

1. Einleitung

Die Begriffe Motorrad und Motorradfahren sind mit Fahrspaß und Freiheit untrennbar verbunden. Einige Gebiete - wie beispielsweise Südtirol mit den Dolomiten - sind bekannt und beliebt aufgrund ihrer kurvenreichen Strecken. Andere Straßen - wie zum Beispiel die „Route 66“ - erlangten einen Kultstatus und gelten als Symbol für Freiheit. Maßgeblich sind jedoch die besonderen Eigenschaften des Motorrads als einspuriges Kraftfahrzeug für die Faszination Motorradfahren verantwortlich. Diese Faszination beruht im Wesentlichen auf der „Unmittelbarkeit des Fahrerlebnisses, der Dynamik und der Intensität der Sinnesbeanspruchung.“ [Spi89; Spi06].

Alleinstellungsmerkmale des Motorrads sind der zusätzliche Freiheitsgrad mit großem Rollwinkel, das geringe Leistungsgewicht und das daraus resultierend gute Beschleunigungsvermögen sowie die schmale Silhouette, die das Fahren von Ideallinien innerhalb eines Fahrstreifens erlaubt. Das Motorrad hat einen vergleichsweise geringen Bedarf an Verkehrsfläche. Da sich - im Gegensatz zum mehrspurigen Kraftfahrzeug - das Motorrad stets im labilen Gleichgewicht befindet und sich dynamisch stabilisiert, bedingt dies eine permanente Rückkopplung und Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug (Fzg). In südeuropäischen, südamerikanischen oder asiatischen Ländern sowie dem pazifischen Raum ist das motorisierte Zweirad ein etabliertes und alltägliches Verkehrsmittel. Genauso in diesen Regionen gibt es im Zuge der Urbanisierung eine Vielzahl an schnell wachsenden Städten mit steigender Verkehrsdichte ([US19a, S. 5ff] zitiert aus [US19b]). Hier kann das Zweirad mit einem geringen Verkehrsflächenbedarf bei niedrigen Geschwindigkeiten ein Lösungsansatz der Mobilität darstellen und so weiter an Bedeutung gewinnen. In Deutschland hingegen ist das Motorrad ein saisonales und überwiegend in der Freizeit genutztes Fahrzeug. Die Emotionalität und die Vielfalt des Erlebens dieser Fahrzeuge sowie die Vorteile des motorisierten Zweirads im urbanen Raum sind Gründe dafür, dass Motorradfahren fasziniert und sich Motorräder hoher Beliebtheit erfreuen. [Küh08, S. 8; Sto12, S. 1, S. 247]

In dieser Arbeit wird zwischen *motorisiertem Zweirad* sowie *Motorrad* wie folgt unterschieden:

- *Motorisierte Zweiräder* sind alle Zweiräder mit Motor, sowohl mit Versicherungskennzeichen als auch mit Zulassungspflicht (Kennzeichen). Ausgenommen sind Zweiräder mit Hilfsmotor wie bspw. Motorfahrrad (MoFa), Pedelecs oder ähnliches. Die amtliche Definition für motorisierte Zweiräder enthält unter Umständen drei- und vierrädrige Kraftfahrzeuge wie bspw. Trikes oder Quads.
- *Motorräder* sind zulassungspflichtige motorisierte Zweiräder mit amtlichen Kennzeichen und einem Hubraum über 50 cm^3 und/oder einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 45 km/h.

1.1. Relevanz motorisierter Zweiräder im Unfallgeschehen

Basierend auf Erkenntnissen der World Health Organization (dt.: Weltgesundheitsorganisation) (WHO) im Bezugsjahr 2016 sterben jährlich 1,35 Millionen Menschen an den Folgen eines Ver-

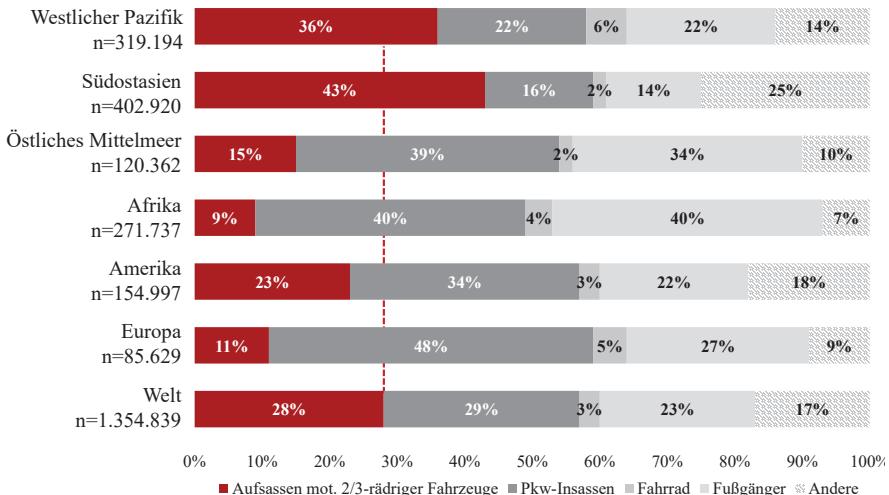


Abbildung 1.1.: Verteilung Getötete nach Art der Verkehrsteilnahme und Region gem. WHO [Org18b, S. 11 - Fig. 6]

