanalyse realisieren. [27]

Ein prägnanter Vorteil der Radartechnologie im Vergleich zu optischen Kamerasystemen ist ihre ausgeprägte Unempfindlichkeit gegenüber atmosphärischen Störungen. Radarsensoren arbeiten nahezu unabhängig von den vorherrschenden Lichtverhältnissen; ihre Funktionsfähigkeit wird durch Dunkelheit, dichten Nebel oder starken Niederschlag kaum beeinträchtigt. Darüber hinaus erzielen sie Reichweiten im Korridor von etwa 200 m bis 250 m und bieten eine exzellente Präzision bei der Tempoermittlung. Diese Robustheit ist für sicherheitsrelevante Funktionen essenziell, da sie eine verlässliche Detektion sowie die exakte Unterscheidung zwischen stationären und dynamischen Objekten im Verkehrsraum garantiert. [28]

Die Effizienz und Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems wird im Wesentlichen durch diverse Schlüsselparameter definiert:

- Distanzauflösung: Bewegt sich im Regelfall in einem Spektrum von 0,1 m bis 2 m
- Geschwindigkeitsmessung: Erreicht hochpräzise Auflösungen von bis zu 0,025 m/s
- Winkelauflösung: Variiert je nach Anwendungszweck und Sensorauslegung von schmalen Erfassungskorridoren (ca. 10°) bis hin zu weitwinkligen Bereichen (bis zu 90°)

Dem aktuellen Stand der Technik entsprechende Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine Vielzahl von Objekten spurübergreifend simultan erfassen und deren Weg kontinuierlich nachverfolgen können. [28]

Speziell bei Motorrädern konzentriert sich der Einsatz von Radar vor allem auf vorausschauende Assistenzfunktionen. Die Sensorik scannt permanent den Verkehrsraum vor dem Zweirad, um relevante Objekte und potenzielle Gefahrenquellen frühzeitig zu identifizieren. Mittels der erhobenen Abstands- und Relativgeschwindigkeitsdaten lassen sich kritische Annäherungsszenarien berechnen, wodurch der Fahrer rechtzeitig gewarnt werden kann.

Die physische Integration solcher Systeme in Motorräder bringt jedoch spezifische konstruktive Herausforderungen hinsichtlich des Bauraums und der optimalen Platzierung mit sich. Wegen der stark limitierten Montageflächen ist eine kompakte Bauweise der Module zwingend erforderlich, ohne dass dabei Abstriche bei der Reichweite oder dem Sichtfeld gemacht werden dürfen. Moderne Sensoreinheiten sind folglich gezielt für die Kinematik einspuriger Fahrzeuge konzipiert, um trotz des geringen Platzangebots eine

lückenlose Umfeld Wahrnehmung zu gewährleisten. Als praxisbewährte Beispiele für solche fahrzeugseitig integrierten Radarsensoren gelten unter anderem der Bosch LRR3 sowie das Delphi ESR. [27]

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Radar aufgrund seiner hohen Zuverlässigkeit, Reichweite und Robustheit die derzeit wichtigste Sensortechnologie für Fahrerassistenzsysteme im Motorradbereich darstellt. Insbesondere für Kollisionswarnsysteme bildet es eine essenzielle Grundlage, da es eine präzise und kontinuierliche Erfassung der Fahrzeugumgebung ermöglicht und somit maßgeblich zur Erhöhung der Verkehrssicherheit beiträgt. [27]

3.6.3 Kamerabasierte Systeme als Grundlage für Fahrerassistenzsysteme

Kamerabasierte Systeme übernehmen in modernen Fahrerassistenzsystemen eine zentrale Aufgabe bei der Umfeldwahrnehmung. Sie erfassen das Fahrzeugumfeld als zweidimensionale Bilddaten und ermöglichen eine detaillierte Analyse der Verkehrssituation. Ähnlich dem menschlichen Sehsinn registrieren sie geometrische Strukturen, Farben, Kontraste und Texturen, die anschließend mithilfe digitaler Bildverarbeitungsalgorithmen ausgewertet werden.

Grundsätzlich wird zwischen monokularen und stereoskopischen Kameraarchitekturen unterschieden. Monokulare Systeme verwenden eine einzelne Kamera und eignen sich insbesondere zur Objektklassifizierung. Mithilfe trainierter Mustererkennungs- und Klassifikationsverfahren können sie vorausfahrende

- Fahrzeuge
- Fußgänger
- Fahrbahnmarkierungen
- Verkehrszeichen identifizieren.

Eine genaue Entfernungsbestimmung ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da hierfür zusätzliche Modellannahmen oder ergänzende Sensordaten erforderlich sind. [29]

Stereokamerasysteme hingegen verwenden zwei räumlich definiert zueinander versetzte Kameraeinheiten, um eine dreidimensionale Erfassung des Raumes zu generieren. Durch die Berechnung der Disparität – dem pixelbasierten Versatz identischer Bildpunkte in den beiden synchronisierten Einzelbildern – lässt sich die Objektdistanz trigonometrisch präzise bestimmen. Diese dreidimensionale Tiefeninformation ist insbesondere für

hochgradig sicherheitskritische Funktionen wie autonome Notbremsassistenten von elementarer Bedeutung, um das akute Kollisionsrisiko verlässlich bewerten zu können. [27]

Optische Sensoren dienen vor allem der Erkennung und Klassifizierung von Objekten. Sie können verschiedene Verkehrsteilnehmer wie Pkw, Radfahrer und Fußgänger unterscheiden sowie deren Position und Bewegungsrichtung analysieren. Aufgrund ihrer hohen Winkelauflösung sind Kameras gegenüber Radarsensoren besonders für die Erkennung querender oder seitlich herannahender Objekte geeignet. Radarsysteme liefern zwar präzise Abstands- und Relativgeschwindigkeitswerte, weisen jedoch bei der Objektklassifizierung Nachteile auf.

Demgegenüber reagieren Kameras empfindlich auf äußere Einflüsse. Ungünstige Lichtverhältnisse, Gegenlicht, Starkregen, Schneefall, Nebel sowie Verschmutzungen der Linse können die Erkennungsleistung deutlich reduzieren. In sicherheitskritischen Anwendungen werden Kameras daher meist mit Radar- oder LiDAR-Sensoren kombiniert. Durch diese Sensorfusion lassen sich die Schwächen einzelner Sensortypen durch deren komplementäre Eigenschaften ausgleichen. [30]

Darüber hinaus erfordern kamerabasierte Systeme eine präzise geometrische Ausrichtung und Kalibrierung. Bereits geringe Abweichungen der optischen Achse können Fehler bei der Objekterkennung und Entfernungsschätzung verursachen. Deshalb werden sowohl bei der Fahrzeugproduktion als auch während des Betriebs automatische Kalibrierungs- und Diagnoseverfahren eingesetzt.

Obwohl Kameras eine wichtige Grundlage moderner Fahrerassistenzsysteme bilden, ist ihr Einsatz bei Motorrädern bislang begrenzt. Ursache sind insbesondere die komplexe Fahrdynamik und die konstruktiven Besonderheiten motorisierter Zweiräder. Roll- und Nickbewegungen, Schräglagen in Kurven sowie hochfrequente Fahrwerksvibrationen erschweren eine stabile Bildaufnahme und Auswertung. Zusätzlich ist die Sensorik am Motorrad meist ungeschützt Witterung, Straßenschmutz, Gischt und Insekten ausgesetzt, wodurch die Bildqualität und Systemzuverlässigkeit beeinträchtigt werden können. Auch die begrenzten Bauraumverhältnisse und das Fehlen einer geschützten Einbauposition, wie sie bei Pkw hinter der Windschutzscheibe vorhanden ist, erschweren eine robuste Integration. [30]

3.6.4 LiDAR-Sensorik als Grundlage für Fahrerassistenzsysteme

Für eine hochpräzise, dreidimensionale Abbildung des Fahrzeugumfeldes greifen moderne Fahrerassistenzsysteme zunehmend auf die LiDAR-Technologie (Light Detection and Ranging) zurück. Anders als radargestützte Systeme, die auf Mikrowellen basieren, nutzt dieses optische Messverfahren ultrakurze Infrarot-Laserpulse in einem Wellenlängenbereich von circa 850 bis 900 nm. Die Distanzermittlung erfolgt über das Time-of-Flight-Prinzip (Laufzeitmessung), wodurch sich Objektabstände bis auf wenige Zentimeter genau bestimmen lassen. Hardwareseitig setzt sich ein solcher Sensor im Wesentlichen aus einer Laserquelle zur Signalemission, einer Empfangseinheit (wie Photodioden), einer Steuerung sowie einer digitalen Recheneinheit zur Signalverarbeitung zusammen. Durch das systematische Abtasten der Umgebung und die anschließende digitale Zusammenführung der reflektierten Lichtsignale entsteht eine dichte, dreidimensionale Punktwolke. Diese ermöglicht es der Systemsoftware, nicht nur die geometrische Gestalt der Umgebung detailgetreu zu rekonstruieren, sondern auch mehrere Objekte simultan zu detektieren und deren Trajektorien zu verfolgen, um Parameter wie Abstand, relative Geschwindigkeit und relative Beschleunigung kontinuierlich zu berechnen. [27]

Trotz der unübertroffenen Winkel- und Entfernungsauflösung, die selbst die Erkennung filigraner oder komplex geformter Hindernisse für sicherheitskritische Funktionen wie Notbremsassistenten ermöglicht, steht die LiDAR-Technologie vor physikalischen Herausforderungen. Zwar arbeitet das System als aktiver Sensor völlig unabhängig von den äußeren Lichtverhältnissen und somit auch bei Dunkelheit fehlerfrei, reagiert jedoch hochgradig sensibel auf meteorologische Einflüsse. Schlechtes Wetter wie Nebel, Regen oder Schneefall sowie Verschmutzungen auf der Sensorabdeckung dämpfen die emittierten Lichtstrahlen, was die Detektionsreichweite und die Signalqualität spürbar verringern kann. Dem versuchen moderne Systeme durch technische Gegenmaßnahmen wie Mehrstrahlverfahren und adaptive Filteralgorithmen in der Signalverarbeitung entgegenzuwirken. Im direkten Vergleich erweist sich LiDAR als deutlich präziser als herkömmliches Radar. Jedoch weist es mehr Probleme mit der Witterungsbeständigkeit auf und verursacht zudem signifikant höhere Produktionskosten. Um die jeweiligen technologischen Defizite auszugleichen und ein robustes Gesamtsystem zu schaffen, wird LiDAR im Automobilbereich daher meist nicht isoliert, sondern als Teil einer intelligenten Sensorfusion im Verbund mit komplementären Systemen wie Kamera und Radar betrieben. [30]

Aufgrund des anspruchsvollen Integrationsaufwands, der restriktiven Bauraumverhältnisse an einspurigen Fahrzeugen sowie der hohen Anforderungen an die mechanische Robustheit und Kosteneffizienz hat die LiDAR-Sensorik im Motorradsegment bislang noch keinen Einzug in die Serienproduktion von Fahrerassistenzsystemen gefunden. Unter realen Betriebsbedingungen auf dem Motorrad weisen radargestützte Systeme derzeit eine deutlich höhere Zuverlässigkeit auf und werden deshalb bevorzugt eingesetzt. Dennoch gilt LiDAR in der industriellen Forschung als eine der vielversprechendsten Schlüsseltechnologien für zukünftige Assistenzgenerationen. In Kombination mit etablierten Kamera- und Radarsystemen wird eine präzise Laser-Distanzmessung geboten, um die aktive Sicherheit von Motorrädern weiter zu steigern. Auch wenn eine praktische Serienanwendung im Zweiradbereich aktuell noch aussteht, wird LiDAR somit als wegweisende, zukünftige Ergänzung für eine lückenlose und hochauflösende Umfeld Sensorik bewertet. [27]

3.6.5 Vergleich der Sensortechnologie für Fahrerassistenzsysteme

Vergleich von Sensorsystemen für Fahrerassistenzsysteme			
Kriterium	 Radar	 Kamera	 LiDAR
Funktionsprinzip	 Aussendung elektromagnetischer Wellen (Millimeterwellen), Messung von Laufzeit und Doppler-Effekt	 Aufnahme visueller Bilddaten und algorithmische Auswertung	 Aussendung von Laserimpulsen (Infrarot), Laufzeitmessung (Time of Flight)
Messgrößen	 Abstand, Relativgeschwindigkeit	 Objekterkennung, Klassifikation (z. B. Fahrzeuge, Fußgänger, Verkehrszeichen)	 Abstand, 3D-Position, Relativgeschwindigkeit
Genauigkeit	Mittel 	Abhängig von Auswertung	Sehr hoch 
Reichweite	 Hoch (bis >200 m)	 Mittel (bis ca. 100 m)	 Mittel bis hoch (bis ca. 150–200 m)
Witterungseinfluss	 Gering (sehr robust)	 Hoch (licht- und wetterabhängig)	 Mittel bis hoch (empfindlich gegenüber Regen, Nebel, Schmutz)
Lichtabhängigkeit	 Unabhängig	 Stark abhängig (von Lichtverhältnissen)	 Unabhängig
Objekterkennung	 Eingeschränkt (keine Klassifikation)	 Sehr gut (gute Klassifikation und Detailerkennung)	 Gut (Form und Struktur erkennbar)
Kosten	€ Mittel	€ Gering	€€€ Hoch
Systemkomplexität	 Mittel	 Hoch (softwareintensiv)	 Hoch (mechanisch und softwareseitig)
Einsatz im Motorrad	 Serienmäßig (ACC, Kollisionswarnung)	 Kaum verbreitet	 Aktuell nicht serienmäßig
Typische Anwendungen	 Adaptive Geschwindigkeitsregelung (ACC), Kollisionswarnung (FCW), Toter-Winkel-Erkennung (BSD)	 Verkehrszeichenerkennung, Spurhalteassistent, Fahrerüberwachung	 Automatisiertes Fahren, Umgebungserfassung in 3D, Forschung und Entwicklung
 Vorteile	• Sehr robust gegenüber Witterungseinflüssen • Hohe Reichweite und Zuverlässigkeit • Bewährte Technologie im Serieneinsatz 	• Sehr gute Objekterkennung und Klassifikation • Kostengünstig und kompakt • Vielseitig einsetzbar (z. B. Verkehrszeichen, Spur, Fahrerüberwachung) 	• Sehr hohe Genauigkeit und 3D-Erfassung • Erkennung auch kleiner Objekte • Unabhängig von Lichtverhältnissen 
 Nachteile	• Geringe Detailerkennung und Klassifikation • Auflösung niedriger als bei Kamera/LiDAR 	• Starke Abhängigkeit von Licht und Wetter • Begrenzte Reichweite und Tiefeninformation 	• Kostenintensiv • Empfindlich gegenüber Regen, Nebel, Schmutz • Hoher Integrationsaufwand im Motorrad 

Abbildung 9: Vergleich von Sensorsystemen für Fahrerassistenzsysteme: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [46] [28] [48]

Aus der Gegenüberstellung in Abbildung 9 wird deutlich, dass radargestützte Systeme aktuell die geeignetste Sensortechnologie für den Einsatz im Motorradbereich darstellen, da sie eine hohe Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen aufweisen und gleichzeitig zuverlässige Abstandsmessungen ermöglichen.

3.7 Notbremsassistentensystem (MAEB)

Notbremsassistentensysteme (international als Autonomous Emergency Braking, AEB bezeichnet) zählen zu den fortschrittlichsten Fahrerassistenzsystemen im Bereich der aktiven Sicherheit. Ihr Ziel besteht darin, drohende Kollisionen frühzeitig zu erkennen und durch eine automatische oder teilautomatische Bremsung entweder zu vermeiden oder deren Folgen zu reduzieren. Während diese Systeme im Pkw-Bereich bereits weit verbreitet sind, befindet sich ihre Anwendung bei Motorrädern noch in einem frühen Entwicklungsstadium und hat trotz technischer Fortschritte in der Praxis jedoch klare Systemgrenzen. [31]

3.7.1 Funktionsprinzip Notbremsassistentensystem

Der Notbremsassistent ist ein vorausschauendes Assistenzsystem, das automatisch eine Bremsung einleiten kann, wenn es eine Kollisionsgefahr oder ein Hindernis erkennt. Er agiert hierbei als vorausschauender Beifahrer, der permanent in Verbindung mit mehreren Sensoren die Umgebung des Fahrzeugs überwacht und im Ernstfall eingreifen kann. [31] [32]

Dabei ist das Ziel des Systems klar definiert. Der Fahrer soll in kritischen Situationen unterstützt werden, in dem er zuerst eine Warnung erhält und falls keine entsprechende Reaktion durch den Fahrer erfolgt, eine autonome Teil- oder Vollbremsung eingeleitet wird. Notbremsassistentensysteme basieren auf einer Kombination aus Umfeldsensorik, Datenverarbeitung und Aktorik. Zur Erfassung der Umgebung werden Radar-, Kamera- oder Lidarsensoren eingesetzt, die kontinuierlich den Bereich vor dem Fahrzeug überwachen. Auf Basis dieser Sensordaten werden relevante Objekte erkannt und deren Abstand, Relativgeschwindigkeit sowie Bewegungsrichtung analysiert. Ein zentrales Bewertungskriterium stellt die Time-to-Collision (TTC) dar, also die verbleibende Zeit bis zu einer potenziellen Kollision. Wird ein kritischer Schwellenwert unterschritten, erfolgt zunächst eine Warnung des Fahrers. Reagiert dieser nicht ausreichend, kann das System selbstständig eine Bremsung einleiten oder die Bremsleistung unterstützen.

Untersuchungen der European Commission zeigen, dass Notbremsassistentensysteme das Potenzial besitzen, Auffahrunfälle signifikant zu reduzieren. Auch industrielle Entwicklungen, beispielsweise von Bosch, bestätigen die hohe Effektivität dieser Systeme bei der Vermeidung oder Minderung von Kollisionen. [33] [6]

In vielen Ländern wurden Notbremsassistentensysteme daher bereits regulatorisch berücksichtigt. Innerhalb der Europäischen Union sind bestimmte AEB-Funktionen für neu zugelassene Pkw verpflichtend, was ihre sicherheitstechnische Relevanz zusätzlich unterstreicht. Mit der Verordnung (EU) 2019/2144 ist vorgeschrieben, dass Kraftfahrzeuge mit modernen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystemen ausgestattet sein müssen. Zu diesen Systemen zählt ebenfalls der automatische Notbremsassistent. Hersteller sind verpflichtet, seit dem 6. Juli 2022 alle neu typgenehmigten Fahrzeugmodelle und seit dem 7. Juli 2024 sämtliche Neufahrzeuge mit einem AEBS auszurüsten. Ziel dieser gesetzlichen Vorgabe ist es, die Zahl der Verkehrstoten sowie schwer verletzten Personen deutlich zu senken. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem Schutz vulnerabler Verkehrsteilnehmer wie Fußgängern und Radfahrern. [34]

Die für die europäische Typgenehmigung maßgebliche UN-Regelung Nr. 152 legt fest, dass ein AEBS drohende Kollisionen mit Fahrzeugen oder Fußgängern eigenständig erkennen können muss. In solchen Situationen hat das System den Fahrer zu warnen und bei ausbleibender Reaktion selbstständig eine Notbremsung einzuleiten. Dabei bleibt dem Fahrer jederzeit die Möglichkeit erhalten, das System zu übersteuern. Gleichzeitig fordert die Regelung, Fehlfunktionen wie unbegründete Warnmeldungen oder unnötige Bremsmanöver weitgehend auszuschließen. Darüber hinaus muss das System auch unter wechselnden Umgebungsbedingungen, etwa bei ungünstiger Witterung oder infrastrukturellen Einflüssen, zuverlässig funktionieren. Die Wirksamkeit wird anhand definierter Prüfscenarien nachgewiesen, bei denen unter anderem Bremsverzögerung, Reaktionszeiten sowie die Initialisierung des Systems bewertet werden. Im Falle einer Störung muss das System zudem eine entsprechende Fehlermeldung anzeigen. [35]

Auch im Rahmen der Euro-NCAP-Bewertungen werden AEB-Systeme unter praxisnahen Bedingungen getestet, insbesondere in Car-to-Car-Szenarien. Hierbei werden unterschiedliche Verkehrssituationen nachgestellt, bei denen sich das vorausfahrende Fahrzeug bewegt, abbremst oder bereits stillsteht.

Die aktuellen AEB Car-to-Car-Tests umfassen verschiedene Geschwindigkeiten, Fahrzeugpositionen und Verkehrsszenarien. Getestet werden insbesondere:

- Ein Fahrzeug, das sich einem stehenden Fahrzeug nähert.
- Ein Fahrzeug, das sich einem langsamen fahrenden Fahrzeug nähert.
- Ein Fahrzeug, das auf ein vorausfahrendes Fahrzeug trifft, welches entweder sanft oder stark abbremst.

