

1. Einleitung

In den letzten Jahren haben sich die Kaufanreize für Fahrzeuge gewandelt. Waren bei Pkw vor einigen Jahrzehnten noch Leistungsdaten wie Hubraum oder die Anzahl der Pferdestärken relevante Größen, so rücken mittlerweile jedoch Kriterien wie Zuverlässigkeit oder Sicherheit immer stärker in den Fokus der Kunden. [2]

Auch bei Motorrädern wird das Thema *Motorradsicherheit* immer wichtiger. Seit 2017 ist ABS für alle neuzugelassenen Motorräder über 125 cm³ Hubraum Pflicht. Dadurch verspricht sich der Gesetzgeber, die Unfallzahlen zu senken. [49]

1.1. Motivation

Ein Vergleich der Unfallstatistiken von Einspurfahrzeugen und Personenkraftwagen verdeutlicht die Relevanz motorradspezifischer Sicherheitssysteme [56]. Abbildung 1.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Anzahl getöteter Pkw-Insassen im Vergleich zu Motorradaufsassen.

In der dargestellten Zeitspanne zwischen der Wiedervereinigung und 2018 war der Rückgang der getöteten Autofahrer und -mitfahrer mit über 77 % fast doppelt so hoch wie bei Motorradaufsassen mit 42 %. Bezogen auf die Gesamtanzahl der Verkehrstoten verdoppelte sich der Anteil der getöteten Motorradaufsassen beinahe von 9,6 % auf 18,9 % [47].

Die starke Reduktion der Anzahl getöteter Pkw-Insassen kann nicht zuletzt durch verbesserte Systeme der aktiven und passiven Sicherheit begründet werden.

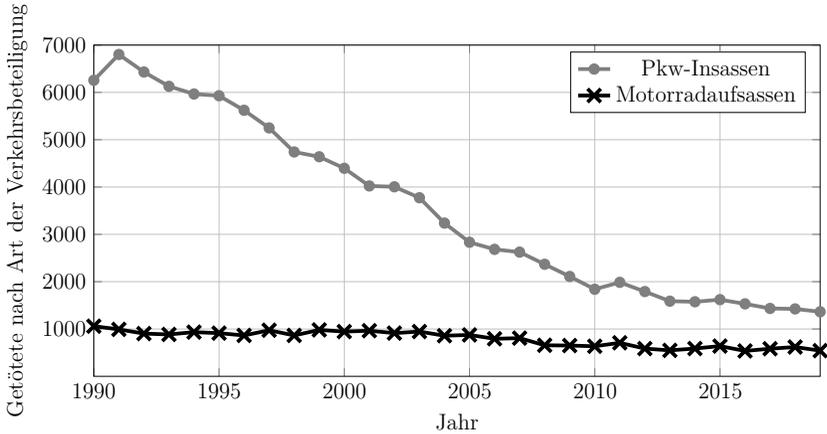


Abbildung 1.1.: Anzahl der getöteten Pkw-Insassen und Motorradfahrer seit der deutschen Wiedervereinigung. [47]

Das Ziel passiver Systeme ist die Folgenminderung bei einem schon geschehenen Unfall. Durch Weiterentwicklungen der Fahrgastzelle sowie Airbag- und Rückhaltesysteme wird beim Pkw ein Großteil der bei einem Unfall eingeleiteten Energie durch diese Bauelemente aufgenommen. Konzeptbedingt fällt das Potential dieser Systeme bei Einspurfahrzeugen gering aus. Die meisten Motorräder verfügen über keine Fahrgastzelle und somit auch keine Rückhaltesysteme. Eine Ausnahme stellt hier der BMW C1 dar, der dank dieser passiven Sicherheitssysteme sogar von der Helmpflicht befreit ist [7]. Airbag-Systeme, die ebenfalls zur Kategorie der passiven Sicherheit gehören, haben schon in die Motorradsicherheit Einzug gehalten. Sowohl fahrzeugfeste Airbags, wie in der Honda Goldwing, als auch Bekleidungsairbags, wie bei der BMW Street Air, können Motorradfahrer durch ihre Luftpolster schützen [39].