kehrsunfalls. Es ist damit acht häufigste Todesursache für alle Altersgruppen und die häufigste Todesursache für Menschen im Alter von 15 bis 29 Jahren [Org18b, S. 4-6]. Die Zahl der Getöteten im Straßenverkehr weltweit ist - bedingt durch steigende Zahlen in Afrika und Südostasien - tendenziell steigend [Org18a, S. 2-5]. Unter den Getöteten im Straßenverkehr sind mit 54 % die Mehrheit ungeschützte Verkehrsteilnehmer. Hierzu zählen Fußgänger, Radfahrer und Aufsassen motorisierter zwei- sowie dreirädriger Fahrzeuge [Org18b, S. 11 - Fig. 6].

Weltweit sind 28 % der Getöteten im Straßenverkehr Aufsassen motorisierter zwei- bzw. dreirädriger Fahrzeuge. Die Abbildung 1.1 zeigt die Anteile der Getöteten nach Art der Verkehrsbeteiligung in den Regionen gemäß WHO. In den Regionen Südostasien mit 43 % oder Westpazifik mit 36 % sind diese Anteile höher. Hier ist das motorisierte zwei- bzw. dreirädrige Fahrzeug mit über 70 % Anteil an der Fahrzeugflotte ein überwiegend alltägliches Verkehrsmittel [IMM19, Abb. S. 18; Org18b, S. 11 Fig. 6].

In Europa starben 85.629 Menschen an den Folgen eines Verkehrsunfalls und erreichten damit 2016 einen Tiefststand. Dabei waren 11 % der getöteten Verkehrsteilnehmer Aufsassen von motorisierten zwei- bzw. dreirädrigen Fahrzeugen. Es ergibt sich allerdings ein inhomogenes Unfallgeschehen. In Osteuropa liegt der Anteil getöteter Aufsassen zwischen 5 % in Rumänien und 12 % in Lettland. In Zentral- und Südeuropa hingegen sind es um die 20 % Anteil getöteter Aufsassen. Ausnahmen hierbei sind Italien (25,6 % Anteil) sowie Griechenland (32,4 % Anteil). [Org18b]

In Deutschland stieg der Anteil zulassungspflichtiger Kraftfahrzeuge von 1991 (1.491.694 Fahrzeuge¹) bis 2019 (4.438.600 Fahrzeugen²) um das fast Dreifache an [Bun19c, S.54]. Bei Personenkraftwagen (Pkw) lässt sich zwar ein ähnlicher, nicht so ausgeprägter Trend feststellen. Hier stieg die An-

¹mit vorübergehenden Stilllegungen

²ohne vorübergehenden Stilllegungen

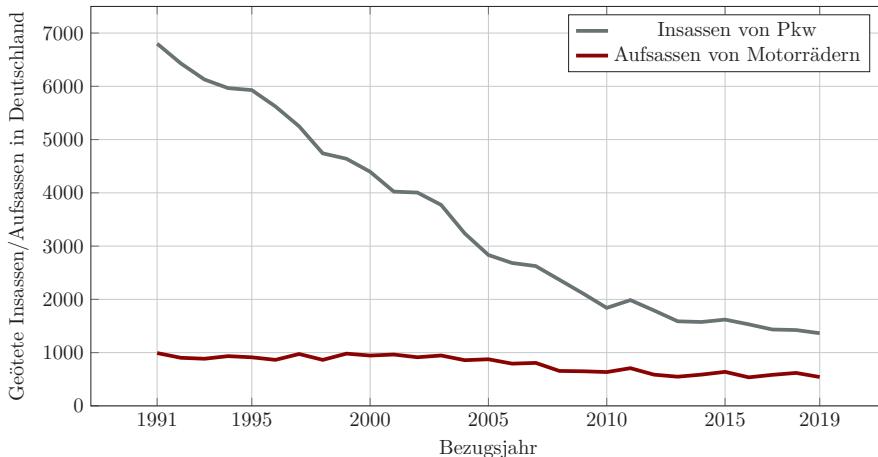


Abbildung 1.2.: Getötete Insassen von Personenkraftwagen und Aufsassen motorisierter Zweiräder in Deutschland 1991 bis 2019 [Bun19d, S. 141]