3.7.2 Unterschied PKW und Motorrad Notbremsassistent

Die Übertragung von Notbremsassistentensystemen auf Motorräder ist mit erheblichen technischen und fahrdynamischen Herausforderungen verbunden. Während Pkw aufgrund ihrer mehrspurigen Bauweise eine hohe Eigenstabilität aufweisen, sind Motorräder als einspurige Fahrzeuge grundsätzlich instabil und erfordern eine kontinuierliche Stabilisierung durch den Fahrer. Ein wesentlicher Unterschied liegt in der Fahrdynamik, insbesondere in der Schräglage während der Kurvenfahrt. Automatisierte Bremseingriffe können in solchen Situationen zu einem Verlust der Fahrstabilität führen und im Extremfall einen Sturz auslösen. Daher müssen Eingriffe bei Motorrädern deutlich sensibler und situationsabhängiger erfolgen als bei Pkw.

Ein weiterer kritischer Aspekt ist die Interaktion zwischen Fahrer und System. Während im Pkw automatisierte Eingriffe häufig ohne direkte Fahrerinteraktion erfolgen können, ist beim Motorrad eine stärkere Einbindung des Fahrers erforderlich. Systeme müssen so ausgelegt sein, dass sie den Fahrer unterstützen, ohne dessen Kontrolle über das Fahrzeug zu beeinträchtigen.

Forschungsarbeiten von HUGEMANN et al., zeigen, dass insbesondere die frühzeitige Information des Fahrers durch Warnsysteme einen entscheidenden Beitrag zur Unfallvermeidung leisten kann. Aus diesem Grund wird der Einsatz vollständig automatisierter Notbremsassistentensysteme im Motorradbereich derzeit kritisch betrachtet, während kollisionswarnende Systeme als praktikabler Zwischenschritt gelten. [23]

Untersuchungen zeigten, dass ungeübte Fahrer ein Motorrad bei autonomen Bremsverzögerungen von etwa $3,4 \text{ m/s}^2$ noch stabil beherrschen können. Eine zusätzliche Herausforderung besteht in der zuverlässigen Objekterkennung während der Kurvenfahrt. Da Bremsmanöver in Schräglage ein erhöhtes Sturzrisiko verursachen können, beschränkten sich frühe Entwicklungsansätze zunächst auf gerade Fahrbahnabschnitte. [36] [37]

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Notbremsassistentensysteme im Pkw-Bereich bereits einen etablierten Bestandteil der Fahrzeugsicherheit darstellen, während

ihre Umsetzung im Motorradbereich noch Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung ist. Die besonderen fahrdynamischen Anforderungen erfordern spezifische Lösungen, die sowohl die Stabilität des Fahrzeugs als auch die Interaktion mit dem Fahrer berücksichtigen. Dabei gibt es folgenden perspektivische Ideen für Rückhaltesysteme:

- die sich kurz vor einem autonomen Bremsmanöver straffen
- bei einem Sturz die Verbindung zum Motorrad aber automatisch kappen würden
- in Kombination mit stabilisierenden Lenkeingriffen also einer Stabilisations-Automatik [38]

Vor diesem Hintergrund kommt kollisionswarnenden Systemen eine zentrale Rolle als Vorstufe zukünftiger Notbremsassistentensysteme und dieser Arbeit zu. Ein direktes Notbremssystem ist in seiner Form als Fahrassistent im Motorradbereich nicht auf dem Markt. Allerdings wird es bei einem Abstandstempomaten (Adaptive Cruise Control) genutzt, um die Geschwindigkeit gegenüber dem vorrausfahrenden Fahrzeug anzupassen. Dementsprechend kann es den Vortrieb verringern, indem die Gasstellung angepasst wird, um Geschwindigkeit abzubauen. Einhergehend damit kann es auch leichte Bremsengriffe ansteuern, welche in einem Bereich ablaufen, welche die Fahrdynamik zulässt.

3.8 Bremstechnologie

Im Gegensatz zum Pkw erfolgt die Betätigung der Bremsanlage bei Motorrädern allgemein über zwei voneinander getrennte Bedienorgane und zwei Bremskreise. Bei konventionellen Systemen wird die Vorderradbremse mit dem Handhebel am Lenker aktiviert, während die Hinterradbremse über das Fußhebel bzw. Fußpedal betätigt wird. Systeme mit Integral- oder Kombibremse, bei denen eine einzelne Bedieneinrichtung auf beide Räder wirkt, werden im folgenden Gliederungspunkt gesondert behandelt. [23]

3.8.1 Bremsverhalten Motorrad und PKW

Während eines Bremsmanövers kommt es zu einer dynamischen Achslastverschiebung in Richtung der Vorderachse. Aufgrund der spezifischen Fahrzeuggeometrie von einspurigen Fahrzeugen, dem kompakten Radstand im Zusammenspiel mit einer verhältnismäßig hohen Schwerpunktlage, ist dieser physikalische Effekt beim Motorrad besonders intensiv ausgeprägt. Mit fortschreitender Verzögerung erhöht sich folglich die auf das Vorderrad wirkende Normalkraft signifikant. Unter extremen Verzögerungsbedingungen

kann dies zu einer vollständigen Entlastung der Hinterachse führen, wodurch das Hinterrad den Bodenkontakt verliert und keinerlei Brems- oder Führungskräfte mehr auf die Fahrbahn übertragen kann, zu sehen in Abbildung 10. [14]

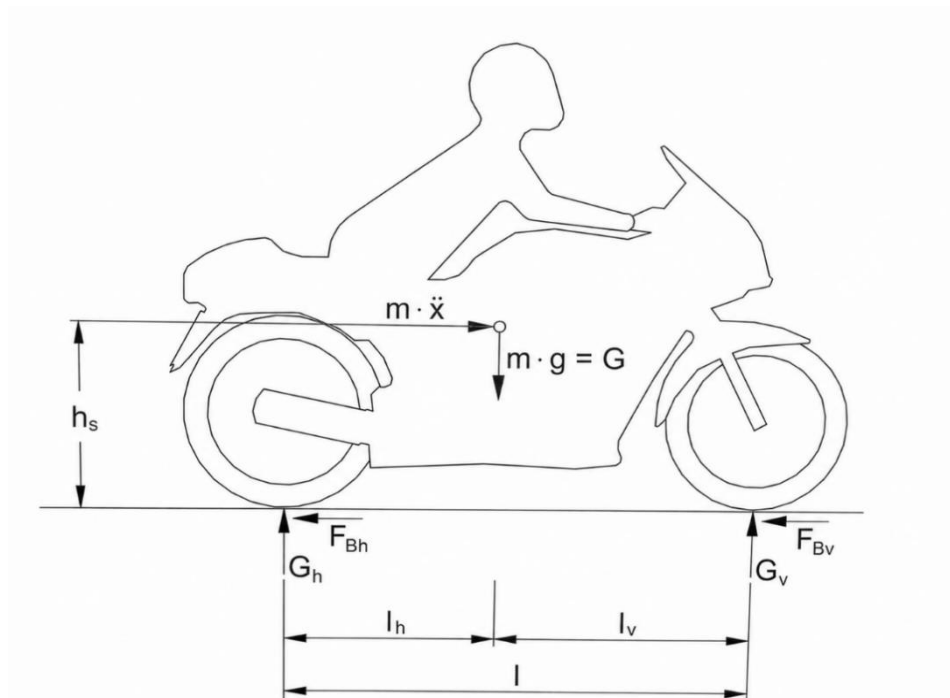


Abbildung 10: Motorrad Achslastverteilung: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [48] [23]

Die prinzipiellen Unterschiede der idealen Bremskraftaufteilung zwischen einem zweispurigen PKW und einem einspurigen Motorrad werden grafisch in Abbildung 11 gegenübergestellt. Die voneinander unabhängige Betätigung beider Bremskreise eröffnet theoretisch den Vorteil, die Bremskraft an der Vorder- und Hinterachse separat auf das aktuell nutzbare Kraftschlusspotenzial zwischen Reifen und Fahrbahn abzustimmen. In der fahrpraktischen Realität erweist sich diese manuelle Verteilung jedoch als eine hochkomplexe Koordinationsaufgabe, welche selbst von hochversierten Fahrern nur annähernd optimal bewältigt werden kann. In unerwarteten Gefahren- und Notsituationen gelingt es folglich selbst routinierten Fahrern selten, eine ideale Bremskraftaufteilung im Sinne eines minimalen Anhaltewegs einzusteuern. Unter fahrphysikalischen Gesichtspunkten lässt sich eine maximale Verzögerung nur dann erzielen, wenn beide Radbremsen simultan aktiviert werden, wobei der Bremskraftanteil an der Hinterachse mit steigender Gesamtverzögerung kontinuierlich angepasst werden muss. Das tatsächliche Verteilungsverhältnis entscheidet darüber, an welchem Rad zuerst die Haftgrenze überschritten wird.

Oberhalb der fahrphysikalischen Ideallinie kommt es primär zum Blockieren des Hinterrads, während unterhalb dieser Grenze zuerst das Vorderrad die Haftung verliert. [39]

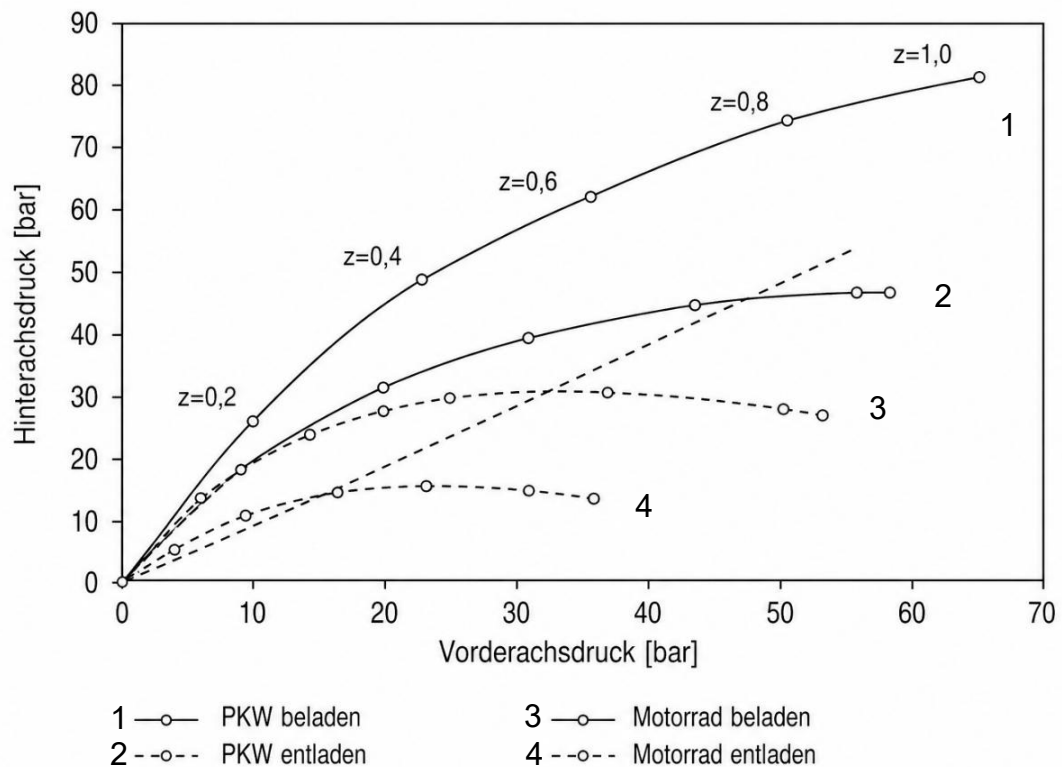


Abbildung 11: Motorrad und KFZ Dynamische Achslastverteilung / Bremskraftverteilung: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an: [48] [23]

Im Automobilbereich sind Bremsanlagen konstruktiv standardmäßig so dimensioniert, dass im physikalischen Grenzbereich vorrangig die Vorderachse blockiert, da dies die Richtungs- und Spurtreue während eines extremen Bremsmanövers stabilisiert. Beim Motorrad hingegen ist der Fahrer gefordert, den Bremsdruck am Hinterrad bei zunehmender Verzögerung manuell abzubauen, um sich im Bereich der idealen Kraftverteilungskurve zu bewegen. Daraus resultiert eine zweifache fahrphysikalische Anforderung. Neben der ohnehin getrennten Dosierung beider Bremskreise ist bei hohen Verzögerungsraten eine aktive Reduzierung oder gar ein teilweises Lösen der Hinterradbremse zwingend erforderlich. Üblicherweise wird zu Beginn einer Notbremsung parallel die Kupplung betätigt. Unterbleibt dieser Schritt, wirken sich das Schleppmoment des Motors sowie die rotatorischen Trägheitsmomente des gesamten Antriebsstrangs direkt auf die Radkräfte aus und verschieben die ideale Verteilungskurve unvorhersehbar. Um das physikalische Maximum an Längsverzögerung zu realisieren, müsste der Fahrer darüber hinaus eine Vielzahl variabler Parameter kompensieren. Hierzu gehören insbesondere die

augenblickliche Massenverteilung des Gesamtfahrzeugs, die aktuelle Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche, plötzliche Reibwertänderungen etwa durch Nässe sowie der spezifische Zustand und die Materialeigenschaften der Bereifung.

Gleichzeitig basiert die Eigenstabilität des Motorrads zu einem wesentlichen Teil auf den gyroskopischen Effekten der rotierenden Laufräder. Kommt es im Zuge einer Vollbremsung zum Blockieren des Hinterrads, bricht die dortige Seitenführung vollständig zusammen. Bei reiner Geradeausfahrt lässt sich dieser Zustand oft noch kontrollieren, da der Fahrer entstehende Querinstabilitäten meist durch gezielte Lenkeingriffe oder Massenverteilung ausgleichen kann. Durchfährt das Motorrad jedoch eine Kurve in Schräglage, resultiert ein blockiertes Hinterrad in einem abrupten, seitlichen Ausbrechen und führt zum Sturz des Fahrers. Ein Blockieren des Vorderrads stellt ein ungleich kritischeres Szenario dar. Dabei besteht erhebliche Gefahr das aufgrund fehlender übertragbarer Seitenkräfte, das Motorrad eine instabile Fahrdynamik aufweist und zum Sturz tendiert. [9]

Während einer Kurvendurchfahrt müssen die Reifenaufstandsflächen simultan zu den Bremskräften auch die erforderlichen Seitenführungskräfte aufbauen. Unter Berücksichtigung des Kammschen Kreises verringert sich das theoretisch verfügbare Potenzial zur Längsverzögerung bei zunehmender Schräglage. [39]

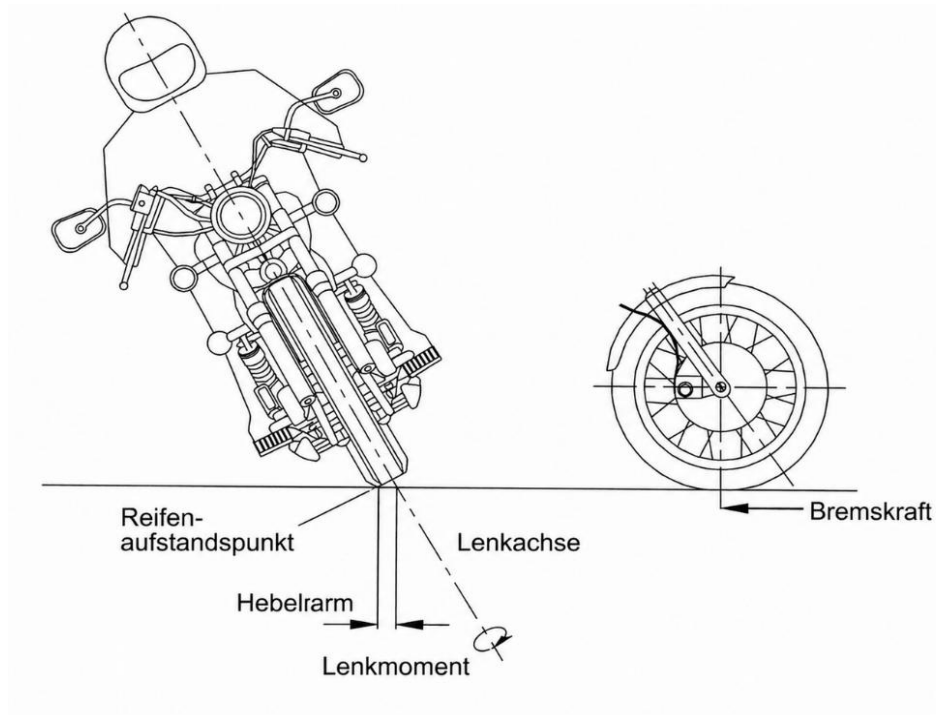


Abbildung 12: Lenkmoment bei der Kurvenbremsung: [Eigene Darstellung] in Anlehnung an [48] [23]

In der fahrpraktischen Realität stellt diese kombinierte Beanspruchung für den durchschnittlichen Motorradfahrer jedoch eine kaum fehlerfrei zu bewältigende Herausforderung dar. Infolge der Schräglage verschiebt sich der Reifenaufstandspunkt lateral aus der geometrischen Lenkachse des Fahrzeugs. Der Aufbau von Bremskräften in dieser Position erzeugt über diesen Hebelarm ein Bremslenkmoment, dem der Fahrer aktiv entgegenwirken muss (Abbildung 12). Bleibt dieser korrigierende Gegenlenkimpuls aus, bewirkt das an der Vorderachse angreifende Drehmoment ein selbsttätiges Aufrichten des Motorrads aus der Kurvenneigung. [14] [23]

3.8.2 Integralbremssystem

Die Auslegung der Bremsanlage hat einen entscheidenden Einfluss auf die mit einem Motorrad erreichbare Verzögerung und ist daher auch für Geschwindigkeitsrückrechnungen relevant. Grundsätzlich unterscheidet man:

- Standardbremsen
- Kombi- bzw. Integralbremsen

Bei Standardbremsanlagen werden Vorder- und Hinterrad getrennt betätigt, die Vorderradbremse über den Handhebel und die Hinterradbremse über das Fußpedal. Integralbremsen koppeln beide Bremskreise, sodass bereits durch die Betätigung eines Bedienelements Bremskraft auf beide Räder verteilt wird. Dadurch lässt sich insbesondere in Gefahrensituationen eine effektivere Verzögerung erzielen, um die Gefahr von Stürzen bei Panikbremsungen verringern. [27]

Heute sind Motorräder überwiegend mit Scheibenbremsen ausgestattet, meist mit zwei Bremsscheiben an der Vorderachse und einer an der Hinterachse. Moderne Anlagen ermöglichen hohe Verzögerungen bereits bei geringer Bedienkraft, erhöhen jedoch gleichzeitig das Risiko eines blockierenden Vorderrads bei Überdosierung. Ältere Systeme mit Trommelbremsen oder nur einer Scheibenbremse erreichen bauartbedingt häufig geringere Bremsleistungen im Vergleich.

ABS-Systeme stellen bei Motorrädern höhere Anforderungen als bei Pkw, da ein Blockieren des Vorderrads aus fahrdynamischer Sicht unbedingt verhindert werden muss. Gleichzeitig muss auch das Hinterrad geregelt werden, um Instabilitäten infolge starker Lastverlagerungen zu vermeiden. Moderne ABS- und Kombibremssysteme verbessern deshalb sowohl die Bremsleistung als auch die Fahrstabilität deutlich. [23]

4 Experimentelle Untersuchung des Kollisionswarnsystems

Nach der Betrachtung der theoretischen Grundlagen, der Unfallstatistik sowie des aktuellen Stands der Technik erfolgt im weiteren Verlauf der Arbeit die experimentelle Untersuchung eines radarbasierten Kollisionswarnsystems im realen Fahrversuch.

Die vorhergehenden Kapitel haben gezeigt, dass im Motorradbereich ein hoher Bedarf an Systemen zur frühzeitigen Erkennung kritischer Verkehrssituationen besteht. Aufgrund der begrenzten passiven Sicherheit von Motorrädern kommt der aktiven Unfallvermeidung eine zentrale Bedeutung zu. Moderne Fahrerassistenzsysteme verfolgen daher das Ziel, den Fahrer mithilfe von Umfeldsensorik und frühzeitigen Warnungen in Gefahrensituationen zu unterstützen. Während Systeme wie ABS oder Traktionskontrolle bereits weitgehend etabliert sind, befinden sich prädiktive Assistenzsysteme wie Kollisionswarnassistenzsysteme im Motorradbereich noch in einer vergleichsweise frühen Entwicklungsphase. Die fahrdynamischen Besonderheiten von Motorrädern erschweren insbesondere die direkte Übertragung automatisierter Brems Eingriffe aus dem Pkw-Bereich. Daher gewinnen Systeme an Bedeutung, die den Fahrer zunächst durch Warnstrategien unterstützen, ohne unmittelbar in die Fahrzeugdynamik einzugreifen. Kollisionswarnsysteme stellen hierbei eine wichtige Entwicklungsstufe dar, da sie durch frühzeitige Warnungen zur Reduzierung kritischer Reaktionszeiten und damit zur Vermeidung oder Abschwächung von Unfällen beitragen können.