Im Gegensatz dazu ist das Ziel aktiver Assistenzsysteme, den Unfall möglichst zu vermeiden. Abbildung 1.3 veranschaulicht den Zeitpunkt der Markteinführung dieser Systeme beim Pkw im Vergleich zum Motorrad. Am Beispiel des Anti-Blockier-Systems (ABS) wird deutlich, mit welchem Zeitverzug solche Systeme in die Motorrad-Serienentwicklung Einzug halten. Erst zehn Jahre nach der Markteinführung im Pkw war der Blockierverhinderer beim Motorrad verfügbar. Bei anderen Systemen, wie der Traktionskontrolle (engl.: Dynamic Traction Control (DTC)) waren es schon über zwanzig Jahre.

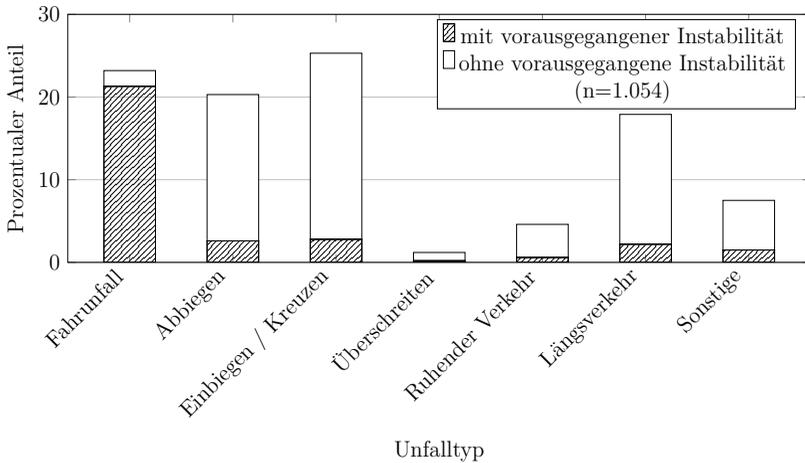


Abbildung 1.2.: Verteilung der Unfälle mit Motorradbeteiligung auf die verschiedenen Unfalltypen, aufgeschlüsselt nach vorausgegangener Instabilität [47].

Durch die Fortschritte der Halbleiterindustrie können nicht nur Steuergeräte, sondern auch Sensoren immer kleiner gefertigt werden, sodass diese mittlerweile auch im Bauraum eines Motorrads Platz finden. Der ultraschallbasierte Tote-Winkel-Assistent (engl.: Side-View-Assist (SVA)) und der radarbasierte Abstandsregeltempomat (engl.: adaptive cruise control) stellen mit ihrer Umfeldsensorik noch eine Besonderheit dar. Alle anderen Fahrerassistenzsysteme sind der Klasse der reaktiven Systeme zuzuordnen. Sie können nicht ohne eine Fahrereingabe agieren, sondern lediglich auf die Stellgrößen des Fahrers abschwächend reagieren, falls diese zu stark sind und im Falle des ABS zu einer Radblockade oder bei DTC zu einem Durchdrehen des Hinterrads führen würden.

Die Verteilung der Unfälle mit Motorradbeteiligung ist in Abbildung 1.2 über den verschiedenen Unfalltypen aufgetragen. Mehr als jeder fünfte Unfall ist ein reiner Fahrunfall, ohne einen anderen Unfallbeteiligten (21,3%). In diesen Fällen rührt der Kontrollverlust des Motorrads meist von „[...] nichtangepasster Geschwindigkeit oder falscher Einschätzung des Straßenverlaufs [oder] des Straßenzustandes [...]“ her [47]. Insbesondere zählen hierzu die Unfälle aufgrund von Selbstüberschätzung oder Schräglagenangst. Zur Adressierung dieser Unfalltypen darf ein Assistenzsystem nicht erst dann aktiv werden, wenn die Situation bereits kritisch ist. Vielmehr muss es den Fahrer davor