zahl zugelassener Pkw von 1991 (32.087.560 Fahrzeuge¹) bis 2019 (46.542.119 Fahrzeuge²) um das 1,4-fache ebenfalls an [Bun19c, S. 54]. Trotz steigender Fahrzeugbestände erreichte die Anzahl der Verkehrstoten 2019 mit 3.046 Getöteten den tiefsten Stand in der Geschichte der Bundesrepublik Deutschland. Die Gründe für diesen Rückgang sind vielschichtig und wirken durch Ineinandergreifen von Einzelmaßnahmen, darunter die Entwicklungen in der aktiven und passiven Fahrzeugsicherheit, die Einführung gesetzlicher Regelungen, Maßnahmen im Straßenbau und Gestaltung des Verkehrsraums, Verbesserung in der Verkehrsregelung sowie der Verkehrserziehung und -aufklärung, dem Fahrertraining als auch in der präklinischen und klinischen Versorgung.

Einen sehr großen Einfluss für den Rückgang der Getöteten im Straßenverkehr haben Entwicklungen der Fahrzeugsicherheit - vor allem beim Pkw - wie bspw. die steife Fahrgastzelle mit Energieabsorptionszonen, der Sicherheitsgurt, der Airbag sowie Fahrdynamikregelsysteme [Kra+13, S. 5]. Erkennbar ist dies an der Reduktion getöteter Pkw-Insassen seit 1991 in Abbildung 1.2. Aktuell werden passive Sicherheitssysteme mit Funktionen der aktiven Sicherheit verknüpft. Durch diesen integralen Sicherheitsansatz ergeben sich weitere Potentiale [Kra+13, S. 143]. Zusätzlich dazu sind im Bereich des Pkw Fahrerassistenzsysteme sowie automatisierte Fahrfunktionen in der Entwicklung bzw. Markteinführung, die eine weitere Reduktion bewirken sollen.

Die Anzahl getöteter Nutzer motorisierter Zweiräder sank von 1991 mit 1.235 Getöteten bis 2019 mit 605 Getöteten. Dies zeigt, dass Motorradfahren - trotz steigendem Bestand sowie gestiegener Fahrleistung - sicherer wird [Bun19c, S. 5, S. 54]. Im Bereich der Zweiradsicherheit wird dieser Umstand auf stetig bessere Angebote im Fahrertraining [KB14]; auf die Entwicklung neuer Helme und Schutzkleidung; neuer Fahrwerke, Bremsen und Reifen; oder Fahrdynamikregelsysteme wie Anti-Blockier-System (ABS) oder Antriebsschlupfregelung (ASR) zurückgeführt [WHW15, S. 768ff]. Dennoch ist der Rückgang der getöteten Aufsassen von Motorrädern unterproportional zum Rückgang der getöteten Insassen von Pkw, wie Abbildung 1.2 mit der Anzahl getöteter Aufsassen im Vergleich zu Pkw-Insassen zeigt.

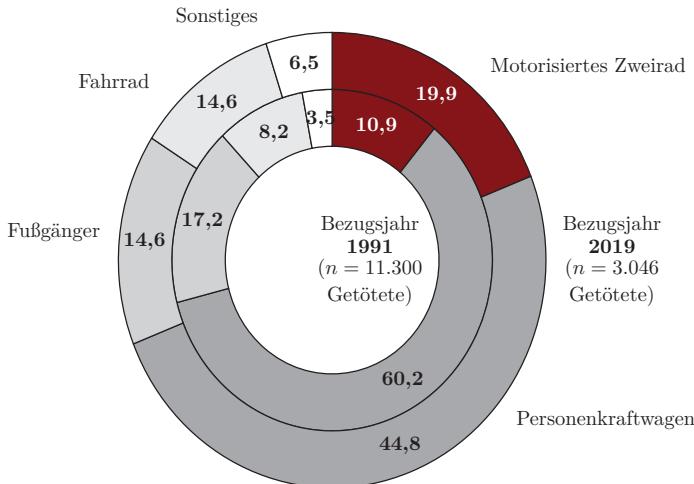


Abbildung 1.3.: Verteilung Getötete nach Art der Verkehrsteilnahme in Prozent in Deutschland 1991 und 2019 [Bun19d, S. 141]

Der direkte Vergleich der Jahre 1991 sowie 2019 zeigt den steigenden Handlungsbedarf in der Fahrzeugsicherheit für motorisierte Zweiräder. Abbildung 1.3 zeigt die Verteilung getöteter Verkehrsteilnehmer nach Art der Verkehrsteilnahme bzw. Fahrzeugnutzung. Einerseits sank die Anzahl getöteter Nutzer motorisierter Zweiräder von 1991 bis 2019 in absoluten Zahlen, jedoch stieg deren Anteil von ca. 11 % auf 20 % um fast das Doppelte deutlich an. Im gleichen Zeitraum sank der Anteil getöteter Pkw-Insassen von über 60 % (6.801 Getötete) auf unter 45 % (1.364 Getötete) [Bun19d, S. 141]. Dieser Vergleich verdeutlicht die steigende Relevanz von Aufsassen motorisierter Zweiräder.