4.1 Ziel der experimentellen Untersuchung

Ziel der experimentellen Untersuchung ist die Analyse des Einflusses eines radarbasierten Kollisionswarnsystems auf die Reaktionszeit und den Anhalteweg eines Motorradfahrers in einer definierten Gefahrensituation. Hierzu wird ein realer Fahrversuch auf einem abgesperrten Testgelände durchgeführt. Als Versuchsfahrzeug dient ein Fahrzeug mit serienmäßig integriertem radarbasierendem Fahrerassistenzsystem. Im Mittelpunkt der Untersuchung steht die Fragestellung, inwieweit eine frühzeitige Warnung des Fahrers zu einer schnelleren Reaktion und damit zu einer Verkürzung des Anhaltewegs führt.

Die Untersuchung verfolgt dabei mehrere Teilziele. Zunächst soll die Wirkung des Kollisionswarnsystems auf das Fahrerverhalten unter reproduzierbaren Bedingungen experimentell erfasst werden. Darüber hinaus sollen Unterschiede zwischen Fahrten mit und ohne aktive Warnung analysiert und quantitativ ausgewertet werden.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Bewertung des sicherheitstechnischen Potenzials solcher Systeme im Motorradbereich. Dabei soll untersucht werden, welchen Beitrag Kollisionswarnsysteme zur Unfallvermeidung leisten können und inwieweit sie als Vorstufe zukünftiger Notbremsassistentensysteme betrachtet werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen somit nicht nur der Bewertung des eingesetzten Systems, sondern liefern gleichzeitig einen Beitrag zur Einordnung moderner Fahrerassistenzsysteme im Kontext zukünftiger Entwicklungen der Motorradsicherheit.

4.2 Versuchsstrategie und Versuchsmatrix

Zur Untersuchung des Einflusses eines radarbasierten Kollisionswarnsystems auf das Reaktions- und Bremsverhalten eines Motorradfahrers werden zwei unterschiedliche Fahrversuche unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Ziel ist es, die Wirksamkeit des Systems sowohl bei plötzlich auftretenden Hindernissen in Versuchsreihe 1 als auch bei einer dynamischen Verkehrssituation in Versuchsreihe 2 mit einem vorausfahrenden Fahrzeug zu analysieren. Die Versuche werden auf einem abgesperrten Testgelände durchgeführt, um reproduzierbare Bedingungen und eine sichere Durchführung zu gewährleisten. Als Versuchsfahrzeug dient ein serienmäßiges Motorrad mit integriertem radarbasierten Kollisionswarnsystem. Durch die Verwendung eines Serienfahrzeugs soll eine hohe Praxisnähe der Untersuchung sichergestellt werden.

Für beide Versuche werden identische Randbedingungen eingehalten. Hierzu zählen insbesondere:

- eine konstante Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h und 50 km/h
- derselbe Fahrer
- gleichbleibende Streckenbedingungen
- eine standardisierte Versuchsdurchführung

Die Bewertung des Systems erfolgt durch den Vergleich von Fahrten mit aktiviertem und deaktiviertem Kollisionswarnsystem.

Zur Erhöhung der statistischen Aussagekraft werden sämtliche Versuche mehrfach wiederholt. Die erhobenen Messdaten dienen anschließend der Analyse des Einflusses des Kollisionswarnsystems auf das Reaktionsverhalten sowie auf sicherheitsrelevante Kenngrößen wie Anhalteweg und Sicherheitsabstand.

Die Tabelle 2 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten aus Hindernis und Fahrassistenzsystem in einer Versuchsmatrix. Für jede Kombination werden 10 Versuchsfahrten durchgeführt. Die Kürzel setzen sich wie folgt zusammen: Versuchsreihe - Versuchsdurchlauf - Kollisionswarnsystem Status (z. B. Versuchsreihe 1-4N für stehendes Hindernis, Versuch 4, Kollisionswarnsystem nicht aktiv).

Tabelle 2: Versuchsmatrix: [Eigene Darstellung]

	Versuchsreihe 1 – stehendes Hindernis	Versuchsreihe 2 – bewegtes Hindernis
FCW aktiv	1A/2A/.../9A/10A	1A/2A/.../9A/10A
FCW nicht aktiv	1N/2N/.../9N/10N	1N/2N/.../9N/10N

4.2.1 Versuchsreihe 1 – stehendes Hindernis

Die erste Versuchsreihe untersucht das Verhalten des Fahrers bei einer Annäherung an ein plötzlich auftretendes stehendes Hindernis. Ziel dieser Untersuchung ist die Bewertung des Einflusses des Kollisionswarnsystems auf die Reaktionszeit, den Anhalteweg sowie die verbleibende Sicherheitsreserve bis zum Hindernis. Insgesamt werden 20 Versuchsdurchgänge durchgeführt. Davon erfolgen 10 Fahrten mit aktiviertem Kollisionswarnsystem und 10 Fahrten ohne aktive Nutzung des Systems.

Innerhalb jeder Versuchsgruppe werden zehn Fahrten mit einem unerwartet auftretenden Hindernis durchgeführt. Hierbei wird das Hindernis während der Fahrt in den Fahrbereich eingebracht, ohne dass dem Fahrer der genaue Zeitpunkt bekannt ist. Durch dieses Vorgehen soll eine möglichst realitätsnahe Gefahrensituation erzeugt werden, in der spontane Reaktionen des Fahrers untersucht werden können. Die verbleibenden zehn Fahrten pro Versuchsgruppe erfolgen unter vorhersehbaren Bedingungen und dienen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Während jedes Versuchsdurchgangs fährt das Motorrad mit einer konstanten Geschwindigkeit von 40 km/h auf die Versuchsstrecke zu. Die relevanten Messgrößen umfassen:

- Reaktionszeit des Fahrers (aufzunehmen und auszuwerten aus Videomaterial)
- Bremsweg und Anhalteweg (gemessen mit Maßband)
- verbleibender Abstand zum Hindernis nach Stillstand (gemessen mit Maßband)

Durch den Vergleich der Ergebnisse mit und ohne aktives Kollisionswarnsystem soll untersucht werden, inwieweit das System die Reaktion des Fahrers beeinflusst und zur Erhöhung der Sicherheitsreserve beiträgt.

4.2.2 Versuchsreihe 2 – bewegtes Hindernis

Die zweite Versuchsreihe untersucht das Verhalten des Fahrers in einer dynamischen Verkehrssituation mit einem vorausfahrenden Fahrzeug. Ziel ist die Analyse der Wirksamkeit des Kollisionswarnsystems bei der Annäherung an ein Fahrzeug, das eine definierte Bremsung einleitet.

Für diese Untersuchung fährt das Motorrad mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h hinter einem Versuchsfahrzeug her. Zu Beginn jedes Versuchsdurchgangs wird ein Anfangsabstand von ca. 6 m zwischen Motorrad und vorausfahrendem Fahrzeug eingehalten. Das vorausfahrende Fahrzeug führt während des Versuchs eine standardisierte Bremsung mit einer zuvor festgelegten Verzögerung durch. Der genaue Zeitpunkt der Bremsung wird für jeden Versuch identisch gewählt, um vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten.

Insgesamt werden 20 Versuchsdurchgänge durchgeführt:

- 10 Fahrten mit aktiviertem Kollisionswarnsystem,
- 10 Fahrten ohne aktives Kollisionswarnsystem.

Im Gegensatz zur ersten Versuchsreihe steht hier nicht das vollständige Anhalten vor einem Hindernis im Mittelpunkt, sondern die Untersuchung des Abstandsverhaltens während einer Annäherung an ein verzögerndes Fahrzeug.

Als zentrale Messgröße wird nach jedem Versuch der verbleibende Abstand zwischen Motorrad und vorausfahrendem Fahrzeug ermittelt. Durch den Vergleich der Ergebnisse beider Versuchsgruppen soll untersucht werden, ob das Kollisionswarnsystem zu einer früheren Reaktion des Fahrers führt und dadurch größere Sicherheitsabstände aufrechterhalten werden können. Die Versuchsreihe bildet damit eine typische Auffahrsituation im Straßenverkehr nach und ergänzt die Untersuchung des stehenden Hindernisses um einen praxisnahen dynamischen Anwendungsfall.

4.2.3 Realversuch statt Simulation

Für die Untersuchung des Einflusses eines Kollisionswarnsystems wurde bewusst ein Realversuch unter praxisnahen Bedingungen gewählt und auf eine rein simulationsbasierte Betrachtung verzichtet. Ziel war es, das tatsächliche Reaktions- und Bremsverhalten eines Motorradfahrers unter realen Fahrbedingungen möglichst authentisch zu erfassen.

Simulationen bieten zwar Vorteile hinsichtlich Reproduzierbarkeit sowie geringem organisatorischem und sicherheitstechnischem Aufwand, können fahrdynamische und menschliche Einflussfaktoren im Motorradbereich jedoch nur eingeschränkt abbilden. Aspekte wie Fahrgefühl, Wahrnehmung, Stressreaktion, Balanceverhalten und spontane Reaktionen auf plötzlich auftretende Gefahrensituationen lassen sich in virtuellen Umgebungen nur begrenzt realitätsnah darstellen.

Gerade beim Motorrad ist die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug von besonderer Bedeutung, da das Fahrverhalten wesentlich durch körperliche Bewegungen, Gleichgewichtsreaktionen und subjektive Wahrnehmungen beeinflusst wird. Der Realversuch ermöglicht zudem die Untersuchung eines serienmäßigen Motorrads mit integriertem radarbasiertem Kollisionswarnsystem. Dadurch können reale Systemreaktionen, tatsächliche Sensorerfassungen und unmittelbare Fahrerreaktionen praxisnah analysiert werden. Auch unerwartete Ereignisse, beispielsweise ein zufällig auftretendes Hindernis, lassen sich dadurch realitätsnäher untersuchen.

Trotz dieser Vorteile sind Einschränkungen zu berücksichtigen. Gegenüber Simulationen ist der organisatorische Aufwand höher, die Anzahl der Versuchswiederholungen begrenzt und es sind umfassende Sicherheitsmaßnahmen erforderlich.

Insgesamt ermöglicht der gewählte Realversuch eine praxisnahe Analyse des Zusammenspiels von Fahrer, Fahrzeug und Assistenzsystem und erlaubt dadurch belastbare Aussagen zur praktischen Wirksamkeit moderner Kollisionswarnsysteme im Motorradbereich.

5 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung des Einflusses eines radarbasierten Kollisionswarnsystems auf das Reaktions- und Bremsverhalten eines Motorradfahrers wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der die Durchführung reproduzierbarer und praxisnaher Fahrversuche ermöglicht. Dabei wurden sowohl statische als auch dynamische Gefahrensituationen berücksichtigt, um unterschiedliche Anwendungsfälle eines Kollisionswarnsystems abzubilden. Der Versuchsaufbau umfasst das eingesetzte Versuchsfahrzeug, das Testgelände sowie die für die Untersuchung verwendeten Hindernisse. Durch die Standardisierung aller wesentlichen Randbedingungen wird sichergestellt, dass die erhobenen Messdaten auf den Einfluss des Kollisionswarnsystems zurückgeführt werden können und äußere Störgrößen möglichst minimiert werden.

5.1 Versuchsfahrzeug 1 - Motorrad

Als Versuchsfahrzeug wird eine serienmäßige BMW R 1300 GS mit circa 2000km Laufleistung eingesetzt. Das Motorrad aus dem Modelljahr 2026 verfügt über moderne Fahrerassistenzsysteme und repräsentiert den aktuellen Stand der Serienentwicklung im Motorradbereich. Für die vorliegende Untersuchung ist insbesondere das integrierte radarbasierte Kollisionswarnsystem von Bedeutung. Erkennt das System eine kritische Annäherung, erfolgt zunächst eine optische Warnung über das Fahrzeugdisplay. Zusätzlich wird der Fahrer durch einen kurzen Bremsimpuls bzw. einen spürbaren Ruck des Motorrads haptisch auf die Gefahrensituation aufmerksam gemacht. Darüber hinaus verfügt das System über eine Bremsunterstützungsfunktion. Erkennt das Motorrad eine drohende Kollision und der Fahrer leitet eine Bremsung ein, unterstützt das System den Bremsvorgang durch eine situationsabhängige Anpassung der Bremsleistung. Das Kollisionswarnsystem kann hierbei in den Geschwindigkeitsbereich von 30 bis 160 km/h den vorrausfahrenden Verkehr überwachen und eingreifen. Im Gegensatz zu automatischen Notbremsassistentensystemen erfolgt jedoch kein selbstständiger Bremseneingriff ohne Fahreraktion. Die Abbildung 13 zeigt eine Auswahl als Datenblatt an technischen Merkmalen und Assistenzsystemen des Motorrades.

BMW R 1300 GS Triple Black – Technische Merkmale und Assistenzsysteme				
Technische Kenndaten			Fahrerassistenzsysteme und Ausstattung	
	Fahrzeugtyp	Reiseenduro		ABS-System BMW Motorrad ABS Pro
	Motorbauart	Luft-/flüssigkeitsgekühlter Zweizylinder-Boxermotor mit BMW ShiftCam		Traktionskontrolle Dynamic Traction Control (DTC)
	Hubraum	1.300 cm³		Motorschleppmomentregelung MSR (Engine Brake Control)
	Nennleistung	107 kW (145 PS) bei 7.750 min⁻¹		Adaptiver Tempomat Active Cruise Control (ACC) mit Abstandsregelung
	Max. Drehmoment	149 Nm bei 6.500 min⁻¹		Frontkollisionswarnung Front Collision Warning (FCW)
	Getriebe	6-Gang-Getriebe		Spurwechselwarnung Lane Change Warning (optional)
	Antrieb	Kardantrieb (Paralever)		Fahrmodi Rain, Road, Eco, Enduro, Dynamic
	Vorderradführung	BMW Telelever		Fahrwerksregelung Dynamic Suspension Adjustment (DSA)
	Hinterradführung	BMW Paralever		Lichtsystem Voll-LED-Matrixscheinwerfer mit Kurvenlicht
	Federweg vorn / hinten	190 mm / 200 mm		Instrumentenkombination TFT-Farbdisplay mit verschiedenen Ansichten (z. B. Pure Ride, Sport)
	Bremsanlage	Doppelscheibenbremse vorne, Scheibenbremse hinten		
	Leergewicht fahrbereit	ca. 237 kg		
	Tankinhalt	19 l		
	Höchstgeschwindigkeit	> 200 km/h		

Abbildung 13: BMW R 1300 GS - Technische Merkmale: [Eigene Darstellung] [48]

Abbildung 14 und 15 zeigen die Einstellmöglichkeiten der Frontkollisionswarnung (FCW) der BMW R 1300 GS. Über das Fahrzeugmenü kann die Warnschwelle des Systems in den Stufen früh, mittel und spät angepasst oder vollständig deaktiviert werden. Dieser Menüunterpunkt ist in den Einstellungen unter Assistenzsysteme zu finden. Die gewählte Einstellung beeinflusst den Zeitpunkt, zu dem das System den Fahrer vor einer potenziellen Kollision warnt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Art der Systemreaktion festzulegen. Neben einer reinen Warnfunktion kann eine Bremsunterstützung aktiviert werden, bei der das System den Fahrer durch einen automatischen Aufbau von Bremsdruck unterstützt. Für die Versuchsreihe wurden die jeweiligen Einstellungen dokumentiert und entsprechend der definierten Versuchsszenarien angepasst, um deren Einfluss auf das Warn- und Eingriffsverhalten des Systems untersuchen zu können.



Abbildung 14: Menüpunkt Frontkollisionswarnung BMW GS: [Eigene Darstellung] [40]



Abbildung 15: Menüpunkt Frontkollisionswarnung BMW GS: [Eigene Darstellung] [40]

Die BMW R 1300 GS eignet sich daher besonders für die Untersuchung des Einflusses eines Kollisionswarnsystems auf das Reaktions- und Bremsverhalten des Fahrers. Um fahrzeugbedingte Einflüsse auszuschließen, werden sämtliche Versuche mit demselben Motorrad und demselben Fahrer durchgeführt. Gleichzeitig gewährleistet die Verwendung eines serienmäßigen Fahrzeugs eine hohe Praxisnähe der Untersuchung und ermöglicht eine realistische Bewertung des Potenzials radarbasierter Fahrerassistenzsysteme im Motorradbereich. Abbildung 16 zeigt das Versuchsfahrzeug mit dem BMW Fahrerassistenzpaket, welches Systeme wie ACC und FCW beinhaltet.



Abbildung 16: BMW GS 1300 mit Fahrassistenz-Paket (ACC, FCW...): [Eigene Darstellung] [40]

5.2 Versuchsfahrzeug 2 – PKW

Als zweites Versuchsfahrzeug wurde ein Mercedes-Benz Vito 120 CDI der Baureihe W639 eingesetzt. Abbildung 17 zeigt das Versuchsfahrzeug 2 im Vordergrund und ebenso das Versuchsfahrzeug 1 im Hintergrund. Das Fahrzeug diente im Rahmen der Versuchsreihe als bewegtes Hindernis bzw. als vorausfahrendes Zielobjekt für das radar-gestützte Kollisionswarnsystem des Motorrads. Aufgrund seiner Fahrzeuggröße, der geschlossenen Karosseriestruktur und der metallischen Außenkontur stellt der Vito ein realistisches Zielobjekt für eine dynamische Auffahrsituation dar. Insbesondere die Breite, Höhe und ausgeprägte Heckfläche begünstigen eine zuverlässige Radarreflexion und ermöglichen dem Assistenzsystem eine realitätsnahe Erfassung des vorausfahrenden Fahrzeugs. Damit eignet sich der Mercedes-Benz Vito besonders zur Untersuchung des Systemverhaltens bei Annäherung an ein bremsendes Fahrzeug im Straßenverkehr.

Abbildung 18 zeigt eine Übersicht der Technischen Merkmale und weist auf die Abmaße des Versuchsfahrzeuges hin. Das genutzte Versuchsfahrzeug hat eine Laufleistung von ca. 190000km und ist Kompakt Modell.



Abbildung 17: Versuchsfahrzeug 2 - Mercedes Vito: [Eigene Darstellung] [40]

Mercedes-Benz Vito 120 CDI (W639, Bj. 2007) - Technische Merkmale und Abmessungen				
Technische Kenndaten			Abmessungen und Versuchsrelevanz	
(Typ)	Fahrzeugtyp	Kleintransporter / Kombi	(L1)	Länge kompakt 4.748 mm
(W639)	Baureihe / Typ	Mercedes-Benz Vito W639	(L2)	Länge lang 4.993 mm
(Bj.)	Baujahr	2007	(L3)	Länge extralang 5.223 mm
(V6)	Motorbauart	3,0-l-V6-CDI-Dieselmotor (OM 642)	(B)	Breite 1.901 mm ohne Außenspiegel
(cm³)	Hubraum	2.987 cm³	(H)	Höhe ca. 1.900-1.942 mm je nach Ausführung
(kW)	Nennleistung	150 kW (204 PS) bei 3.800 min⁻¹	(WB)	Radstand 3.200 mm / 3.430 mm
(Nm)	Max. Drehmoment	440 Nm bei 1.600-2.400 min⁻¹	(↔)	Außenkontur große, geschlossene Karosseriefläche
(AT)	Getriebe	5-Gang-Automatik	(■)	Fahrzeugstruktur metallische Struktur mit günstiger Radarreflexion
(RWD)	Antrieb	Hinterradantrieb	(FCW)	Versuchsrelevanz realistisches Zielobjekt für Frontkollisionswarnung
(Test)	Einsatz im Versuch	bewegtes Hindernis / vorausfahrendes Fahrzeug	(!)	Hinweis konkrete Versuchswerte am Fahrzeug ggf. nachmessen

Abbildung 18: Versuchsfahrzeug 2 - Technische Merkmale und Abmessungen: [Eigene Darstellung] [48]

5.3 Versuchsgelände

Zur Durchführung der Versuche wurden zwei unterschiedliche Streckenabschnitte genutzt. Die Auswahl der Versuchsgelände erfolgte unter Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungen der beiden Versuchsreihen. Während für die Untersuchung des stehenden Hindernisses ein vollständig abgesperrter Streckenabschnitt genutzt wurde, erfolgte die Untersuchung des bewegten Hindernisses auf einer verkehrsarmen öffentlichen Straße unter kontrollierten Bedingungen.

5.3.1 Versuchsgelände – Versuchsreihe 1

Die Versuchsreihe 1 wurde auf einer abgesperrten Teststrecke im Landkreis Leipzig bei Zwenkau durchgeführt. Hierfür stand ein etwa 150 m langer asphaltierter Wirtschaftsweg zur Verfügung, der für die Dauer der Versuche vollständig gesichert und ausschließlich für die Versuchsdurchführung genutzt wurde. Dieser Wirtschaftsweg ist auf Abbildung 19 zu sehen.



Abbildung 19: Übersicht der geraden Teststrecken zur Durchführung des Fahrversuchs: [Eigene Darstellung] [50]

Die Strecke ist eben und wies einen geradlinigen Verlauf sowie eine homogene Asphaltoberfläche auf und bot damit geeignete Voraussetzungen für reproduzierbare Fahrversuche. Darüber hinaus gewährleistete die Nutzung derselben Strecke für alle Versuchsdurchgänge konstante Randbedingungen hinsichtlich Fahrbahnbeschaffenheit, Streckenführung und Sichtverhältnissen. Alle Versuche werden unter vergleichbaren Umweltbedingungen durchgeführt:

- Tageslicht
- trockene Fahrbanoberfläche
- Außentemperatur von etwa 25°C

Abbildung 20 zeigt eine Skizze als Draufsicht zum Aufbau der Versuchsreihe 1 mit integriertem Versuchsfahrzeug 1 und verrückbarem Hindernis.

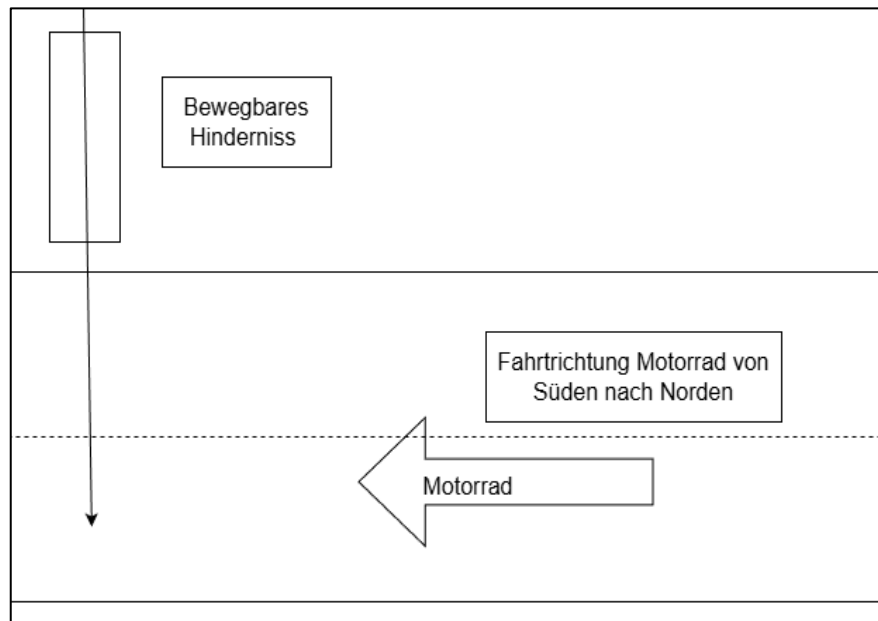


Abbildung 20: Überblick Draufsicht Versuchsreihe 1: [Eigene Darstellung] [49]

Die gewählte Versuchsstrecke ermöglichte somit die sichere Durchführung der Versuche sowie eine hohe Vergleichbarkeit der erhobenen Messdaten. Abbildung 21 zeigt einen Teil der Versuchsstrecke mit bereits integriertem stehendem Hindernis.



Abbildung 21: Versuchsaufbau mit Karton als Hindernis und 5m Markierung: [Eigene Darstellung] [40]

5.3.2 Versuchsgelände – Versuchsreihe 2

Die Versuchsreihe 2 wurde auf einem etwa 450 m langen Straßenabschnitt durchgeführt (Abbildung 22). Die ausgewählte Strecke zeichnet sich durch ein sehr geringes Verkehrsaufkommen aus und bietet aufgrund ihres geradlinigen Verlaufs geeignete Voraussetzungen für die Durchführung reproduzierbarer Fahrversuche mit einem vorausfahrenden Fahrzeug.



Abbildung 22: Übersicht der geraden Teststrecken zur Durchführung des Fahrversuchs: [Eigene Darstellung] [50]

Die Länge der Strecke ermöglichte eine ausreichend lange Beschleunigungs- und Messphase, sodass die definierten Fahrzustände zuverlässig hergestellt werden konnten. Während der Versuchsdurchführung wurde auf den übrigen Straßenverkehr besondere Rücksicht genommen. Die Versuche wurden ausschließlich bei freier Strecke und unter sicheren Verkehrsbedingungen durchgeführt.

Die Strecke, wie auf Abbildung 23 zu sehen, ist eben und wies ebenso einen geradlinigen Verlauf sowie eine homogene Asphaltoberfläche auf und bot damit geeignete Voraussetzungen für reproduzierbare Fahrversuche. Darüber hinaus gewährleistete die Nutzung derselben Strecke für alle Versuchsdurchgänge der Versuchsreihe 2 konstante Randbedingungen. Alle Versuche werden unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt:

- Tageslicht
- trockene Fahrbahnoberfläche
- Außentemperatur von etwa 25°C
- Fahrbahnbeschaffenheit und Streckenführung

Durch die geringe Verkehrsdichte sowie die konstanten Streckenverhältnisse konnten die für die Untersuchung erforderlichen Fahrmanöver sicher und mit hoher Wiederholgenauigkeit durchgeführt werden. Die gewählte Versuchsumgebung ermöglichte somit die praxisnahe Untersuchung des Kollisionswarnsystems in einer dynamischen Verkehrssituation mit einem vorausfahrenden Fahrzeug.



Abbildung 23: Versuchsaufbau mit Auto als Hindernis: [Eigene Darstellung] [40]

Abbildung 24 zeigt eine Draufsicht der Versuchsreihe 2 mit integriertem Versuchsfahrzeug 1 und 2 in gleicher Fahrtrichtung. Gleichzeitig ist das am Versuchsfahrzeug 2 befestigte grüne Abstandsseil mit einer Länge von 6 m zu erkennen.

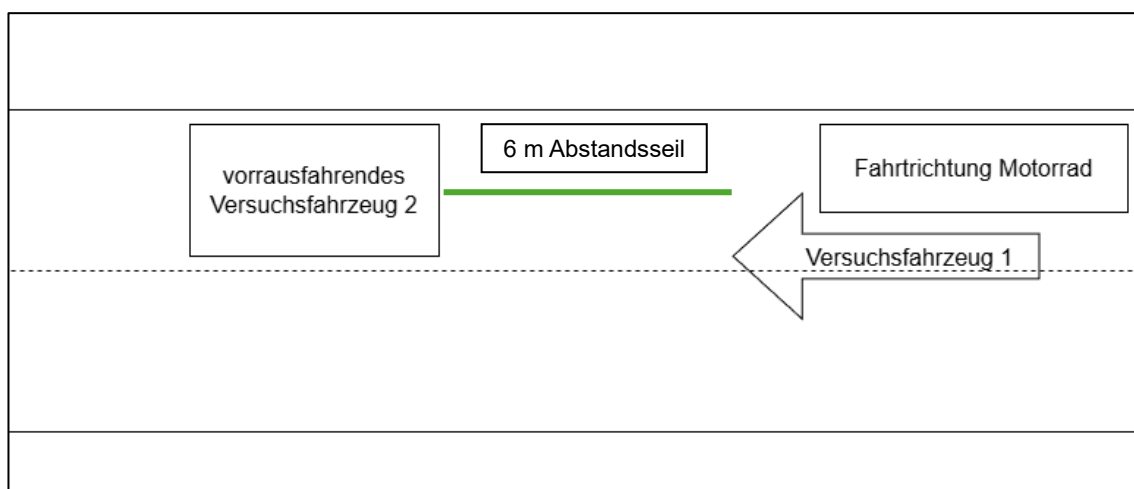


Abbildung 24: Überblick Draufsicht Versuchsreihe 2: [Eigene Darstellung] [49]

5.4 Beschreibung stehendes Hindernis

Für die Versuchsreihe mit dem stehenden Hindernis wurde ein speziell angefertigtes Versuchshindernis verwendet. Dieses bestand aus zwei miteinander verbundenen Kartons, die vollständig mit Aluminiumfolie verkleidet wurden. Die Verwendung der Aluminiumfolie diente dazu, die Reflektion der vom Radarsensor ausgesendeten elektromagnetischen Wellen zu erhöhen und somit eine zuverlässige Erkennung durch das radarbasierte Kollisionswarnsystem des Motorrads sicherzustellen. Durch die reflektierende Oberfläche konnte ein für den Sensor gut detektierbares Zielobjekt geschaffen werden.



Abbildung 25: Hindernis Karton für Versuch präpariert: [Eigene Darstellung]

Abbildung 25 zeigt die Abmessungen des Hindernisses (Breite: 1,80 m und Höhe 1,60 m), welche so gewählt wurden, dass sie näherungsweise die Stirnfläche eines Personenkraftwagens abbilden. Dadurch sollte eine möglichst realitätsnahe Simulation eines stehenden Fahrzeugs im Verkehrsraum erreicht werden. Gleichzeitig war das verwendete Material ausreichend leicht und nachgiebig, sodass bei einem unbeabsichtigten Kontakt keine Beschädigungen am Versuchsfahrzeug oder Gefährdungen für den Fahrer zu erwarten waren.

Für alle Versuchsdurchgänge wurde das Hindernis in identischer Ausführung verwendet und an einer definierten Position auf der Versuchsstrecke platziert bzw. während der Zufallsversuche in den Fahrbereich eingebracht. Dadurch konnten konstante Versuchsbedingungen und eine hohe Vergleichbarkeit der Messergebnisse gewährleistet werden.

5.5 Beschreibung bewegtes Hindernis

Für die Versuchsreihe mit dem bewegten Hindernis wurde ein Mercedes Vito als vorausfahrendes Versuchsfahrzeug eingesetzt, welcher in Abbildung 26 sichtbar ist. Der Kleintransporter besitzt eine Fahrzeugbreite von etwa 1,90 m sowie eine Fahrzeughöhe von etwa 1,90 m und stellt damit ein typisches Fahrzeug dar, das im realen Straßenverkehr häufig anzutreffen ist. Die Wahl des Fahrzeugs erfolgte bewusst, da die vergleichsweise große Stirnfläche eine zuverlässige Erkennung durch die Umfeldsensorik des Motorrads ermöglicht. Gleichzeitig repräsentiert der Mercedes Vito ein realistisches Zielobjekt für Auffahr- und Annäherungssituationen, wie sie im täglichen Straßenverkehr auftreten können.



Abbildung 26: Hindernis Mercedes Vito für Versuch präpariert: [Eigene Darstellung] [40]

Während der Versuchsdurchführung fuhr der Kleintransporter als Führungsfahrzeug vor dem Motorrad und leitete an einem definierten Punkt der Versuchsstrecke eine zuvor festgelegte Bremsung ein. Hierdurch entstand eine reproduzierbare Annäherungssituation, welche die Untersuchung des Reaktions- und Bremsverhaltens des Motorradfahrers unter realitätsnahen Bedingungen ermöglichte. Zu Beginn jedes Versuchsdurchgangs wurde ein Abstand von ca. 6 m zwischen Motorrad und Versuchsfahrzeug eingehalten. Dies wurde mit einem hinterher schleifenden Seil mit der Länge 6 m, befestigt an der Anhängerkupplung des Mercedes umgesetzt. Die Geschwindigkeit beider Fahrzeuge betrug zunächst konstant 48 bis 50 km/h. Durch die standardisierte Versuchsdurchführung konnten vergleichbare Randbedingungen für alle Messfahrten geschaffen werden.

6 Versuchsdurchführung

Um aussagekräftige und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, werden alle Versuche nach einem einheitlichen Ablaufplan durchgeführt und detailliert dokumentiert. Die Messfahrten finden am 06.06.2026 unter standardisierten Rahmenbedingungen statt.

Zur systematischen Analyse bilden Videoaufzeichnungen, Fotodokumentationen sowie handschriftlich erfasste Beobachtungsdaten die Grundlagen.

Die Kameraperspektiven ermöglichen eine detaillierte Beurteilung der folgenden Parameter:

- Systemreaktion: visuelle und haptische Warnung (Fahrerperspektive: Abbildung 27)
- Abstand zum Hindernis bei Stillstand: manuell vor Ort gemessen (Abbildung 22)
- Fahrverhalten und Annäherung beobachtet anhand der Front- und Schrägperspektive
- Geschwindigkeit und Zeitverlauf dokumentiert durch Timestamp Camera [40]



Abbildung 27: Versuch mit Aktivierten FCW und rotem Symbol als Warnung für mögliche Kollision: [Eigene Darstellung] [40]

Bereits vor Beginn der eigentlichen Versuchsreihe wird das Versuchsfahrzeug 1 einer Untersuchung bzw. einem Funktionstest unterzogen. Dabei werden die technischen Hauptkomponenten überprüft und festgestellt, ob das Fahrzeug sich in einem einwandfreien Zustand befindet. Das Fahrzeug befand sich mit einer Laufleistung von circa 2000km in einem allgemein guten Zustand bezüglich Reifen, Bremssystem und Fahrwerktechnik. Erst nach erfolgreicher Validierung werden die Hauptversuche durchgeführt. Während der gesamten Untersuchungsreihe werden alle festgelegten Sicherheitsmaßnahmen eingehalten. Durch die konsequente Standardisierung der Abläufe können äußere Einflüsse minimiert und eine hohe Reproduzierbarkeit sowie Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse sichergestellt werden. Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit wurde bei allen Bremsvorgängen ausschließlich die Vorderradbremse über den Handbremshebel betätigt. Die Hinterradbremse bzw. Fußbremse wurde während der Versuche bewusst nicht verwendet. Dadurch sollte ein möglichst einheitliches Bremsverhalten über alle Versuchsdurchgänge hinweg erreicht werden. Gleichzeitig konnte so der Einfluss unterschiedlicher Bremskraftverteilungen durch den Fahrer reduziert werden.

Alle Ergebnisse werden nach jeder Versuchsfahrt in einer vorbereitete Ergebnistabelle eingetragen. Zur Auswertung des zeitlichen Ablaufs der FCW-Reaktionen werden die aufgezeichneten Versuchsvideos herangezogen. Die Analyse erfolgt mithilfe der App Timestamp Camera [40], da diese die Aufnahmen mit einer durchgehenden Zeitangabe versieht. Dadurch lassen sich relevante Ereignisse innerhalb eines Versuchsdurchlaufs zeitlich eindeutig zuordnen. Insbesondere kann bestimmt werden, wann die erste optische Warnmeldung im Display erscheint und in welchem zeitlichen Abstand anschließend ein Bremsengriff erfolgt. Auf diese Weise lassen sich einzelne Versuche detailliert nachvollziehen und zeitliche Abläufe, wie etwa der Zeitraum vom Warnhinweis bis zum Stillstand des Motorrads, rekonstruieren. Die ermittelten Zeiten werden zusätzlich zur beobachteten Systemreaktion dokumentiert und als ergänzende Messgröße in die Versuchsauswertung aufgenommen.

6.1 Vorbereitung vor jedem Durchlauf

Zunächst wurde die Position des Hindernisses anhand zuvor angebrachter Markierungen kontrolliert, um dessen exakte Platzierung für jeden Durchlauf sicherzustellen.

Anschließend erfolgte die Überprüfung der Fahrzeugeinstellungen. Dabei wurde kontrolliert, ob das Kollisionswarnsystem FCW entsprechend dem Versuchsplan aktiviert (Abbildung 28) oder deaktiviert (Abbildung 29) war. Bei Versuchsreihe 1 und 2 mit Aktivierten FCW stand die Einstellung jeweils mit früher Warnung, aktivierter Bremsunterstützung und Warnimpuls gleich. Im Gegensatz zu Versuchsreihe 1 und 2 mit Deaktiviertem FCW, bei denen die Einstellung Frontkollisionswarnung ausgeschaltet war. Zudem wurde sichergestellt, dass sich das Fahrzeug im Fahrmodus Road befand. Vor Beginn der Messfahrt stimmten sich der Testfahrer und die am Hindernis eingesetzte Hilfsperson über den bevorstehenden Versuchsablauf ab, um einen reibungslosen und sicheren Ablauf zu gewährleisten.



Abbildung 28: Gewählte Einstellung FCW bei Aktivierten Versuchsfahrten: [Eigene Darstellung] [40]



Abbildung 29: Gewählte Einstellung FCW bei Deaktivierten Versuchsfahrten: [Eigene Darstellung] [40]

Darüber hinaus wurde vor jedem Durchlauf überprüft, ob sämtliche Kamerasysteme ordnungsgemäß aufzeichneten und die erforderlichen Bilddaten erfasst wurden.

Die Reifendrücke des Versuchsfahrzeuges wurden vor Beginn der gesamten Versuchsreihe sowie nach deren Abschluss kontrolliert. Dabei ergab sich für beide Messungen ein identischer Reifendruck von 2,2 bar, sodass ein Einfluss veränderter Reifenparameter auf die Versuchsergebnisse nur geringfügige Auswirkungen haben kann.

Erst nach Abschluss aller Kontroll- und Vorbereitungsmaßnahmen wurde der jeweilige Versuchsdurchlauf gestartet.

6.2 Videodokumentation der Versuche

Zur Dokumentation und späteren Auswertung der Versuchsdurchläufe wurden sämtliche Versuche videografisch aufgezeichnet. Die primäre Aufzeichnung erfolgte aus der Perspektive des Testfahrers, um sowohl die Fahrsituation als auch die Reaktionen der Fahrerassistenzsysteme möglichst realitätsnah erfassen zu können. Hierfür wurde ein iPhone 16 Pro verwendet, das am Helm bzw. am Körper des Testfahrers befestigt war. Die Aufnahmen wurden mithilfe der Smartphone-Anwendung Timestamp Camera [40] erstellt, wodurch jede Videoaufnahme mit einer fortlaufenden Zeitinformation versehen wurde. Dies erleichtert die spätere Zuordnung und Analyse der einzelnen Versuchereignisse.

Ergänzend dazu wurden ausgewählte Versuchsdurchläufe mit einer weiteren Kamera aus externer Perspektive aufgezeichnet. Hierbei kam ebenfalls ein iPhone 16 Pro zum Einsatz, das eine Übersicht über den gesamten Versuchsaufbau sowie die Annäherung des Fahrzeugs an das Hindernis ermöglichte. Diese Aufnahmen dienten insbesondere der visuellen Kontrolle des Versuchsablaufs und der Plausibilisierung der Messergebnisse. Zusätzlich wurden während der Versuchsreihe Aufnahmen mit einer Canon EOS 600D mit einem Canon 28-135 Objektiv erstellt. Diese dienten vor allem der fotografischen Dokumentation des Versuchsaufbaus, der Fahrzeugpositionen sowie einzelner Versuchssituationen. Durch die Kombination aus Fahrerperspektive, welche in Abbildung 30 zu sehen ist, Außenaufnahmen und fotografischer Dokumentation konnte eine umfassende Erfassung der Versuche sichergestellt werden, die sowohl die Auswertung als auch die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse unterstützt.



Abbildung 30: Versuchsfahrer mit Kameraperspektive aus Fahrersicht: [Eigene Darstellung] [40]

6.3 Versuchsdurchführung – Versuchsreihe 1

Die Versuchsreihe 1 diente der Untersuchung des Verhaltens des Fahrers bei Annäherung an ein stehendes Hindernis. Hierbei wurde eine Gefahrensituation simuliert, bei der sich ein Hindernis im Fahrbereich des Motorrads befindet. Die Versuchsgeschwindigkeit betrug hierbei etwa 40 km/h.

Der Fahrer beschleunigte das Motorrad zunächst auf die definierte Geschwindigkeit und fuhr anschließend mit möglichst konstanter Geschwindigkeit in Richtung des Hindernisses. Je nach Versuchsdurchgang war das Kollisionswarnsystem aktiviert oder deaktiviert bzw. wurde dessen Wirkung nicht bewusst genutzt. Bei aktiviertem System wurde beobachtet, ob und zu welchem Zeitpunkt eine Warnung durch das Motorrad erfolgte. Die Warnung müsste sowohl optisch über das Display als auch haptisch durch einen kurzen Bremsimpuls bzw. Ruck des Motorrads wahrgenommen werden. Bei der Hälfte der Versuche wurde zufällig, vom Versuchshelfer bestimmt, das Hindernis in Form des umwickelten Kartons in die Fahrstrecke des Motorrads gezogen. Auf dieses zufällige Ereignis musste der Versuchsfahrer je nach Versuchsreihe mit oder Ohne Kollisionswarnsystem reagieren und die Bremsung einleiten.