Die Betrachtung der Unfallrisikokennzahlen aus dem Jahr 2019 in Tabelle 1.1 zeigt die höhere Gefährdung von Motorradaufsassen gegenüber Pkw-Insassen. Zwar kamen mit 542 getöteten Motorradaufsassen weniger Menschen ums Leben als Insassen von Pkw mit 1.364 getötete Personen. Mit 27.927 Verunglückten wurden Aufsassen motorisierter Zweiräder weniger oft verletzt als Insassen von Pkw mit 207.493 Verunglückten. Dem stehen die geringeren Fahrleistungen von Motorrädern gegenüber, da das Unfallrisiko auf die gefahrene Strecke bezogen werden muss. So lag die Fahrleistung eines Motorrads im Jahr 2014 mit knapp 3.000 km pro Jahr weit unter der eines Pkws mit 14.500 km pro Jahr [Bäu+17, S. 70 Tab. 32]. Unter Nutzung der Inlandsfahrleistung, die die zurückgelegte Strecke aller Fahrzeuge einer Fahrzeugart innerhalb von Deutschland beschreibt, ergeben sich entsprechende Risiken je 1 Mrd. km. Das relative Risiko ist der Quotient eines Risikos und dem Risiko einer Vergleichsgruppe.

Das relative Risiko für Motorradnutzer im Vergleich zu Pkw-Insassen - bezogen auf die zurückgelegte Strecke - ist *5,11-fach höher* in einen *Unfall* mit Personenschäden *verwickelt* zu werden, *8,82-fach höher* bei einem Verkehrsunfall *zu verunglücken* und *26,04-fach höher* bei einem Verkehrsunfall *getötete* zu werden. Der Vergleich des Unfallrisikos verdeutlicht das erhöhte Risiko von Aufsassen motorisierter Zweiräder, insbesondere im Vergleich zu Insassen von Pkw.

Tabelle 1.1.: Vergleich der Unfallrisikokennzahlen zwischen Pkw und Motorrad [Bun19c, S.54ff]
 [Bun19d, S.10, 104, 138] [Bäu+17]

Unfallrisiko im Jahr 2019	Pkw	Motorrad
Fahrzeugbestand (Anzahl)	46.542.119	4.438.600
Inlandsfahrleistung (Mrd. km)	650,267	9,925
Unfallbeteiligte (Anzahl)	357.327	27.850
Verunglückte Insassen bzw. Aufsassen	207.493	27.927
Getötete Insassen bzw. Aufsassen	1.364	542
Beteiligte je 1 Mrd. km	550	2.806
Relatives Risiko	1	5,11
Verunglückte je 1 Mrd. km	319	2.814
Relatives Risiko	1	8,82
Getötete je 1 Mrd. km	2,1	54,6
Relatives Risiko	1	26,04

1.2. Stand der Fahrzeugsicherheit motorisierter Zweiräder

Die Steigerung der Verkehrssicherheit motorisierter Zweiräder kann in fünf Kategorien eingeteilt werden: Der Fahrer mit (1) angepasstem Fahrerverhalten sowie (2) Schutzkleidung; (3) sicherheitserhöhende Fahrzeugfunktionen, (4) Unfallvermeidung und Partnerschutz bei anderen Verkehrsteilnehmern sowie (5) Verbesserungen und Anpassungen in der Infrastruktur (vgl. [Bea14; Bas14; Per14]).

Es gibt bei Zweirädern - abgesehen vom BMW C1 [KOR00] - keine Fahrgastzelle als Überlebensraum. Auch wird der Aufsasse in der Regel nicht über einen Sicherheitsgurt an die Verzögerung des Fahrzeugs gekoppelt. Dabei schützen den Aufsassen dann nur der Helm sowie die Schutzkleidung gegenüber Kollisionsobjekten. Die Verbesserung der passiven Sicherheit für Zweiradaufsassen ist Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung [RS00; MB09; Sab10; Gör12; Hei16].