Sobald der Fahrer die Gefahrensituation wahrnahm oder eine Systemwarnung erfolgte, wurde die Bremsung über die Vorderradbremse eingeleitet. Nach jedem Versuch sollte der bleibende Abstand vom Vorderrad des Motorrads zum Hindernis mit einem passenden Maßband gemessen und dokumentiert (Abbildung 31).



Abbildung 31: Versuch mit eingezogenem Hindernis und Bremsung ohne FCW bis zum Stillstand: [Eigene Darstellung] [40]

Um die Systemgrenzen des Kollisionswarnsystems zu untersuchen, wurden einzelne Versuchsdurchgänge bewusst bis in einen kritischen Bereich hinein durchgeführt. Die Sicherheit des Fahrers hatte dabei zu jedem Zeitpunkt Vorrang vor der vollständigen Durchführung eines Versuchsdurchgangs. Durch die wiederholte Durchführung der Fahrten mit und ohne aktive Systemunterstützung sollten Unterschiede im Reaktions- und Bremsverhalten erfasst und anschließend miteinander verglichen werden.

Während der Durchführung der Versuchsreihe 1 zeigte sich, dass das Kollisionswarnsystem in diesem Szenario keine Warnung auslöste. Trotz wiederholter Annäherung an das Hindernis erfolgte weder eine optische Warnung über das Display noch eine haptische Rückmeldung durch einen Bremsimpuls. Aus Sicherheitsgründen wurden die Versuchsdurchgänge daher jeweils durch eine Gefahrenbremsung oder ein Ausweichmanöver (Abbildung 32) abgebrochen, sobald eine kritische Annäherung an das Hindernis erreicht wurde.



Abbildung 32: Versuch mit anschließendem Ausweichen vor Hindernis: [Eigene Darstellung] [40]

Daher konnten für die Versuchsreihe 1 mit aktiviertem FCW keine verwertbaren Messwerte erhoben werden. Die Versuchsreihe wird folglich nicht quantitativ ausgewertet, sondern zur Beschreibung des Systemverhaltens gegenüber stehenden Hindernissen herangezogen. Damit liefert sie dennoch eine relevante Erkenntnis hinsichtlich der Einsatzgrenzen des untersuchten Kollisionswarnsystems.

6.4 Versuchsdurchführung – Versuchsreihe 2

Die Versuchsreihe 2 untersuchte eine dynamische Fahrsituation mit einem vorausfahrenden Fahrzeug. Als bewegtes Hindernis wurde ein Mercedes Vito eingesetzt, der vor dem Versuchsfahrzeug 1 fuhr und während des Durchgangs eine gleichbleibende Verzögerung einleitete. Die Versuchsgeschwindigkeit betrug hierbei etwa 50 km/h. Um das Risiko einer Kollision zu minimieren, fuhr das Motorrad während der Versuche leicht seitlich versetzt hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug, zu erkennen auf Abbildung 33. Der seitliche Versatz wurde so gewählt, dass eine sichere Versuchsdurchführung möglich war und gleichzeitig weiterhin eine realitätsnahe Annäherungssituation an das vorausfahrende Fahrzeug vorlag.



Abbildung 33: Versuchsaufbau Fahrerperspektive mit eingehaltenem Abstand vor Bremsversuch: [Eigene Darstellung] [40]

Nach Erreichen der definierten Geschwindigkeit fuhr das Motorrad mit konstantem Abstand hinter dem Versuchsfahrzeug (Abbildung 34). Anschließend leitete der Mercedes Vito eine möglichst gleichbleibende Verzögerung ein. Der Motorradfahrer reagierte auf die Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs bzw. auf eine mögliche Warnung des Kollisionswarnsystems. Auch in dieser Versuchsreihe wurde ausschließlich mit der Vorderradbremse gebremst.

Nach jedem Versuchsdurchgang wurde der verbleibende Abstand zwischen Motorrad und vorausfahrendem Fahrzeug erfasst und dokumentiert. Dieser Abstand dient als zentrale Kenngröße zur Bewertung der Sicherheitsreserve. Zusätzlich wurden das Reaktionsverhalten des Fahrers und der Ablauf des Bremsvorgangs mithilfe der Videodokumentation aufgezeichnet.

Durch diese Versuchsreihe konnte untersucht werden, ob das Kollisionswarnsystem bei einer realitätsnahen Auffahrsituation zu einer früheren Reaktion des Fahrers führt und dadurch ein größerer Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug erhalten bleibt.



Abbildung 34: Versuchsfahrt mit Auto als bewegtes Hindernis 6m voraus: [Eigene Darstellung] [40]

7 Auswertung der Messergebnisse

In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung der im Rahmen der Fahrversuche erhobenen Daten. Dabei werden die beiden durchgeführten Versuchsreihen getrennt betrachtet, da sie unterschiedliche Fahrsituationen abbilden.

Die Versuchsreihe 1 dient vor allem der qualitativen Bewertung einer funktionalen Systemgrenze, da das Kollisionswarnsystem in diesem Szenario keine Warnung auslöste. Eine quantitative Gegenüberstellung zwischen aktiviertem und deaktiviertem System ist daher für diese Versuchsreihe nicht möglich.

Die Versuchsreihe 2 bildet die Grundlage der quantitativen Auswertung. Hierbei werden die Fahrten mit aktiviertem und deaktiviertem Kollisionswarnsystem miteinander verglichen. Als zentrale Bewertungsgröße dient der verbleibende Abstand zwischen Motorrad und vorausfahrendem Fahrzeug nach dem Bremsvorgang.

7.1 Vorgehensweise der Datenauswertung

Zunächst wird die Versuchsreihe 1 hinsichtlich der beobachteten Systemreaktion bewertet. Anschließend erfolgt die quantitative Analyse der Versuchsreihe 2.

Für die Versuchsreihe 2 werden die Messwerte der Fahrten mit aktiviertem und deaktiviertem Kollisionswarnsystem gegenübergestellt.

Die Messwerte werden tabellarisch erfasst und anschließend statistisch ausgewertet. Hierzu werden für Versuchsreihe 2 Mittelwert, minimale und maximale Messwerte sowie die Streuung der Ergebnisse bestimmt. Der Mittelwert dient dabei als zentrale Vergleichsgröße zur Bewertung der durchschnittlichen Systemwirkung. Zur Beschreibung der mittleren Sicherheitsreserve wird der arithmetische Mittelwert der gemessenen Abstände gebildet.

Der Vergleich der beiden Versuchsgruppen ermöglicht eine Aussage darüber, ob das Kollisionswarnsystem zu einer größeren verbleibenden Sicherheitsreserve führt. Eine größere mittlere Distanz zum vorausfahrenden Fahrzeug nach dem Bremsvorgang wird dabei als Hinweis auf eine frühere Reaktion bzw. eine verbesserte Unterstützung des Fahrers gewertet.

7.2 Auswertung der Versuchsreihe 1

Die Versuchsreihe 1 konnte nicht wie ursprünglich geplant quantitativ ausgewertet werden. Während der Durchführung zeigte sich, dass das Kollisionswarnsystem bei der Annäherung an das stehende Hindernis keine Warnung auslöste. Es erfolgte weder eine optische Warnung über das Display noch eine haptische Rückmeldung durch einen Bremsimpuls. Da somit keine Systemreaktion festgestellt werden konnte, lagen keine Messwerte für das angeschaltete Kollisionswarnsystem vor. Ein direkter Vergleich zwischen Fahrten mit und ohne Systemunterstützung war daher in diesem Szenario nicht möglich.

Dieses Ergebnis stellt dennoch eine wichtige Erkenntnis der Untersuchung dar. Es zeigt, dass das untersuchte Kollisionswarnsystem nicht bzw. nur eingeschränkt für stehende Hindernisse ausgelegt ist. Die Funktion des Systems ist vielmehr auf dynamische Annäherungssituationen mit vorausfahrenden Fahrzeugen ausgerichtet. Aus sicherheitstechnischer Sicht ist diese Beobachtung relevant, da stehende Hindernisse im realen Straßenverkehr, beispielsweise Stauenden oder liegengebliebene Fahrzeuge, potenzielle Gefahrensituationen darstellen können. Die Ergebnisse der Versuchsreihe 1 verdeutlichen daher eine funktionale Grenze des untersuchten Systems.

Für die weitere quantitative Auswertung wird diese Versuchsreihe nicht herangezogen. Die Bewertung der Systemwirkung erfolgt daher auf Grundlage der Versuchsreihe 2.

7.3 Auswertung der Versuchsreihe 2

Die Versuchsreihe 2 bildet die Grundlage der quantitativen Bewertung des Kollisionswarnsystems. In dieser fuhr das Motorrad mit einem angelegtem Anfangsabstand von ca. 6 m hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug. Das vorausfahrende Fahrzeug leitete während des Versuchsdurchgangs eine Bremsung ein. Nach Abschluss des Bremsvorgangs wurde der verbleibende Abstand zwischen Motorrad und vorausfahrendem Fahrzeug gemessen.

7.3.1 Auswertung des verbleibenden Sicherheitsabstands

Die zentrale quantitative Messgröße der Versuchsreihe 2 ist der verbleibende Abstand zwischen Motorrad und vorausfahrendem Fahrzeug nach Abschluss des Bremsvorgangs. Dieser Abstand wird im Folgenden als Sicherheitsabstand bzw. Sicherheitsreserve betrachtet. Die Bezugspunkte für die Messung waren hierbei:

- die Achse des Vorderrades vom Versuchsfahrzeug 1
- die Anhängerkupplung vom vorausfahrendem Versuchsfahrzeug 2

Der verbleibende Sicherheitsabstand stellt die wichtigste objektiv messbare Größe zur Bewertung der Systemwirkung dar. Die Messgröße erlaubt einen direkten Vergleich zwischen den Versuchsdurchgängen mit aktiviertem und deaktiviertem Kollisionswarnsystem. Für die Auswertung wurden jeweils zehn Versuchsdurchgänge betrachtet. Zu Beginn jedes Versuchsdurchgangs betrug der Abstand zwischen Motorrad und vorausfahrendem Fahrzeug 6 m. Nach dem Bremsvorgang wurde der verbleibende Abstand zwischen beiden Fahrzeugen gemessen und dokumentiert.

Die Messergebnisse der Versuchsreihe 2 sind in Tabelle 3 und in Abbildung 35 als Säulendiagramm dargestellt.

Tabelle 3: Gemessener verbleibender Abstand zwischen Versuchsfahrzeug 1 und 2: [Eigene Darstellung]

Versuch X	Versuchsreihe 2-XA	Versuchsreihe 2-XN
1	5,12 m	3,92 m
2	4,47 m	3,87 m
3	5,31 m	2,98 m
4	4,74 m	4,35 m
5	4,95 m	3,36 m
6	4,48 m	3,55 m
7	6,10 m	4,38 m
8	5,22 m	3,90 m
9	6,19 m	3,81 m
10	4,59 m	4,23 m
Mittelwert $\bar{x}$	5,12 m	3,84 m

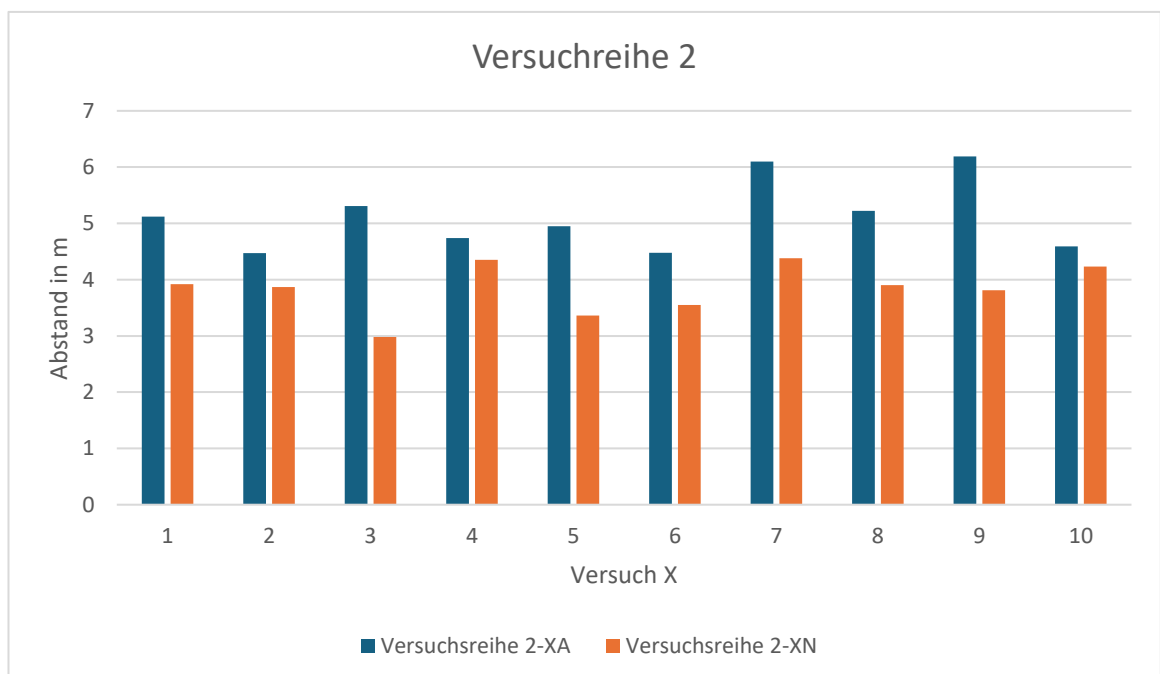


Abbildung 35: Versuchsreihe 2 als Säulendiagramm dargestellt: [Eigene Darstellung]

Bei aktiviertem Kollisionswarnsystem lagen die gemessenen Restabstände zwischen 4,47 m und 6,19 m. Der Mittelwert betrug 5,12 m. Ohne aktives Kollisionswarnsystem wurden Abstände zwischen 2,98 m und 4,38 m gemessen. Der Mittelwert lag hier bei 3,84 m.

Die statistische Auswertung der Messwerte ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Statistische Kennwerte des verbleibenden Sicherheitsabstandes: [Eigene Darstellung]

Kennwerte	Mit FCW aktiv	Ohne FCW aktiv
Anzahl der Versuche	10	10
Mittelwert $\bar{x}$	5,12 m	3,84 m
Median	5,04 m	3,89 m
Minimalwert	4,47 m	2,98 m
Maximalwert	6,19 m	4,38 m
Standartabweichung s	0,62 m	0,44 m

Die Berechnung der statistischen Kennwerte erfolgte auf Grundlage der gemessenen Einzelwerte. Es wurden Mittelwert, Median, Minimal- und Maximalwert sowie die Standardabweichung bestimmt. Der Mittelwert beschreibt den durchschnittlichen verbleibenden Sicherheitsabstand, während die Standardabweichung die Streuung der Messwerte um diesen Mittelwert angibt.

Mittelwert (Formel 2):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Standartabweichung (Formel 3):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Differenz der Mittelwerte (Formel 4):

$$\Delta s = \bar{x}_{FCW} - \bar{x}_{ohne}$$

Prozentuale Veränderung (Formel 5):

$$p = \frac{\Delta s}{\bar{x}_{ohne}} \times 100$$

Der direkte Vergleich der Mittelwerte zeigt, dass bei aktiviertem Kollisionswarnsystem im Durchschnitt ein deutlich größerer Sicherheitsabstand (Δs) zum vorausfahrenden Fahrzeug verblieb. Die Differenz der Mittelwerte beträgt:

$$\Delta s = 5,12 \text{ m} - 3,84 \text{ m} = 1,28 \text{ m}$$

Damit vergrößerte sich der verbleibende Abstand bei aktiviertem System im Mittel um 1,28m.

Bezogen auf den mittleren Abstand ohne Systemunterstützung ergibt sich eine prozentuale Erhöhung der Sicherheitsreserve von:

$$\frac{\Delta s}{\bar{x}_{ohne}} \times 100 \approx \frac{1,28 \text{ m}}{3,84 \text{ m}} \times 100 \approx 33,4 \%$$

Das aktivierte Kollisionswarnsystem führte somit im untersuchten Szenario zu einer durchschnittlichen Erhöhung des verbleibenden Sicherheitsabstands um etwa 33,4 %.

Der kleinste gemessene Abstand bei aktiviertem Kollisionswarnsystem betrug 4,47 m und lag damit oberhalb des Mittelwerts der Fahrten ohne Systemunterstützung. Ohne FCW wurde dagegen ein Minimalwert von 2,98 m gemessen. Dies zeigt, dass bei deaktiviertem System deutlich geringere Sicherheitsreserven auftraten.

Die Messwerte deuten darauf hin, dass das Kollisionswarnsystem in der untersuchten dynamischen Auffahrsituation einen positiven Einfluss auf das Brems- und Sicherheitsverhalten hatte.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Fahrten mit aktiviertem Kollisionswarnsystem im Mittel zu einem größeren verbleibenden Sicherheitsabstand führten. Damit zeigt die Versuchsreihe 2 eine messbare sicherheitstechnische Wirkung des Systems in einer praxisnahen Auffahrsituation.

7.3.2 Bewertung des Reaktionsverhaltens

Neben dem verbleibenden Sicherheitsabstand sollte auch das Reaktionsverhalten des Fahrers bewertet werden. Die Reaktionszeit bzw. die Zeitspanne bis zur Einleitung der Bremsreaktion stellt grundsätzlich eine wichtige Größe zur Beurteilung eines Kollisionswarnsystems dar, da eine frühere Bremsbetätigung unmittelbar Einfluss auf den verbleibenden Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug haben kann.

Auf Grundlage der Videodaten war jedoch keine exakte Bestimmung der Zeitspannen möglich. Zwar konnte das Aufleuchten der Bremsleuchten des vorausfahrenden Versuchsfahrzeuges als erkennbarer Beginn der Gefahrensituation herangezogen werden. Der genaue Zeitpunkt der Informationsaufnahme durch den Fahrer sowie der Beginn der bewussten motorischen Bremsreaktion konnten jedoch nicht eindeutig bestimmt werden.

Bei den Fahrten mit aktiviertem Kollisionswarnsystem zeigte sich, dass die Systemwarnung im Bildschirm meist geringfügig nach dem Aufleuchten der Bremsleuchten oder nahezu zeitgleich erschien. Dies kann damit erklärt werden, dass das radargestützte System zunächst die Annäherungssituation bzw. die kritische Verringerung des Abstands erfassen und bewerten muss, bevor eine Warnung ausgegeben wird.

Aus den Videodaten lässt sich dennoch für Versuchsreihe 2 mit und ohne FCW eine näherungsweise Einschätzung ableiten. Die Zeitspanne zwischen dem Aufleuchten der Bremsleuchten am vorausfahrenden Fahrzeug und der erkennbaren Bremsreaktion des Motorradfahrers lag im Bereich von etwa 0,3 s bis 0,5 s. Dieser Wert ist jedoch eine Schätzung, da weder Bremsdrucksensoren noch synchronisierte Fahrzeugdaten oder eine hochgenaue Zeitmessung zur Verfügung standen. Auch die Bildrate und Perspektive der Videoaufnahmen begrenzen die Genauigkeit der Auswertung.

Eine belastbare quantitative Bewertung der Reaktionszeit kann daher nicht vorgenommen werden. Insbesondere lässt sich nicht eindeutig nachweisen, ob die Displaywarnung allein zu einer Verkürzung der Reaktionszeit geführt hat. Die Bewertung des Kollisionswarnsystems erfolgt deshalb vorrangig über den verbleibenden Sicherheitsabstand zwischen Motorrad und vorausfahrendem Fahrzeug nach dem Bremsvorgang.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass das untersuchte System nicht ausschließlich optisch warnt. Zusätzlich unterstützt das System die Bremsung, sobald der Fahrer aktiv eingreift. Die gemessene Vergrößerung des Sicherheitsabstands ist daher als Gesamtwirkung aus optischer Warnung und Bremsunterstützung zu interpretieren und kann nicht eindeutig einer einzelnen Teilfunktion zugeordnet werden.

7.3.3 Einordnung Systemwirkung und Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Auswertung der Versuchsreihe 2 zeigt, dass bei aktiviertem Kollisionswarnsystem ein größerer verbleibender Sicherheitsabstand zwischen Motorrad und vorausfahrendem Fahrzeug erreicht wurde. Während ohne aktive Systemunterstützung ein mittlerer Abstand von 3,84 m gemessen wurde, betrug der mittlere Abstand bei aktiviertem Kollisionswarnsystem 5,12 m.

Die Differenz von 1,28 m entspricht einer Erhöhung der Sicherheitsreserve um etwa 33,4 %. Damit konnte eine messbare Verbesserung des sicherheitsrelevanten Abstandsverhaltens festgestellt werden.

Da die Reaktionszeit aus den Videodaten nur in einer Schätzung bestimmt werden konnte, ist eine direkte Aussage über eine Verkürzung der Reaktionszeit nicht möglich. Die größere verbleibende Distanz kann jedoch als Hinweis auf eine positive Gesamtwirkung des Systems interpretiert werden. Diese Wirkung ergibt sich aus dem Zusammenspiel von optischer Warnung, haptischem Bremsimpuls sowie der Bremsunterstützung nach Eingriff des Fahrers.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe 2 zeigen somit, dass das untersuchte Kollisionswarnsystem in einer dynamischen Auffahrsituation einen sicherheitstechnisch relevanten Beitrag leisten kann.

7.4 Bewertung der Hypothesen

Im Folgenden werden die in Kapitel 1.2 formulierten Hypothesen anhand der durchgeführten Versuche und der ausgewerteten Messdaten bewertet.

Bewertung von Hypothese H1

H1: Der Einsatz eines Kollisionswarnsystems verkürzt die Zeitspanne bis zur Einleitung der fahrerseitigen Bremsreaktion.

Diese Hypothese kann anhand der vorliegenden Daten nicht direkt bestätigt werden. Zwar ist anzunehmen, dass die optische Warnung, der haptische Bremsimpuls und die Bremsunterstützung einen Einfluss auf das Reaktions- und Bremsverhalten des Fahrers hatten, jedoch konnte die Reaktionszeit aus den Videodaten nicht mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden.

Eine belastbare quantitative Aussage zur Veränderung der Reaktionszeit ist daher hierbei nicht möglich. Die Hypothese H1 kann somit nicht bestätigt, sondern indirekt durch den größeren verbleibenden Sicherheitsabstand unterstützt werden.

Bewertung von Hypothese H2

H2: Die reduzierte Reaktionszeit führt zu einer Verkürzung des Anhaltewegs.

Da die Zeitspanne bis zur Einleitung der fahrerseitigen Bremsreaktion nicht eindeutig gemessen werden konnte, kann auch der direkte Zusammenhang zwischen Reaktionszeit und Anhalteweg nicht nachgewiesen werden. Die Messwerte zeigen jedoch, dass bei aktiviertem Kollisionswarnsystem ein größerer verbleibender Abstand zum vorausfahrenden

den Fahrzeug erreicht wurde. Dies deutet darauf hin, dass sich das Brems- bzw. Sicherheitsverhalten durch das System verbessert hat. Die Hypothese H2 kann daher nicht bestätigt, jedoch durch die Messergebnisse indirekt gestützt werden.

Bewertung von Hypothese H3

H3: Der Einsatz eines Kollisionswarnsystems vergrößert den verbleibenden Sicherheitsabstand zum Hindernis nach dem Stillstand.

Diese Hypothese kann anhand der Messergebnisse bestätigt werden. Bei aktiviertem Kollisionswarnsystem betrug der mittlere verbleibende Abstand 5,12 m, während ohne aktives System ein mittlerer Abstand von 3,84 m ermittelt wurde. Damit vergrößerte sich der Sicherheitsabstand im Mittel um 1,28 m. Die Messergebnisse zeigen somit eine deutliche Verbesserung der verbleibenden Sicherheitsreserve bei aktiviertem Kollisionswarnsystem.

7.5 Fehleranalyse der Messwerte

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse sind mögliche Messunsicherheiten und Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Da es sich um reale Fahrversuche handelt, können Abweichungen zwischen den einzelnen Versuchsdurchgängen nicht ausgeschlossen werden. Nach der Ursache lassen sich Messabweichungen grundsätzlich in grobe Fehler, systematische Fehler und zufällige Fehler einteilen. [41]

Grobe Fehler entstehen beispielsweise durch Irrtümer, falsche Ablesungen, ungeeignete Messverfahren oder starke äußere Störeinflüsse. Systematische Fehler wirken bei Wiederholung einer Messung unter gleichen Bedingungen gleichgerichtet auf das Messergebnis. Zufällige Fehler treten dagegen unregelmäßig nach Betrag und Richtung auf und führen zu einer Streuung der Einzelmesswerte.

Auf die vorliegende Untersuchung übertragen, wären grobe Fehler beispielsweise eine falsche Zuordnung eines Messwertes, ein falsch gewählter Bezugspunkt bei der Abstandsmessung oder eine fehlerhafte Dokumentation eines Versuchsdurchgangs. Solche Fehler sind grundsätzlich vermeidbar und wurden durch eine sorgfältige Versuchsdurchführung, wiederholte Kontrolle der Aufnahmen und Plausibilitätsprüfung der Messwerte minimiert.

Systematische Fehler können sich insbesondere aus der Messmethode ergeben. Dazu zählen die manuelle Ermittlung des verbleibenden Abstands, die Wahl der Bezugspunkte

an Motorrad und Versuchsfahrzeug sowie der aus Sicherheitsgründen gewählte leichte seitliche Versatz zum vorausfahrenden Versuchsfahrzeug. Auch eine wiederkehrende Abweichung bei der Einstellung des Anfangsabstands oder eine konstante Tendenz bei der manuellen Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs könnte systematisch auf die Messwerte wirken.

Zufällige Fehler ergeben sich vor allem aus natürlichen Schwankungen während der einzelnen Fahrversuche. Hierzu zählen geringe Abweichungen der Geschwindigkeit, minimale Unterschiede beim Anfangsabstand, variierende Bremszeitpunkte, unterschiedliche Bremsintensitäten des Fahrers sowie leichte Unterschiede in der Verzögerung des Versuchsfahrzeug 2. Diese Einflüsse können dazu führen, dass die gemessenen Abstände innerhalb einer Versuchsgruppe streuen.

Eine vollständige messtechnische Fehlerrechnung wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, da mehrere Einflussgrößen, wie Bremsbetätigung, Fahrzeugverzögerung, Fahrerreaktion und Systemreaktion, nicht separat mit kalibrierten Messsystemen erfasst wurden. Stattdessen erfolgt die Fehlerbetrachtung qualitativ anhand der möglichen Einflussgrößen.

Eine wesentliche Messunsicherheit ergibt sich aus der Ermittlung des verbleibenden Abstands zwischen Motorrad und vorausfahrendem Fahrzeug nach Abschluss des Bremsvorgangs. Mögliche Abweichungen entstehen durch Ableseungenauigkeiten, unterschiedliche Bezugspunkte oder geringfügige Positionsänderungen nach dem Stillstand. Die Messunsicherheit der Abstandsermittlung wird daher näherungsweise bis $\pm 0,20$ m abgeschätzt.

Trotz der genannten Einflussfaktoren zeigen die Messwerte einen deutlichen Unterschied zwischen den Fahrten mit und ohne aktiviertes Kollisionswarnsystem. Die mittlere Erhöhung des verbleibenden Sicherheitsabstands beträgt 1,28 m bzw. 33,4 % und liegt damit deutlich über der abgeschätzten Messunsicherheit der Abstandsermittlung. Daher ist davon auszugehen, dass die beobachtete Differenz nicht ausschließlich auf Messungenauigkeiten zurückzuführen ist, sondern eine tatsächliche sicherheitsrelevante Wirkung des Systems widerspiegelt.

8 Diskussion der Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Fahrversuche kritisch diskutiert und in den fachlichen Kontext der Motorradsicherheit eingeordnet. Ziel ist es, die in Kapitel 7 dargestellten Messwerte nicht nur numerisch zu bewerten, sondern deren sicherheitstechnische Bedeutung, Aussagekraft und Grenzen zu analysieren. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, welchen Beitrag das untersuchte radarbasierte Kollisionswarnsystem zur Erhöhung der Fahrsicherheit leisten kann.

Besonders relevant ist die Unterscheidung zwischen den beiden untersuchten Versuchsszenarien. Während das System bei dem stehenden Hindernis keine Warnung auslöste, konnte bei der Versuchsreihe 2 mit bewegtem Hindernis eine deutliche Vergrößerung des verbleibenden Sicherheitsabstands festgestellt werden. Die Diskussion betrachtet daher sowohl den nachweisbaren Nutzen des Systems in dynamischen Auffahrsituationen als auch die funktionalen und methodischen Grenzen der Untersuchung.

8.1 Interpretation der Ergebnisse und Bewertung Sicherheitsgewinn

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Wirksamkeit des untersuchten Kollisionswarnsystems stark vom jeweiligen Fahrszenario abhängig ist. Der gemessene Abstandszuwachs bei Versuchsreihe 2 ist im Kontext der Motorradsicherheit als relevant zu bewerten, da bereits zusätzliche Distanzen im Meterbereich dazu beitragen können, eine Kollision zu vermeiden oder die Aufprallgeschwindigkeit zu reduzieren.

Die positive Wirkung ist jedoch nicht einer einzelnen Systemfunktion eindeutig zuzuordnen. Das untersuchte Kollisionswarnsystem warnt den Fahrer optisch über das Display, erzeugt zusätzlich eine haptische Rückmeldung in Form eines kurzen Bremsimpulses und unterstützt den Bremsvorgang, sobald der Fahrer aktiv eingreift. Da die Reaktionszeit des Fahrers aus den Videodaten nicht exakt und belastbar bestimmt werden konnte, ist der gemessene Sicherheitsgewinn als Gesamtwirkung aus Warnung, Fahrerreaktion und Bremsunterstützung zu interpretieren.

Anders verhielt sich das System beim stehenden Hindernis. Trotz der bewusst gewählten Hindernisgestaltung und der Aluminiumverkleidung zur Verbesserung der Radarreflexion wurde keine optische oder haptische Warnung ausgelöst. Daraus lässt sich ableiten, dass

nicht allein die physikalische Erkennbarkeit eines Objekts entscheidend ist. Vielmehr bewertet das Assistenzsystem die Situation anhand interner Algorithmen und Plausibilitätskriterien, beispielsweise:

- Objektbewegung
- Relativgeschwindigkeit
- Objektklassifikation
- Fahrgeschwindigkeit
- Systemgrenzen [27]

Diese Beobachtung verdeutlicht eine wesentliche funktionale Grenze des Systems. Während das vorausfahrende Fahrzeug in der dynamischen Annäherungssituation als plausibles Zielobjekt erkannt wurde, löste das stationäre Hindernis keine Systemreaktion aus. Die Wirksamkeit des Kollisionswarnsystems ist daher szenarioabhängig und kann nicht auf alle Gefahrensituationen übertragen werden.

Insgesamt zeigt sich, dass das untersuchte System in dynamischen Auffahrsituationen einen messbaren sicherheitstechnischen Nutzen besitzt. Gleichzeitig darf es nicht als vollständiges Unfallvermeidungssystem verstanden werden. Es stellt vielmehr eine unterstützende Sicherheitsfunktion dar, die den Fahrer in bestimmten kritischen Situationen warnen und entlasten kann. Die Verantwortung für die Fahrzeugführung und die Einleitung geeigneter Maßnahmen verbleibt weiterhin beim Fahrer.

8.2 Einordnung, Übertragbarkeit und Grenzen der Untersuchung

Die Ergebnisse lassen sich in den aktuellen Entwicklungsstand moderner Motorradassistenzsysteme einordnen. Während klassische aktive Sicherheitssysteme wie ABS, Kurven-ABS oder Traktionskontrolle vor allem in fahrdynamisch kritischen Situationen eingreifen, setzen radarbasierte Systeme wie Active Cruise Control, Front Collision Warning oder Spurwechselwarnung bereits früher an. Sie dienen der prädiktiven Erkennung kritischer Verkehrssituationen und erweitern damit die klassische aktive Sicherheit um eine vorausschauende Fahrerunterstützung. Das untersuchte Kollisionswarnsystem stellt somit eine wichtige Zwischenstufe zwischen stabilisierenden Sicherheitssystemen und zukünftigen teilautomatisierten Notbremsassistenzsystemen dar. [42]

Im Vergleich zum Pkw-Bereich ist die Umsetzung solcher Systeme bei Motorrädern deutlich anspruchsvoller. Aufgrund der einspurigen Fahrdynamik, der Abhängigkeit von

Schräglage, Reifenhaftung und Fahrerhaltung können automatische Bremseingriffe nicht ohne Weiteres aus dem Automobilbereich übertragen werden. Die gewählte Systemauslegung mit Warnung, haptischer Rückmeldung und unterstützender Bremsfunktion erscheint daher für Motorräder nachvollziehbar, da sie den Fahrer unterstützt, ohne vollständig autonom in die Fahrzeugführung einzugreifen.

Für die reale Verkehrssicherheit besitzen die Versuchsergebnisse dennoch eine hohe praktische Relevanz. Auffahrsituationen zählen auch im öffentlichen Straßenverkehr zu typischen Gefahrenszenarien. Gerade bei Motorrädern können geringe Sicherheitsabstände oder verspätete Reaktionen schwerwiegende Folgen haben, da keine schützende Karosseriestruktur vorhanden ist. Ein System, das den Fahrer frühzeitig warnt und zusätzliche Handlungsreserven schafft, kann daher zur Entschärfung kritischer Verkehrssituationen beitragen.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist jedoch begrenzt. Die Versuche wurden unter definierten Bedingungen mit einem bestimmten Motorrad, einem Fahrer, einem vorausfahrenden Fahrzeug und einer begrenzten Anzahl an Messfahrten durchgeführt. Reale Verkehrssituationen sind deutlich komplexer und werden unter anderem beeinflusst durch:

- Fahrbahnzustand
- Witterungsbedingungen
- Geschwindigkeit
- Verkehrsdichte
- Fahrerfahrung und Beladung
- Fahrmanöver anderer Verkehrsteilnehmer

Auch die Versuche selbst enthielten methodische Grenzen, etwa manuelle Bremsungen, geringe Abweichungen bei Geschwindigkeit und Anfangsabstand sowie den aus Sicherheitsgründen gewählten seitlichen Versatz zum vorausfahrenden Fahrzeug.

Trotz dieser Einschränkungen eignet sich die gewählte Versuchsstrategie zur praxisnahen Bewertung des Systems. Der Realversuch ermöglichte die Untersuchung des Zusammenspiels von Fahrer, Motorrad und Assistenzsystem unter realitätsnahen Bedingungen. Die Ergebnisse zeigen, dass radarbasierte Kollisionswarnsysteme im Motorradbereich ein Potenzial zur Verbesserung der Fahrsicherheit besitzen, ihre Wirkung jedoch stets im jeweiligen Szenario und unter Berücksichtigung ihrer Systemgrenzen bewertet werden muss.

Für zukünftige Entwicklungen ergibt sich daraus die Notwendigkeit, die Objekterkennung weiter zu verbessern und Systemgrenzen transparenter zu gestalten. Entscheidend wird sein, bewegte und stehende Hindernisse, unterschiedliche Verkehrssituationen sowie komplexe Umgebungsbedingungen zuverlässig zu erfassen und situationsgerecht zu bewerten. Nur durch eine motorradspezifische Auslegung von Sensorik, Systemlogik und Bremsunterstützung kann das sicherheitstechnische Potenzial zukünftiger Fahrerassistenz- und Notbremsassistenzsysteme vollständig genutzt werden.

8.3 Beispielhafte Bewertung des Einflusses der Bremsreaktionszeit

Zur zusätzlichen Einordnung der Versuchsergebnisse kann eine vereinfachte Beispielrechnung herangezogen werden. Sie soll verdeutlichen, welchen Einfluss bereits geringe Unterschiede in der Zeitspanne bis zur Einleitung der Bremsreaktion auf den Anhalteweg und die mögliche Kollisionsgeschwindigkeit haben können. Die Berechnung stellt keine direkte Messauswertung dar, sondern dient der sicherheitstechnischen Veranschaulichung. Für die Beispielrechnung wird eine Geschwindigkeit von 50 km/h zugrunde gelegt. Dies entspricht einer Geschwindigkeit von 13,89 m/s.

Der Anhalteweg setzt sich vereinfacht unter Annahmen einer konstanten Schwellzeit aus dem Reaktionsweg und dem Bremsweg zusammen:

Anhalteweg vereinfacht (Formel 6):

$$s_A = s_R + s_B = v \times t_R + \frac{v^2}{2 \times a}$$

Für die Rechnung wird eine konstante Bremsverzögerung von 7,0 m/s² angenommen. Daraus ergibt sich bei 50 km/h ein reiner Bremsweg von:

Bremsweg separiert (Formel 7):

$$s_B = \frac{v^2}{2 \times a} = \frac{\left(13,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 7 \frac{m}{s^2}} = 13,78 \text{ m}$$

Kollisionsgeschwindigkeit (Formel 8):

$$v_{Kolli} = \sqrt{v^2 - 2 \times a \times s_{B,verfügbar}} = \sqrt{\left(13,89 \frac{m}{s}\right)^2 - 2 \times 7 \frac{m}{s^2} \times 13,06 \text{ m}} = 3,18 \frac{m}{s}$$

Wird beispielhaft ein verfügbarer Abstand von 20 m bis zum Hindernis angenommen, zeigt sich der starke Einfluss der Bremsreaktionszeit. Bei einer Reaktionszeit von 0,3 s beträgt der Reaktionsweg nur 4,17 m. Zusammen mit dem Bremsweg ergibt sich ein Anhalteweg von 17,95 m, sodass das Motorrad rechnerisch etwa 2,05 m vor dem Hindernis zum Stillstand kommt. Bei einer Reaktionszeit von 0,5 s erhöht sich der Anhalteweg bereits auf 20,72 m. In diesem Fall würde das Motorrad das Hindernis rechnerisch noch mit etwa 3,18 m/s oder 11,5 km/h erreichen. Dabei ergibt sich der verfügbare Bremsweg aus der Strecke, die zum eigentlichen Bremsen noch übrig bleibt nach Abzug der Reaktionsweges. Tabelle 5 zeigt eine vereinfachte Beispielrechnung welche die Kollisionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit unterschiedlichen Bremsreaktionszeiten verdeutlicht.

Tabelle 5: Vereinfachte Beispielrechnung der Kollisionsgeschwindigkeit bei 20 m verfügbarem Abstand und 7,0 m/s² Bremsverzögerung bei 50 km/h: [Eigene Darstellung]

Bremsreaktionszeit	Reaktionsweg	Bremsweg	Anhalteweg	Ergebnis bei 20 m Abstand
0,3 s	4,17 m	13,78 m	17,95 m	Stillstand ca. 2,05 m vor dem Hindernis
0,4 s	5,56 m	13,78 m	19,33 m	Stillstand ca. 0,67 m vor dem Hindernis
0,5 s	6,94 m	13,78 m	20,72 m	Kollision mit ca. 11,5 km/h
0,8 s	11,11 m	13,78 m	24,89 m	Kollision mit ca. 29,8 km/h
1 s	13,89 m	13,78 m	27,67 m	Kollision mit ca. 37,3 km/h

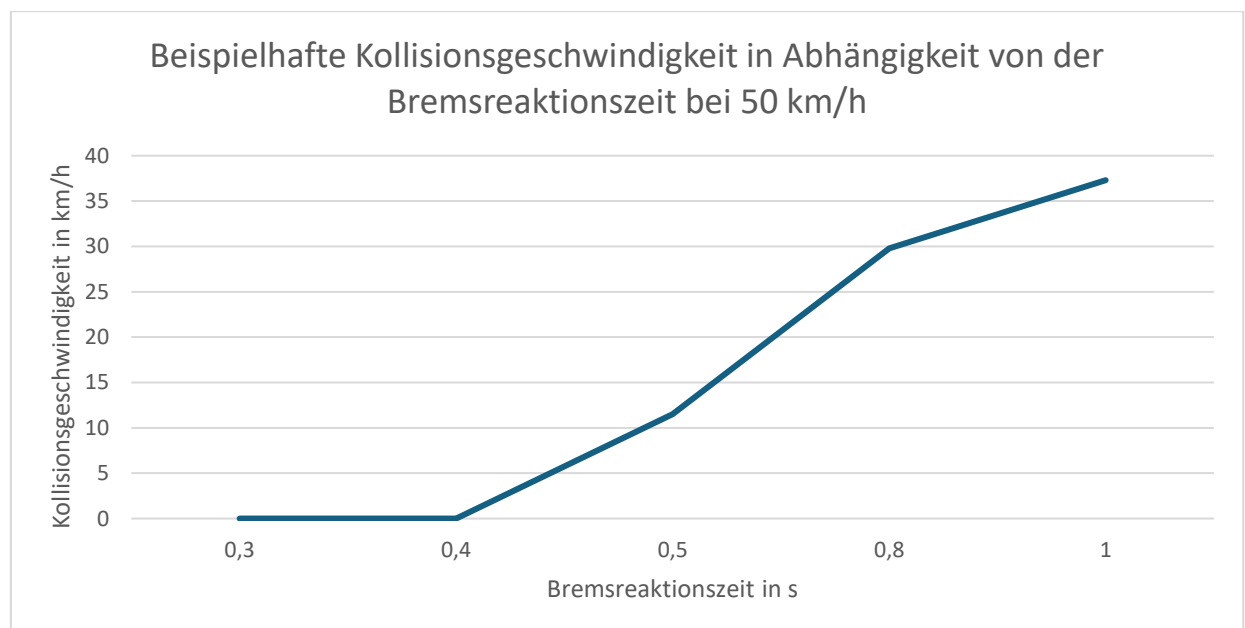


Abbildung 36: Beispielhafte Kollisionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Bremsreaktionszeit bei 50 km/s: [Eigene Darstellung]

Die Abbildung 36 basiert auf einer vereinfachten Modellrechnung mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 50 km/h, einem angenommenen Hindernisabstand von 20 m und einer konstanten Bremsverzögerung von 7,0 m/s. Die Beispielrechnung zeigt, dass bereits eine Verzögerung der Bremsreaktion um wenige Zehntelsekunden einen erheblichen Einfluss auf den Ausgang einer Gefahrensituation haben kann. Bei 50 km/h legt das Motorrad pro 0,1 s etwa 1,39 m zurück. Dadurch kann der Unterschied zwischen rechtzeitigem Stillstand und einer Kollision bereits in einem kleinen Zeitbereich liegen. Im gewählten Beispiel liegt die kritische Grenze bei etwa 0,45 s Bremsreaktionszeit. Wird die Bremsung früher eingeleitet, kommt das Motorrad rechnerisch vor dem Hindernis zum Stillstand. Erfolgt die Bremsreaktion später, verbleibt eine Kollisionsgeschwindigkeit.