Systeme der aktiven Fahrzeugsicherheit zur Unfallvermeidung, die entsprechende Konfliktsituatiosn adressieren, bieten ein weiteres großes Potential. Ebenso haben Fahrerassistenzsysteme das Potential, durch Unterstützung des Fahrers das Unfallrisiko zu reduzieren. Abbildung 1.4 zeigt die Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen für Pkw und Motorräder nach ihrer Komplexität über der Zeit. Die Komplexität wird als steigend angenommen, je mehr Sensorik, Aktorik, Regelung sowie Kenntnisse über die Fahrdynamik der Assistenzfunktion zugrunde gelegt werden. Zwischen der Einführung der Systeme bei Pkw sowie Motorrädern zeigt sich ein zeitlicher Versatz. So wurde das ABS 1988 etwa 10 Jahre nach dem Pkw im Markt eingeführt [Sto12; WHW15, S. 768]. Die Dynamic Traction Control (dt.: Dynamische Traktionskontrolle) (DTC) hat einen größeren zeitlichen Versatz von 22 Jahren zwischen der Markteinführung beim Pkw 1987 und beim Motorrad 2009. Weiterhin vergleichbar ist die Assistenz bei Kurvenbremsungen, umgesetzt im Pkw mit dem cornering brake control (dt.: Kurvenbremsassistent) (CBC) 1997 und 17 Jahre später im Motorrad

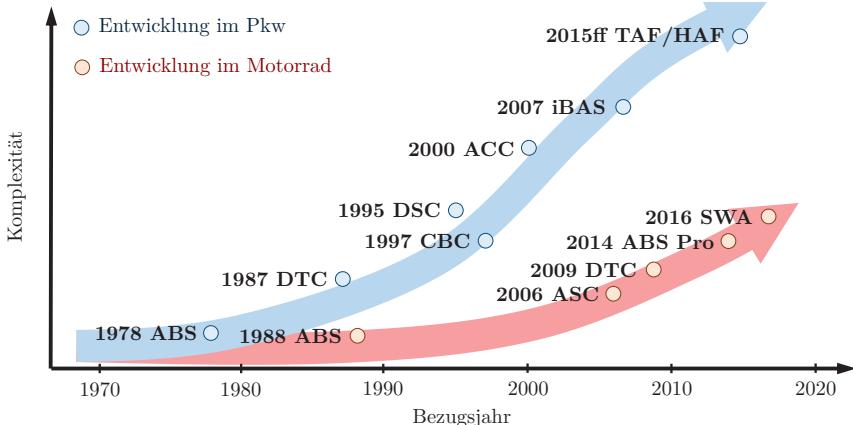


Abbildung 1.4.: Entwicklung der Fahrerassistenzsysteme bei Personenkraftwagen (blau) im Vergleich zum Motorrad (rot) - vgl. [Han22, S. 4 Abbildung 1.3]

als ABS „Pro“. Zuletzt wurde die Komfortfunktion Adaptive Cruise Control (dt.: Abstandsregelanlage) (ACC) für das Motorrad in Modellen unterschiedlicher Hersteller für 2021 angekündigt. Diese Markteinführung findet demnach 20 Jahre nach der Einführung im Pkw statt. Der Side View Assist (dt. Totwinkelassistent) (SVA) ist das erste System am Motorrad mit Umfeldsensorik, während es mit der Einführung von Teilautomatisiertes Fahren (TAF) bzw. Hochautomatisiertes Fahren (HAF) im Pkw weitere Fortschritte in der Automatisierung des Fahrzeugs gibt. Gerade Fahrerassistenzfunktionen, die auf Umfeldsensorik sowie einem erweiterten Fahrdynamikwissen basieren, werden die weitere Entwicklung der aktiven Sicherheit des Motorrads maßgeblich gestalten.

1.3. Motivation

Die Maßnahmen der aktiven und passiven Fahrzeugsicherheit führen dazu, dass immer weniger Insassen von Pkw bei Verkehrsunfällen zu Schaden oder ums Leben kommen. Dieser Abwärtstrend durchzieht sich erfreulicher Weise aufgrund vieler ineinander greifender Einzelmaßnahmen über das gesamte Spektrum der Verkehrsteilnehmer. Weitere Potentiale werden durch aktive und integrale Maßnahmen ausgeschöpft und in steigendem Umfang von Gesetzgeber und Verbraucherschutz gefordert.

Motorisierte Zweiräder stellen im Gegensatz zum Pkw eine Besonderheit bezüglich Mobilitätsverhalten, Fahrermotivation, Fahrverhalten sowie Anforderungen an die aktive und passive Fahrzeugsicherheit dar. Neben passiven Schutzmaßnahmen wie Bekleidung und Helme für Aufsassen sind Fahrdynamikregelsystemen in Serienreife für motorisierte Zweiräder verfügbar.

Die Entwicklung im Bereich der Fahrzeugsicherheit im Pkw ergab hier in der Vergangenheit einen Vorsprung. Aufgrund der Entwicklung der Unfallzahlen steigt die Relevanz sowie der Handlungsbedarf hinsichtlich der Sicherheit bei Zweirädern. Es ist ebenfalls zu erwarten, dass aus den genannten

Gründen die Gesetzgebung und der Verbraucherschutz künftig höhere Anforderungen stellen werden, da der Abwärtstrend bei motorisierten Zweirädern nur unterproportional jenem Trend der Pkw-Insassen folgt. Gerade aktive Sicherheitssysteme wie Fahrerassistenzsysteme, die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen sowie die zunehmenden Vernetzung des Verkehrs können einen entscheidenden Beitrag zur Steigerung der Sicherheit motorisierter Zweiräder leisten. Fahrerassistenzsysteme für Motorräder müssen im Unfallgeschehen maximal wirksam sein. Diese Systeme müssen aber auch durch den Fahrer akzeptiert und genutzt werden. Daher sind die Motivation und das Fahrerverhalten von Motorradfahrern in Weiterentwicklungen einzubeziehen. Diese Systeme sollen technisch machbar ausgestaltet und auf aktuellen Motorrädern absehbar umsetzbar sein.

1.4. Das Projekt TrackMoto

Diese Arbeit entstand im Rahmen einer Forschungskooperation zwischen der Technischen Universität Dresden und BMW Motorrad im Projekt „TrackMoto“. Das Ziel des Projekts ist es, auf Basis von Erkenntnissen zur Fahrdynamik motorisierter Zweiräder durch aktive längs- bzw. querdynamische Eingriffe die Motorradsicherheit zu erhöhen. Das Projekt gliedert sich in zwei Promotionsarbeiten. Die Arbeit von Hans [Han22] hat das Ziel, ein Fahrdynamikmodell zu entwickeln, welches die Fahrdynamik hinreichend genau beschreibt. Auf dieser Basis soll ein Regelungsansatz entwickelt und evaluiert werden, mit dem ein Motorrad automatisiert gefahren werden kann. Dabei sollen die gleichen Stellgrößen verwendet werden, wie sie einem menschlichen Fahrer zur Verfügung stehen. Das Fahrzeug soll optisch einem Serienmotorrad entsprechen und potentiell zulassungsfähig sein. Eine vollautomatisierte Demonstrationsfahrt soll die Machbarkeit des Konzepts beweisen. Auf die Erkenntnisse zur Fahrdynamik sowie den Ansätzen zur Regelung von Hans [Han22] baut diese Arbeit auf.

In der vorliegenden Arbeit sollen Fahrerassistenzsysteme unter Nutzung des Fahrdynamikmodells sowie der Ansätze zur Regelung entwickelt werden. Dabei soll der Fahrer mit seinem Fahrerverhalten, seinem Fehlverhalten bei Unfällen, seiner Motivation sowie seinen Verhaltensdeterminanten einbezogen werden. Das Ziel der Arbeit ist es, mit fahrdynamischen Eingriffen Fahrerassistenzsysteme abzuleiten und prototypisch umzusetzen. Im Ergebnis soll aufgezeigt werden, welche Fahrerassistenzsysteme künftig umsetzbar sind und welche Anpassungen am Serienfahrzeug notwendig sind.

1.5. Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Fahrerassistenzsysteme zu entwickeln, die im Unfallgeschehen maximal wirksam sind. Diese Fahrerassistenzsysteme sollen durch den Fahrer akzeptiert und genutzt werden. Aufgrund der Fahrdynamik, die sich wesentlich vom Pkw unterscheidet, können bestehende Systeme nicht einfach vom Pkw übernommen werden, sondern müssen auf das motorisierte Zweirad angepasst werden und Wechselwirkungen zwischen Fahrer und Fahrzeug berücksichtigen. Dabei muss das Fahrerverhalten von Motorradfahrern sowie die besondere Fahrdynamik des Motorrads als Einsturzfahrzeug berücksichtigt werden.

Die Untersuchungen des Normalfahrverhaltens sowie des Unfallgeschehens motorisierter Zweiräder liefert adressierbare Szenarien. Die Betrachtung der Szenarien in ihrem zeitlichen Verlauf ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung und liefert das Wirkfeld für Assistenzfunktionen. Die Kombination von Assistenzfunktionen mit Sensorik und Aktorik führt zu umsetzbaren Assistenzsystemen. In Anlehnung an das menschliche Fahrerverhalten werden Ansätze zur Regelung herangezogen. Die entwickelten Fahrerassistenzsysteme werden auf einem Versuchsträger umgesetzt und ihre technische Machbarkeit wird nachgewiesen. Abschließend wird die Wirksamkeit der Funktionen im Feld aufgezeigt.

Im Ergebnis steht ein Beitrag zur Steigerung der Fahrzeugsicherheit motorisierter Zweiräder durch die Entwicklung von Assistenzfunktionen in Anlehnung an das menschliche Fahrerverhalten, um identifizierte Unfallsituationen zu adressieren und künftig frühzeitig zu vermeiden.