Für die Bewertung des Kollisionswarnsystems ist diese Betrachtung besonders relevant. Das System muss nicht zwingend die fahrerische Bremsleistung selbst verbessern, sondern kann bereits durch eine frühere Warnung und eine schnellere Einleitung der Bremsreaktion einen sicherheitstechnischen Vorteil erzeugen.

9 Bewertung des Potentials zukünftiger Notbremssysteme

Auf Grundlage der theoretischen Betrachtungen, des Stands der Technik sowie der durchgeführten Fahrversuche lässt sich das Potenzial zukünftiger Notbremsassistentensysteme für Motorräder bewerten. Das in dieser Arbeit untersuchte System ist kein voll-automatischer Notbremsassistent, sondern ein mehrstufiges Kollisionswarnsystem mit optischer Warnung, haptischem Bremsimpuls und unterstützender Bremsfunktion nach Eingriff des Fahrers. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass bereits heutige Warn- und Bremsunterstützungssysteme einen sicherheitsrelevanten Beitrag leisten können.

Aus der Versuchsreihe 2 lässt sich ableiten, dass frühzeitige Warnungen und unterstützende Bremsfunktionen eine sinnvolle Zwischenstufe zu zukünftigen automatisierten Notbremssystemen darstellen. Im Gegensatz zum Pkw ist ein autonomer Bremsengriff beim Motorrad jedoch deutlich kritischer zu bewerten, da Schräglage, Fahrbahnhaftung, Reifenkräfte und Fahrzeugstabilität unmittelbar die sichere Bremsbarkeit beeinflussen. Ein abruptes oder ungünstig dosiertes Bremsmoment könnte die Fahrstabilität beeinträchtigen und im ungünstigsten Fall einen Sturz auslösen.

Zukünftige Motorrad-Notbremsassistentensysteme müssen daher stärker fahrdynamische und fahrerbezogene Zustandsgrößen berücksichtigen. Vor einem automatisierten Bremsengriff müsste beispielsweise erkannt werden, ob der Fahrer beide Hände am Lenker

hat und das Motorrad während der Bremsung stabilisieren kann. Ebenso ist die aktuelle Schräglage zu bewerten, da bei Kurvenfahrt bereits ein Teil des verfügbaren Reifenhaftungspotenzials für Seitenführungskräfte benötigt wird. Das System müsste folglich situationsabhängig entscheiden, ob und in welchem Umfang ein Bremsengriff fahrdynamisch zulässig ist.

Auch der Bremsdruckaufbau muss motorradspezifisch erfolgen. Während bei Pkw in Notbremsituationen sehr schnell hohe Bremsdrücke aufgebaut werden können, ist beim Motorrad ein sensiblerer, progressiver Verlauf erforderlich. Ein plötzlich hoher Bremsdruck, insbesondere am Vorderrad, kann Instabilität, Aufstellmomente oder Haftungsverlust begünstigen. Daher wäre ein kontinuierlicher oder situationsabhängig exponentieller Bremsdruckaufbau sinnvoll, um die Bremsleistung kontrolliert zu erhöhen und gleichzeitig die Fahrstabilität zu erhalten. Eine weitere zentrale Voraussetzung ist die zuverlässige Umfeld- und Objekterkennung. Die Versuchsreihe 1 zeigte, dass das untersuchte System in diesem Szenario keine Warnung auslöste. Zukünftige Systeme müssen daher nicht nur bewegte Fahrzeuge, sondern auch stehende Hindernisse, Stauenden oder liegengebliebene Fahrzeuge sicher erkennen und bewerten können. Gleichzeitig müssen Fehlwarnungen vermieden werden, da sie die Akzeptanz beim Fahrer verringern und bei Motorrädern fahrdynamisch kritisch sein können.

Eine mögliche Weiterentwicklung liegt in der Sensorfusion. Radar eignet sich besonders zur Erfassung von Abstand und Relativgeschwindigkeit, während Kamerasysteme eine genauere Objektklassifikation ermöglichen. LiDAR kann zusätzlich eine präzise räumliche Erfassung der Umgebung unterstützen. Durch die Kombination dieser Sensoren könnten komplexe Verkehrssituationen zuverlässiger bewertet werden. Im Motorradbereich stellen jedoch folgende Themen technische Herausforderungen weiterhin dar:

- Bauraum
- Vibrationen
- Witterungseinflüsse
- Kosten

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass Kollisionswarnsysteme eine wichtige Vorstufe zukünftiger motorradspezifischer Notbremsassistentensysteme darstellen. Sie können kritische Situationen früher erkennbar machen, zusätzliche Sicherheitsreserven schaffen und den Fahrer gezielt unterstützen. Für eine weitergehende Automatisierung

sind jedoch eine zuverlässigere Objekterkennung, eine motorradspezifische Eingriffsstrategie sowie die präzise Berücksichtigung von Schräglage, Bremsdruck, Verzögerung und Fahrerzustand erforderlich. Damit besitzen zukünftige Notbremsassistentensysteme ein erhebliches sicherheitstechnisches Potenzial, müssen jedoch konsequent an die besonderen fahrdynamischen Anforderungen von Motorrädern angepasst werden.

10 Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss eines radarbasierten Kollisionswarnsystems auf das Brems- und Sicherheitsverhalten eines Motorradfahrers in definierten Gefahrensituationen im realen Fahrversuch zu untersuchen. Ausgangspunkt war die Forschungsfrage, welchen Einfluss ein solches System auf Reaktionszeit bis zur motorischen Umsetzung, Anhalteweg bzw. verbleibenden Sicherheitsabstand hat und welches Potenzial sich daraus für zukünftige Notbremsassistentensysteme ergibt.

Im theoretischen Teil wurde gezeigt, dass Motorradfahrer aufgrund der fehlenden schützenden Fahrzeugstruktur, der hohen fahrdynamischen Anforderungen und der begrenzten passiven Sicherheit einem erhöhten Unfall- und Verletzungsrisiko ausgesetzt sind. Daraus ergibt sich eine besondere Bedeutung aktiver Sicherheitssysteme und moderner Fahrerassistenzsysteme. Kollisionswarnsysteme können hierbei einen wichtigen Beitrag leisten, indem sie den Fahrer frühzeitig auf kritische Situationen aufmerksam machen und zusätzliche Handlungsreserven schaffen.

Die Fahrversuche zeigten eine deutliche Abhängigkeit des Systems von der Versuchsreihe. Bei Versuchsreihe 1 wurde keine Warnung ausgelöst, wodurch eine funktionale Grenze des untersuchten Kollisionswarnsystems sichtbar wurde. Im Versuch mit bewegtem Hindernis bei Versuchsreihe 2 konnte hingegen eine messbare Verbesserung des verbleibenden Sicherheitsabstands festgestellt werden. Bei aktiviertem System erhöhte sich der mittlere Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug von 3,84 m auf 5,12 m. Dies entspricht einer Vergrößerung der Sicherheitsreserve um $1,28 \text{ m} \pm 0,20 \text{ m}$ bzw. etwa 33,4 %.

Die Forschungsfrage kann somit beantwortet werden, dass ein radarbasiertes Kollisionswarnsystem in geeigneten dynamischen Verkehrssituationen einen positiven Einfluss auf das Brems- und Sicherheitsverhalten des Fahrers haben kann. Eine direkte Aussage zur Verkürzung der Zeitspanne bis zur Einleitung der Fahrerseitigen Bremsreaktion ist auf

Grundlage der vorliegenden Messdaten nicht möglich. Der größere verbleibende Sicherheitsabstand weist jedoch auf eine positive Gesamtwirkung aus optischer Warnung, haptischem Bremsimpuls und Bremsunterstützung hin.

Für zukünftige Notbremsassistentensysteme bei Motorrädern zeigen die Ergebnisse ein erhebliches sicherheitstechnisches Potenzial, aber auch deutliche technische Herausforderungen. Entscheidend sind:

- eine zuverlässige Erkennung bewegter und stehender Objekte
- die Berücksichtigung von Schräglage
- der Fahrzustand
- die Fahrerreaktion
- motorradspezifischer, progressiver Bremsdruckaufbau

Automatisierte Bremseingriffe müssen bei Motorrädern deutlich sensibler ausgelegt werden als bei Pkw, um die Fahrstabilität nicht zu gefährden.

Ausblickend sind weiterführende Untersuchungen mit mehreren Fahrern, unterschiedlichen Geschwindigkeiten, verschiedenen Motorradtypen und erweiterten Hindernisszenarien sinnvoll. Zudem sollten Zeitspannen für Reaktionszeit, Bremsdruck, Verzögerung und Schräglage mit geeigneter Messtechnik genauer erfasst werden, um die Wirkung einzelner Systemfunktionen präziser bewerten zu können.

Abschließend lässt sich festhalten, dass radarbasierte Kollisionswarnsysteme eine vielversprechende Grundlage für die Weiterentwicklung der Motorradsicherheit darstellen. Sie ersetzen nicht die Aufmerksamkeit und Verantwortung des Fahrers, können jedoch in dynamischen Gefahrensituationen zusätzliche Sicherheitsreserven schaffen. Damit bilden sie eine wichtige technologische Vorstufe für zukünftige motorradspezifische Notbremsassistentensysteme.

Alle im Rahmen der Arbeit erhobenen Daten (Bilder, Videos) werden auf einem externen Wechseldatenträger (USB-Stick) beigefügt.

VI Literaturverzeichnis

- [1] MÜLLER RUPRECHT: „Assistenzsysteme für Motorräder im Überblick,“ ADAC technik Zentrum , 05.03.2024. Verfügbar: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/zweirad/motorrad-roller/technik-zubehoer-rueckrufe/assistentssysteme-motorrad-uebersicht/>. Zugriff am 27.04.2026
- [2] STATISTISCHES BUNDESAMT: (Destatis), „Verkehrsunfälle, Fachserie 8 Reihe 7,“ Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2023
- [3] ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBIL -CLUB e.V.: „ADAC, Auto gegen Motorrad: Gefährliche Begegnung“ 17.09.2024. Verfügbar: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/zweirad/motorrad-roller/motorrad-fahren/motorrad-gegen-auto/>. Zugriff am 17.04.2026
- [4] STATISTISCHES BUNDESAMT: „Anzahl der Straßenverkehrsunfälle in Deutschland nach Schadensart¹ in den Jahren 1955 bis 2024,“ 07.2025. Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/3396/umfrage/anzahl-der-strassenverkehrsunfaelle-mit-personenschaden/>. Zugriff am 13.04.2026
- [5] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: „Anzahl der Kraftfahrzeuge in Deutschland in den Jahren 1960 bis 2025,“ 04.03.2025. Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1837/umfrage/kfz-bestand-in-deutschland/>. Zugriff am 13.04.2026
- [6] SCHMATZ ANNE, BOSCH PRESSE: “A look Into the past, a ride into the future: Bosch celebrates three decades of Motorcycle ABS safety" Robert Bosch GmbH, 11.04.2025. Verfügbar: <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/a-look-into-the-past-a-ride-into-the-future-bosch-celebrates-three-decades-of-motorcycle-abs-safety-279872.html>. Zugriff am 13.04.2026
- [7] BUNDESAMT FÜR JUSTIZ: „Bundesrepublik Deutschland,, "Gesetze im Internet" Bundesrepublik Deutschland, 02.02.2026. Verfügbar: https://www.gesetze-im-internet.de/fev_2010/BJNR198000010.html. Zugriff am 14.04.2026

- [8] BRÄUTIGAM J., HELLMANN A., SEINIGER P.: „Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), "Aktive Motorradsicherheit durch Fahrerassistenz - Forschung der BASt" Institut für Zweiradsicherheit (ifz) e.V., 10.02.2020. Vefügar: <https://trid.trb.org/View/1681796>. Zugriff am 14.04.2026
- [9] BRANDLHUBER BENNO, WISSELMANN DIRK, NEBEL BOSSIER STEFAN: Motorrad Fahrdynamik - Der Ritt auf der Rasierklinge, Berlin: Springer Vieweg, 2024
- [10] STATISTISCHES BUNDESAMT: „Anzahl der Verunglückten bei Straßenverkehrsunfällen in Deutschland nach Art der Beteiligung von 1980 bis 2024" 09.07.2025. Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/183/umfrage/verunglueckte-bei-unfaellen-nach-art-der-straßen-verkehrsbeteiligung/>. Zugriff am 13.04.2026
- [11] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: „Anzahl der Krafträder in Deutschland in den Jahren 2005 bis 2025" 03.2025. Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/199228/umfrage/bestand-an-kraftraedern-in-deutschland/>. Zugriff am 13.04.2026
- [12] STATISTISCHES BUNDESAMT: "Verunglückte und Getötete bei Unfällen mit Motorrädern in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2024",“ 09. 07. 2025. Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/-156681-/umfrage-/motorraeder-verunglueckte-und-getoetete-bei-unfaellen/>. Zugriff am 13.04.2026
- [13] MOHR RAINALD "Bundesverband der Motorradfahrer e.V.": „Aktuelle Daten und Fakten zum Motorrad“ 04.11.2024. Verfügbar: https://bvdm.de/politik-und-leistungen/zukunft-des-motorrades/artikel/Motorrad-im_Spiegel_der_Daten_und_Fakten.php. Zugriff am 13.04.2026
- [14] INSTITUT FÜR ZWEIRADSICHERHEIT: „Motorrad Fahren Gut & Sicher,“ Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG, Köln, 2025
- [15] BURG HEINZ, BURG JÜRGEN, MOSER ANDREAS, DR. BRÖSDORF KLAUS-DIETER: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion - Unfallaufnahme ·

Fahrdynamik · Simulation (3. aktualisierte Auflage), Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017

- [16] KRAMER FLORIAN: „Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen“ Zürich: Vieweg Verlag, 2006
- [17] SEIFERT ULRICH, GONTER MARK: “Integrated Automotive Safety Handbook” SAE International, 2013
- [18] EUROPÄISCHE UNION: „Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates - über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen“ Brüssel, 2013
- [19] SIGLOCH WOLFGANG: „DEKRA -Automobil / Sicherheit im Verkehr- Assistenzsysteme im Motorrad“ DEKRA-Automobil, 20.03.2024. Verfügbar: <https://www.dekra.de/de/assistenzsysteme-im-motorrad/>. [Zugriff am 27.04.2026]
- [20] AUTOLIV: „Autoliv Motorcycles & Bikes“ Autoliv Inc, 2025. Verfügbar: <https://www.autoliv.com/safety-solutions/motorcycles-bikes>. Zugriff am 29.04.2026
- [21] HONDA GLOBAL: „Honda Global: "Gold Wing with the World's First Production Motorcycle Airbag“ Honda Motor Co, 2007. Verfügbar: <https://global.honda/en/GOLDWING/history/stories/2007/>. Zugriff am 20.04.2026
- [22] 1000PS INTERNET GMBH: „1000PS "Der Marktplatz von Motorrad" 13.07.2007. Verfügbar: <https://www.1000ps.de/testbericht-id-2185427-honda-goldwing-airbag>. Zugriff am 20.04.2026
- [23] HUGEMANN WOLFGANG (Hrsg.): „Unfall Rekonstruktion“, Verschiedene Abschnitte, S. 780-820, Münster: Autorenteam, 2007
- [24] ADAC STIFTUNG, HOCHSCHULE KEMPTEN (Hrsg.): „Unfallforschung 2019 - Symposium für Unfallforschung und Sicherheit im Straßenverkehr“, Schriftenreihe, Band 7, Göttingen: Cuvillier Verlag Göttingen, 2019

- [25] DR. VOSSWINKEL RICK: „Vorlesung Kraftfahrttheorie: MBK600_Querdynamik" - Westsächsische Hochschule Zwickau, 2023
- [26] HAUPT ANDREAS: „Bosch-Presse - "From powertrains to connectivity: These are the Bosch highlights at EICMA 2023 in Milan" Bosch Media Service, 26.10.2023. Verfügbar: <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/from-powertrains-to-connectivity-these-are-the-bosch-highlights-at-eicma-2023-in-milan-259392.html>. Zugriff am 20.04.2026
- [27] WINNER HERMANN, HAKULI STEPHAN, WOLF GABRIELE: Handbuch Fahrassistenzsysteme (2. Auflage), Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012
- [29] STAPEL DIETMAR: „Radarsensoren auf Basis hochintegrierter Schaltungen für künftige Fahrerassistenzsysteme, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016
- [30] PISCHINGER STEFAN, SEIFFERT ULRICH: „Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik" Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021
- [31] EADARA SHIREEN BHANU: „An Intelligent Sensor Fusion Object Detection System with LiDAR and Camera," IE, Türkei, 2025
- [32] R: THOMAS: „Mobilitätsmagazin: Notbremsassistent: Funktionsweise, Schwächen und Pflicht," Bussgeldkatalog, 07.02.2026. Verfügbar: <https://www.bussgeldkatalog.org/notbremsassistent/>. Zugriff am 28.04.2026
- [33] EHRLICH ISABEL: „Arbeit und Gesundheit: Notbremsassistent in Fahrzeugen: Funktionen und Pflichten" Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), 03.09.2024. Verfügbar: <https://aug.dguv.de/verkehrssicherheit/-notbremsassistent-funktionen-pflichten/>. Zugriff am 28.04.2026
- [34] PETE THOMAS: „Advanced driver assistance systems" European Road Safety Observatory, National Technical University of Athens, 2018
- [35] EUROPÄISCHE UNION: „Verordnung (EU) 2019/2144 des Europäischen Parlaments und Rates" 27.11.2019. Verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32019R2144&qid=1777458398136>. Zugriff am 29.04.2026

- [36] EUROPÄISCHE UNION: „UN-Regelung Nr. 152 - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Notbremsassistentensystems“ 27.09.2024. Verfügbar: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202402497. Zugriff am 29.04.2026
- [37] IOANNIS SYMEONIDIS, GUEVEN KAVADARLI, SCHULLER ERICH, GRAW MATTHIAS: „Accident Analysis & Prevention; Analysis of the stability of PTW riders in autonomous braking scenarios“, Elsevier, 2011
- [38] SAVINO GIOVANNI, PIERINI MARCO, BALDANZINI NICCOLO: „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, Band 226, Ausgabe 8,“ 2012
- [39] NOWOTNY ALEXANDER: „Einfluss moderner Sicherheits- und Fahrerassistenzsysteme auf die Verkehrssicherheit von motorisierten Zweirädern“ Bundesministerium für Technologie, Verkehr und Innovation, Wien, 2019
- [40] DR. SCHUBERT JAN: „Vorlesung Fahrwerk: MBK06420_Kraftübertragung“ Westsächsische Hochschule Zwickau, 2025
- [41] TIMESTAMP Camera Basic, 2026 Version 1.156
- [42] INSTITUT FÜR PHYSIK: „Hinweise zur Durchführung einer Fehlerbetrachtung“ Chemnitz: Technische Universität Chemnitz
- [43] CONTINENTAL AG: „Neuer Radarsensor von Continental ermöglicht leistungsfähigen Motorrad-Notbremsassistenten“ Continental AG, 05.11.2018 Verfügbar: <https://www.continental.com/de/presse/pressemitteilungen/neuer-radarsensor/>. Zugriff am 11.06.2026
- [44] BMW AG: „BMW Motorrad“, 2026. Verfügbar: <https://support.bmw-motorrad.com/s/article/R-1300-GS-radarbasierte-Fahrerassistenzsysteme-wc50W?language=de>. Zugriff am 13.04.2026
- [45] BOIXEL THOMAS: „Europe Moto-Website“ 2026. Verfügbar: <https://bmw.europe-moto.com/de/blog-bmw-motorrad/fahrerassistenzsysteme-der->

bmw-r1300gs-acc-fcw-und-sww-n507?srsId=AfmBO-ooQUnad5KjVNs0eSI1-g6FIPW74CifdMq eig2UTiDU5BTEzXp8fC. Zugriff am 13.04.2026

- [46] ROBERT BOSCH GMBH: „Bosch Mobilty,“ 2022. Verfügbar: <https://www.bosch-mobility.com/en/mobility-topics/safety-for-all-road-users/rider-assistance-systems-for-two-wheelers/>. Zugriff am 21.04.2026
- [47] BMW AG: „Betriebsanleitung R 1300 GS,“ 02. 2023. Verfügbar: https://manuals.bmw-motorrad.com/manuals/BA-Extern/IN/BA-INTERNET-COM/PDF/R_0M21_RM_0223_00.pdf. Zugriff am 16.06.2026
- [48] OPENAI, *ChatGPT-5.6 Thinking*, 2026
- [49] DRAW.IO 30.3.14, 2026
- [50] GOOGLE: „Google Maps,“ 2026. Verfügbar: <https://www.google.com/maps>. Zugriff am 25. 06. 2026

Übersicht verwendeter Hilfsmittel

Zur Unterstützung der Strukturierung der Arbeit, sprachlicher Gestaltung sowie zur Erstellung von Abbildungen wurde KI-Unterstützung in Form von ChatGPT (OpenAI, Modell GPT-5.6 Thinking). Sämtliche Ergebnisse wurden vom Verfasser fachlich überprüft, bewertet und an die Anforderungen der angepasst.