1.6. Aufbau der Arbeit

Die Abbildung 1.5 gibt eine Übersicht über den Aufbau und die Struktur der vorliegenden Arbeit sowie ihrer Kapitel. Diese Übersicht schließt die Einleitung in **Kapitel 1** ab. In **Kapitel 2** wird der *Stand der Technik* beschrieben. Zunächst werden Grundlagen zur Fahrdynamik von Einspurfahrzeugen sowie entsprechende Modellierungsansätze vorgestellt. Es werden Fahraufgaben von Fahrrern beschrieben und eine Hierarchie als Ebenenmodell vorgestellt. Es folgt der Stand der Technik der Zweiradsicherheit mit Potentialen zur Steigerung der Verkehrssicherheit. Dabei werden aktive Sicherheitsfunktionen, automatisierte Fahrfunktionen sowie Potentiale des vernetzten Verkehrs betrachtet. Die Beschreibung des *Defizits im Stand der Technik* schließt Kapitel 2 ab. **Kapitel 3** beschreibt den *Stand der Wissenschaft*. Dabei wird der Stand zum Verkehrs- und Unfallgeschehen, zu Fahrerverhalten und Fahrfehler, Akzeptanzkriterien, Ableitung von Sicherheitsfunktionen, der Modellierung der Fahrdynamik sowie der Stand bei Wirksamkeitsbewertungen beschrieben. Das *Defizit im Stand der Wissenschaft* wird in jedem dieser sechs Aspekte mit einer Fragestellung versehen, welche im Verlauf der Arbeit beantwortet wird. In **Kapitel 4** wird das *Verkehrs- und Unfallgeschehen motorisierter Zweiräder* analysiert. Dazu werden behördliche Unfalldaten sowie die tiefenanalytische Unfalldatenerhebung der GIDAS herangezogen. Die Erkenntnisse aus dem Unfallgeschehen werden um das Fahrerverhalten, Fahrfehler sowie Erhebungen natürlicher Fahrräder ergänzt. Die identifizierten Szenarien werden in einem *Szenarienkatalog* beschrieben und quantifiziert. In **Kapitel 5** wird das *Fahrerverhalten* gemeinsam mit der *Fahrermotivation* beschrieben. Es werden Gruppen von Motorradfahrern beschrieben, Verhaltensdeterminanten verortet und Anforderungen an Assistenzsysteme abgeleitet. Auf Basis der Szenarien des Szenarienkatalogs werden *Assistenzfunktionen identifiziert*. Dabei wird das Wirkfeld beschrieben und die Assistenzfunktion nach ihrer technischen Machbarkeit und Assistenz in einer Fahraufgabe in einem Technologieradar verortet. In **Kapitel 6** wird die *Modellierung der Fahrdynamik* mit dem Entwurf des Fahrerdynamikmodells vorgestellt. Es basiert auf der Arbeit von Hans in [Han22]. In **Kapitel 7** werden die identifizierten *Assistenzfunktionen* mit Bezug zum adressierten Szenario aus dem Szenarienkatalog unter Nutzung des Fahrdynamikmodells *entworfen*. Die Assistenzsysteme werden in ihrer Struktur und Implementierung als Assistenzsysteme auf dem Versuchsträger beschrieben. Die Evaluation in der Realfahrt stellt den Nachweis der Machbarkeit dar. In **Kapitel 8** werden die Assistenzsysteme

hinsichtlich ihrer *Wirksamkeit im Feld* untersucht. Dabei wird einerseits das Vermeidungspotential beschrieben, andererseits eine mögliche Reduktion des Verletzungsrisikos bei nicht-vermiedenen Unfällen ermittelt. **Kapitel 9** gibt abschließend eine *Zusammenfassung der Ergebnisse*, diskutiert die Ergebnisse und gibt einen Ausblick.

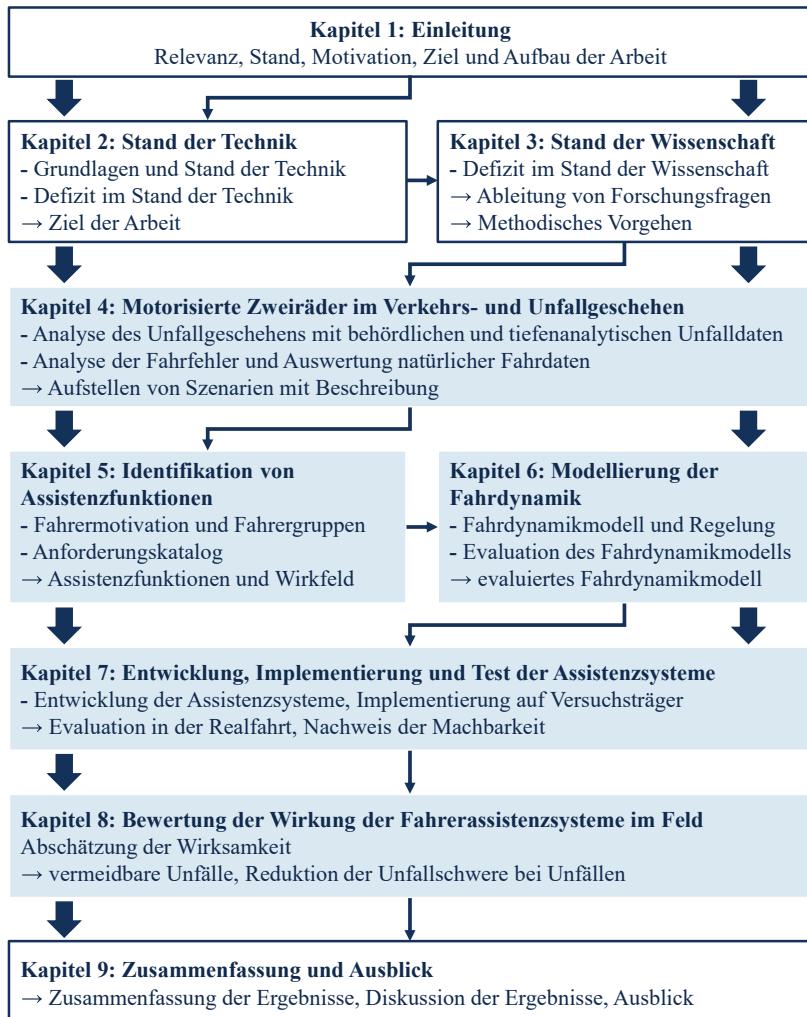


Abbildung 1.5.: Aufbau und Struktur der Arbeit

2. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik dargestellt. Die mathematischen sowie systemtheoretischen Grundlagen dieser Arbeit sind in Abschnitt A.2 im Anhang beschrieben. Die Aspekte, auf die hier Bezug genommen wird, finden sich in der Anwendung zur Herleitung der Fahrdynamik wieder. Die Fahrdynamik von Zweirädern ist besonders und wird in Abschnitt 2.1 mit Herleitungen beschrieben. Es wird auf Stabilität, Fahrverhalten, Instabilitäten und Besonderheiten eingegangen. Anschließend werden in Abschnitt 2.2 die Fahraufgabe sowie das Fahrerverhalten aus theoretischer Sicht betrachtet und die Drei-Ebenen-Modelle nach Donges und Rasmussen eingeführt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden in Abschnitt 2.3 Potentiale zur Steigerung der Fahrzeugsicherheit genannt. Diese Potentiale werden in der aktiven Sicherheit und Fahrerassistenz (Abschnitt 2.3.1), der passiven Sicherheit (Abschnitt 2.4) und der Automatisierung sowie Vernetzung des Verkehrs (Abschnitt 2.5) beschrieben. Ziel dieses Kapitels ist es, aus dem Stand der Technik in Abschnitt 2.6 ein Defizit abzuleiten, welches Gegenstand der Arbeit ist und behoben werden soll.

2.1. Fahrdynamik motorisierter Zweiräder

Zum Verständnis der Maßnahmen zur Steigerung der Verkehrssicherheit wird die Fahrdynamik von Zweirädern behandelt. Zunächst werden Größen und Bezeichnungen in Abschnitt 2.1.1 am Zweirad eingeführt. In Abschnitt 2.1.2 werden kinematische Zusammenhänge sowie dynamische lineare Modelle untersucht, um Systemeigenschaften abzuleiten. Die Erkenntnisse über Stabilität und Fahrdynamik werden in Abschnitt 2.1.3 zusammengefasst sowie anwendungsorientierten Beschreibungen gegenüber gestellt. Die Aspekte der Kurvenbremsung (Abschnitt 2.1.4) sowie Instabilitäten (Abschnitt 2.1.5) werden separat erläutert. Diese Beschreibungen sollen einem besseren Verständnis der Fahrdynamik von Zweirädern, Potentialen zur Unfallvermeidung sowie dem Stand der Technik bei aktiver Sicherheit und Fahrerassistenz dienen. Zudem sind die Herleitungen in der Arbeit von weiterer Relevanz.

2.1.1. Koordinatensystem, Geometrie und Größen eines Zweirads

Grundlage für die Orientierung am Fahrzeug ist die DIN ISO 8855 [Nor13]. Die Geometrie sowie die Größen des Zweirads sind in Abbildung 2.1 angegeben. Das ortsfeste Weltkoordinatensystem wird mit $(x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)})$ angegeben. Das fahrzeugfeste Fahrzeugkoordinatensystem ist über $(x^{(b)}, y^{(b)}, z^{(b)})$ definiert. Es wird am Fahrzeug zwischen drei Achsen unterschieden:

- Längsachse, längs zum Fzg, x-Achse, $x^{(b)}$
- Querachse, quer zum Fzg, y-Achse, $y^{(b)}$
- Hochachse, hoch zum Fzg, z-Achse, $z^{(b)}$