VII Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Datenblatt Maßband Bosch Professional	Seite: XX
Anlage 2: Ausschnitt Betriebsanleitung BMW GS 1300	Seite: XXI
Anlage 3: Zulassungsbescheinigung Teil 1 BMW GS 1300	Seite: XXIV
Anlage 4: Zulassungsbescheinigung Teil 1 Mercedes Vito	Seite: XXV
Anlage 5: Datenblatt CANON EOS 600 D	Seite: XXVI
Anlage 6: Datenblatt CANON EF 28-135	Seite: XXVII
Anlage 7: Datenblatt Iphone 16 Pro Kamera	Seite: XXX

Anlage 1: Datenblatt Maßband Bosch Professional

Bosch Professional - Maßband - 8 m -



Produktdatenblatt



Klingenbreite: 5 cm

Produktbeschreibung: Bosch Professional - Maßband - 8 m -



	Klingenbreite: 5 cm
Gruppe:	Bauausstattung
Hersteller:	Bosch
Hersteller Artikel Nr:	1600A01V3S
Hauptmerkmale	
Produktbeschreibung	Bosch Professional - Maßband - 8 m - Klingenbreite: 5 cm
Produkttyp	Maßband
Messlänge	8 m
Klingenbreite	5 cm

182 **TECHNIK IM DETAIL**

Wie funktioniert ACC?

Vom Radarsensor in der Front werden vorausfahrende Objekte erkannt. Gleichzeitig ermittelt der Radarsensor über die Gierrate und Fahrzeuggeschwindigkeit den sogenannten Fahrschlauch, also den Korridor, in dem sich das Motorrad die nächsten ca. 100 m bewegen wird. Befindet sich eines der erkannten Objekte im Fahrschlauch, wird darauf reagiert und die Geschwindigkeit so angepasst, dass der gewünschte Abstand zum Objekt sichergestellt wird.

Regelfunktionen des ACC

Die ACC-Regelung ist in die fünf folgenden Regelfunktionen aufgeteilt:

- **Temporegelung:** Die vom Fahrer gespeicherte Geschwindigkeit wird eingeregelt.
- **Abstandsregelung:** Die vom Fahrer gespeicherte Geschwindigkeit wird unter Berücksichtigung des Abstands zu vorausfahrenden Fahrzeugen eingeregelt.
- **Kurvenregelung:** Bei Kurvenfahrt wird die Geschwindigkeit gegebenenfalls reduziert und eine komfortable Schräglage (z. B. 20°) angestrebt.

Zusätzlich wird die Brems- und Beschleunigungsdynamik mit zunehmender Schräglage begrenzt, damit keine plötzlichen Brems- bzw. Beschleunigungsmanöver den Fahrer überraschen. Die Kurvenregelung verhindert z. B. unerwartete Beschleunigung bei Objektverlust und zu hoch gewählter Geschwindigkeit. Ein Objektverlust kann entstehen, wenn in der Kurve das Vorderfahrzeug nur noch eingeschränkt vom Radar erfasst wird.

- **Überholassistent:** In Folgefahrt kann der Fahrer durch Blinken in Richtung der Überholrichtung die Funktion des Überholassistenten auslösen. Diese sorgt für eine Erhöhung der Beschleunigung des eigenen Fahrzeugs und damit zu einem flüssigen Überholmanöver. Sollte kein Überholmanöver durchgeführt werden, verkleinert sich der Abstand zum Vorausfahrenden kurzzeitig.
- **Überholverhinderung:** Die ACC Funktion verhindert, dass ein Fahrzeug, für das kein Überholvorgang bestimmt ist, überholt wird. Dazu gehört zum Beispiel ein Fahr-

zeug, welches im Rechtsverkehr auf der linken Seite fährt oder ein Fahrzeug, welches im Linksverkehr auf der rechten Seite fährt. Wird ein solches Fahrzeug erkannt, wird der Abstand zu diesem eingeregelt. Ein kurzes Gasgeben oder Blinken zur entgegengesetzten Seite sorgt für die Abschaltung der Überholverhinderung.

Geschwindigkeitsbereich des ACC

Die ACC-Funktion kann in den folgenden Geschwindigkeitsbereichen aktiviert werden:

- 30...160 km/h
- Wenn ACC im Geschwindigkeitsbereich höher 160 km/h aktiviert wird, wird die maximale Geschwindigkeit von 160 km/h gewählt.

Einflussnahme auf die Performance von ACC

Der Fahrer kann durch das folgende Verhalten die Performance von ACC unterstützen:

- Ruhige Fahrweise.
- Möglichst mittig in der Fahrspur hinter dem Vorderfahrzeug fahren.
- Bei Überholmanövern deutlich die Spur ändern, um das Ab-

wählen des Vorderfahrzeugs zu unterstützen.

- Möglichst früh hinter Vorderfahrzeugen einscheren, um Zeit zur Objektauswahl zu geben.

FRONTKOLLISIONSWARNUNG (FCW)

Was ist FCW?

Die BMW Motorrad FCW ist ein Auffahrwarnsystem, welches vor kritischen Situationen im Längsverkehr warnt und den Fahrer bei der Erkennung und Bewältigung unterstützt. Die Funktion dient der Kollisionswarnung und Bremsunterstützung. Kollisionswarnungen werden visuell durch die Instrumentenkombination und haptisch durch Warnimpulse ausgelöst.

Die Kollisionswarnungen erfolgen zweistufig durch die Vorwarnung und die Akutwarnung. Die Vorwarnung wird mindestens visuell in der Instrumentenkombination dargestellt. Falls im Menü aktiviert, erfolgt zeitgleich eine haptische Warnung durch einen Warnimpuls (120). Der Warnimpuls lenkt die Aufmerksamkeit auf die Gefahrensituation.

Anlage 3: Zulassungsbescheinigung Teil 1 BMW GS 1300

14.01.2026	0005	DKC000634	2	107	17750	225
L3e-A3			2212-2212		1000-1000	
WB10M2101T6M27572			1376-1376		240	0,45
BMW					465	
GG13			110	465		
0M21			190	319		
AF1			190	319		
			90	3875	76	
					2	
R 1300 GS			120/70 R19 60V MC			
BAYER.MOT.WERKE-BMW			170/60 R17 72V MC			
2rÄdr. KR > 35 kW						
134/2014*2018/295A3			e1*168/2013*00326*03			
EURO5+;L3e-A1-A3;PI/CI/Hybr			16.06.2025	K	HU210575	
Benzin			SelbstF-VermietFzg			
0001	15P30	1300				
S.1:WW.1*						

Anlage 4: Zulassungsbescheinigung Teil 1 Mercedes Vito

14.12.2007	0999	AHU001307	2	1	150/3800	198
M1	AF		4748-4848		1906 - 1906	
WDF63970113395212		9	1903-1953		1790 - 2290	
MERCEDES-BENZ				150		
639			244	2940	2940	
ZK5HK			1550	1550		
3F6B2B1			1550	1550		
			75	2850	71	
VITO 120 CDI			2500	750	9	
DAIMLERCHRYSLER (D)			225/60R16C OD.RF 101/99H			
Fz.z.Pers.bef.b. 8 Spl.			225/60R16C OD.RF 101/99H			
Mehrzweckfahrzeug						
70/220*2003/76B			Grau /		7 /	
98/69/EG III-B			e9*2001/116*0048*10			
Diesel			14.05.2007	K	HS058356	
0002	0469	2987				
ZU F.1/F.2 +100 B ANH.BETR.*ZU 7.2/8.2 +150 KG B ANH.BETR.*						
S.1-MAX S-PL.*STUFE PM5 AB TAG DER ERSTZUL.*WW.AHK.LT.EGTG						
/ABE*ZUL.GES-GEW.D.ZUGES MAX 5300KG*						

Anlage 5: Datenblatt CANON EOS 600 D

Canon EOS 600D Datenblatt



Modell	Canon EOS 600D
andere	EOS Kiss X5
Typenbezeichnungen	EOS Rebel T3i
EANs inkl. Varianten und Bundles	4960999984094, 8714574569420, 8714574569499, 8714574569567, 8714574569963, 8714574585796, 8714574601984
Markteinführung	April 2011
Unverb. Preisempfehlung*	699,00 € weitere ...
Gebraucht-Preis (ANZEIGE)	Canon EOS 600D für 108 bis 209 € bei MPB
Kameraklasse(n)	Spiegelreflexkamera. Systemkamera
Elektronik	
Sensor	CMOS-Sensor APS-C 22,5 x 15 mm (Cropfaktor 1,6) 18,7 Megapixel (physikalisch) und 18,0 Megapixel (effektiv)
Pixelpitch	4,3 µm
Fotoauflösung	5.184 x 3.456 (3:2) 2.592 x 2.592 (1:1) weitere ...
Bildformate	JPG, RAW
Farbtiefe	24 Bit (8 Bit pro Farbkanal), 42 Bit (14 Bit pro Farbkanal)
Metadaten	Exif (Version 2.21), DCF-Standard (Version 2.0)
Videoauflösung	1.920 x 1.080 (16:9) 29p 1.280 x 720 (16:9) 59p 640 x 480 (4:3) 59p
Maximale Aufnahmedauer	29 min 59 sek
Videoformat	MOV (Codec H.264)
Audioformat (Video)	WAV

Fokussierung

Autofokusart	Phasenvergleich-Autofokus mit 9 Sensoren
Schärfenkontrolle	Schärfentiefenkontrolle, Abblendtaste, Live View

Sucher und Monitor

Spiegelreflexsucher	Spiegelreflexsucher (Spiegelsucher) (95 % Bildabdeckung), 19 mm Augenabstand, Dioptrienausgleich (-3,0 bis +1,0 dpt), Mattscheiben wechselbar, Gitter einblendbar
Monitor	3,0" TFT LCD Monitor mit 1.040.000 Bildpunkten

Belichtung

Belichtungsmessung	Mittenbetonte Integralmessung, Matrix/Mehrfeld-Messung über 63 Felder, Spotmessung (Messung über 4 % oder 9 % des Bildfeldes)
Belichtungszeiten	1/4.000 bis 30 s (Automatik) Bulb-Funktion
Belichtungssteuerung	Programmautomatik, Blendenautomatik, Zeitautomatik, Manuell
Belichtungsreihenfunktion	Belichtungsreihenfunktion mit maximal 3 Aufnahmen, Schrittweite von 1/3 bis 2 EV
Belichtungskorrektur	-5,0 bis +5,0 EV mit Schrittgröße von 1/3 EV
Lichtempfindlichkeit	ISO 100 bis ISO 6.400 (Automatik) ISO 100 bis ISO 12.800 (manuell)
Fernzugriff	Fernausslösung
Motive	diverse Motivprogramme, Landschaft, Nachtaufnahme, Nahaufnahme, Porträt, Sport/Action, Vollautomatik, 1 weitere Motivprogramme
Bildeffekte	S/W-Filter in Gelb/Orange/Rot/Grün, S/W-Tönungseffekte in Blau/Violett/Grün
Weißabgleich	Automatik, Wolken, Sonne, Weißabgleichsbelichtungsreihe, Feinabstimmung, Schatten, Blitzlicht, Leuchtstofflampe, Glühlampenlicht, Manuell
Farbraum	Adobe RGB, sRGB
Serienaufnahmen	Serienbildfunktion max. 3,7 Bilder/s bei höchster Auflösung und max. 34 gespeicherten Fotos, bzw. 6 RAW-Bilder
Selbstausröser	Selbstausröser mit Abstand von 2 s, Besonderheiten: oder 10 s (wahlweise)
Aufnahmefunktionen	Live-Histogramm

Ausstattung

Bildstabilisator	nein
Speicher	SD
Netzteil	Netzteilanschluss
Stromversorgung	1 x Canon LP-E8 (Lithiumionen (Li-Ion), 7,4 V, 1.080 mAh)
Wiedergabe-Funktionen	Wiedergabe-Histogramm, Bildindex, Diashowfunktion
Sprachnotiz	vorhanden
Sonder-Funktionen	Orientierungssensor, Live View
USB-Typ	USB 2.0 High Speed
AV-Anschlüsse	AV-Ausgang: HDMI-Ausgang Mini (Typ C)
Webcam-Funktion	ja, nur mit herstellerspezifischem Treiber, ohne Mikrofon-Unterstützung
Webcam-Auflösung	1.024 x 576 (16:9) 30 fps
Unterstützte Direkt-Druck-Verfahren	Canon Direct Print, PictBridge
Stativgewinde	1/4"
Besonderheiten und	eingebauter Tiefpass-Filter mit Staubschutz-Funktion

Anlage 6: Datenblatt CANON EF 28-135

Zoom-Objektiv

Canon EF 28-135 mm 3.5-5.6 IS USM

Die höchste Abbildungsleistung ist nutzlos, wenn das Bild durch Verwacklungsunschärfe verdorben wird. Freihandaufnahmen bei schwachem Licht werden zum Problem, insbesondere wenn ein Stativ nicht mitgenommen werden kann. Die bahnbrechende Image-Stabilizer (IS) Technologie gestattet die Verwendung einer bis zu zwei Stufen längeren Verschußzeit, so daß Sie ohne Stativ- oder Blitzinsatz auch unter schwierigen Lichtverhältnissen scharfe Aufnahmen machen können.



Hersteller	Canon
Modell	EF 28-135 mm 3.5-5.6 IS USM
Herstellerartikelnummer	2562A014
EANs inkl. Varianten und Bundles	4960999213422
Unverb. Preisempfehlung*	503,00 €
Gebraucht-Preis (ANZEIGE)	Canon EF 28-135mm f/3.5-5.6 IS USM für 114 bis 174 € bei MPB 
Brennweitenbereich	28-135 mm

Bajonett	Canon EF
Lichtstärke	F3,5 bis F5,6
Kleinste Blendenöffnung	F36
Anzahl Blendenlamellen	8
Autofokus	Fokusmotor im Objektiv (Ultraschallmotor)
Innenfokussierung	ja
Linsensystem	16 Linsen in 12 Gruppen
Apochromat	nein
KB-Vollformat	ja
Zoom-Motor	nein
Bildstabilisator	ja
Naheinstellgrenze	50 cm
Größter	1:5,3
Abbildungsmaßstab	
Filtergewinde	72 mm
Abmessungen (Ø x Länge)	78 x 96 mm
Gewicht	540 g
Stativschelle	nein
mitgeliefertes Zubehör	<u>Canon Rückdeckel E Objektivzubehör</u> Objektiv

Anlage 7: Datenblatt Iphone 16 Pro Kamera



iPhone 16 Pro - Technische Daten

Kamera

Pro Kamera-System

48 MP Fusion: 24 mm, $f/1.78$ Blende, optische Bildstabilisierung mit Sensorverschiebung der 2. Generation, 100 % Focus Pixel, Unterstützung für superhochauflösende Fotos (24 MP und 48 MP)

Ermöglicht außerdem 12 MP 2x Tele: 48 mm, $f/1.78$ Blende, optische Bildstabilisierung mit Sensorverschiebung der 2. Generation, 100 % Focus Pixel

48 MP Ultraweitwinkel: 13 mm, $f/2.2$ Blende und 120° Sichtfeld, Hybrid Focus Pixel, superhochauflösende Fotos (48 MP)

12 MP 5x Tele: 120 mm, $f/2.8$ Blende und 20° Sichtfeld, 100 % Focus Pixel, Objektiv mit 7 Elementen, optische Bildstabilisierung mit 3D Sensorverschiebung und Autofokus, Tetraprisma Design

5x optisches Einzoomen, 2x optisches Auszoomen, 10x optischer Zoombereich

Bis zu 25x digitaler Zoom

Kamerasteuerung

Anpassbares Standardobjektiv (Fusion)

Objektiv-Abdeckung aus Saphirkristall

Adaptiver True Tone Blitz

Photonic Engine

Deep Fusion

Smart HDR 5

Porträts der nächsten Generation mit Fokus- und Tiefen-Kontrolle

Porträtlicht mit sechs Effekten

Nachtmodus

Nachtmodus Porträts durch den LiDAR Scanner

Panoramabild (bis zu 63 MP)

Videoaufnahme

Fotografische Stile der neuesten Generation

Räumliche Fotos

48 MP Makrofotos

Apple ProRAW

Fotos und Live Photos mit großem Farbraum

Objektiv-Korrektur (Ultraweitwinkel)

Fortschrittliche Rote-Augen-Korrektur

Automatische Bildstabilisierung

Serienbildmodus

Geotagging für Fotos

Aufgenommene Bildformate: HEIF, JPEG und DNG

4K Dolby Vision Videoaufnahme mit 24 fps, 25 fps, 30 fps, 60 fps, 100 fps (Fusion) oder 120 fps (Fusion)

1080p Dolby Vision Videoaufnahme mit 25 fps, 30 fps, 60 fps oder 120 fps (Fusion)

720p Dolby Vision Videoaufnahme mit 30 fps

Kinomodus bis zu 4K HDR mit 30 fps

Actionmodus bis zu 2,8K mit 60 fps

Räumliche Videoaufnahme bei 1080p mit 30 fps

ProRes Videoaufnahme bis zu 4K mit 120 fps mit externer Aufnahme

Log Videoaufnahmen

Academy Color Encoding System

Makrovideoaufnahme mit Zeitlupe und Zeitraffer

Unterstützung für Zeitlupenvideo bis zu 4K mit 120 fps (Fusion) und bis zu 1080p mit 240 fps (Ultraweitwinkel und Tele)

Zeitraffervideo mit Bildstabilisierung

Nachtmodus Zeitraffer

QuickTake Video bis zu 4K mit 60 fps in Dolby Vision

Optische Bildstabilisierung mit Sensorverschiebung der 2. Generation für Video (Fusion)

Optische Bildstabilisierung mit 3D Sensorverschiebung und Autofokus für Video (Tele)

Bis zu 25x digitaler Zoom

Audiozoom

True Tone Blitz

Cinematic Videostabilisierung (4K, 1080p und 720p)

Kontinuierlicher Autofokus

Während der Aufnahme von 4K Video Fotos mit 8 MP machen
Zoomen bei der Wiedergabe
Aufgenommene Videoformate: HEVC, H.264 und ProRes
3D Audio und Stereoaufnahme
Vier Mikrofone in Studioqualität
Windgeräusche reduzieren
Audiomix