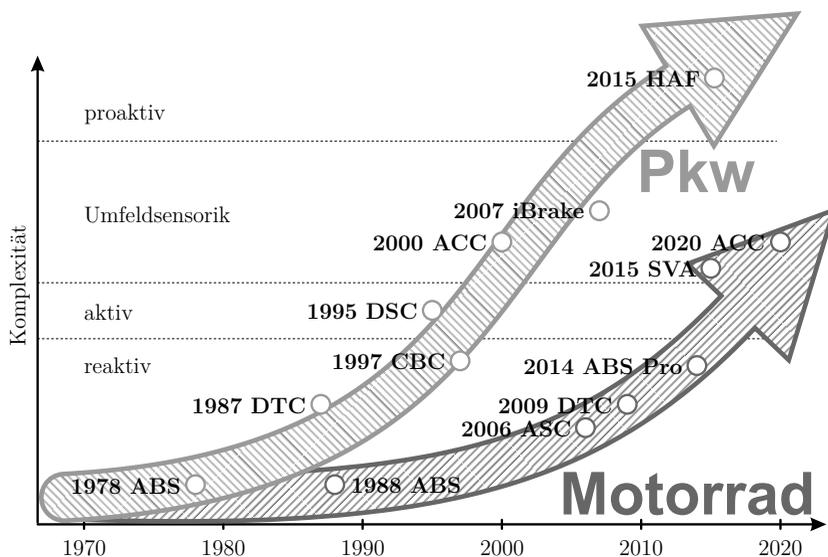


Abbildung 1.3.: Entwicklung der Fahrerassistenzsysteme bei Pkw und Motorrad [57]

bewahren, in die Kritische Situation zu gelangen.

Bisher nutzt kein in Serie befindliches Motorrad-Assistenzsystem Modellwissen über die komplette Fahrzeugdynamik, um diese zu überwachen, bei Bedarf zu warnen oder aktiv einzugreifen. Durch den geringeren passiven Schutz ist die Relevanz dieser aktiven Sicherheitssysteme beim Motorrad aber noch höher, weshalb die vorliegende Arbeit den Grundstein für solche Systeme in Form eines vereinfachten Fahrdynamikmodells sowie einer Methodik zu dessen Verwendung für vorausschauende Sicherheitssysteme legt.

1.2. Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Wissen über die Motorradfahrdynamik hinsichtlich der menschlichen Stellgrößen zur Beeinflussung der Längs- und Querdynamik aufzubauen und zu modellieren. Die hierfür betrachteten Stellgrößen umfassen positives und negatives Beschleunigen über Motormoment und Bremsdruck sowie Lenkbewegungen. Darauf basierend wird eine Methodik entwickelt, dieses Wissen in Form von Fahrerassistenzsystemen zur Erhöhung der Motorradsicherheit zu verwenden. Diese Zielsetzung

schließt die Verwendung von künstlich erzeugten Stellgrößen, beispielsweise durch die Verwendung von zusätzlichen Gyroskopen, aus, da diese bei konventionellen Motorrädern nicht zur Verfügung stehen.

Parallel zur theoretischen Betrachtung wird auch ein realer Versuchsträger aufgebaut, der dieselben menschlichen Stellgrößen technisch beeinflussen kann, um die Simulationsergebnisse anhand realer Messdaten validieren zu können. Als Nachweis, dass die zugrunde gelegten Differenzialgleichungen die Fahrdynamik ausreichend genau abbilden und auch die vorgestellte Methodik in der Lage ist, die komplette Fahrzeugführung zu übernehmen, soll dieses Fahrzeug abschließend fahrerlos fahren.

Die Struktur dieser Arbeit ist in Abbildung 1.4 grafisch dargestellt, um den roten Faden zu verdeutlichen und die Kapitel den Untersuchungsschwerpunkten (Fahrdynamik bzw. Fahraufgabe) und der Art der Betrachtung (virtuell bzw. real) zuzuordnen.

Zu Beginn werden in Kapitel 2 die Grundlagen für die weitere Arbeit gelegt und speziell auf die verwendeten mathematischen und regelungstechnischen Konzepte eingegangen.

In Kapitel 3 wird ein mathematisches Modell der Motorradfahrdynamik hergeleitet, welches im darauffolgenden Kapitel 4 für die Reglerauslegung verwendet wird. Wie die menschliche Fahraufgabe, wird auch die Regelungsaufgabe hierarchisch gegliedert und ein kaskadierter Regelungsansatz vorgestellt. Dazu wird in Abschnitt 4.2 der unterlagerte Regler für die Rollwinkel- und Geschwindigkeitsregelung mit den Methoden der Ein-/Ausgangslinearisierung in Kombination mit einem Sliding-Mode Regler und einem PI-Regler entworfen.

Die Trajektorienfolgeaufgabe wird in Abschnitt 4.3 durch zwei verschiedene Ansätze realisiert. Einerseits wird ein Lyapunov-Tracking-Regler implementiert, welcher als einziges Ziel das Abfahren der Referenz hat. Andererseits wird in Unterabschnitt 4.3.2 die Modellprädiktive Regelung angewendet, in der ein menschlicheres Fahrverhalten erzeugt werden kann, indem zusätzlich zum lateralen Abstand zur Referenz noch andere Zustände in das Optimierungsproblem eingehen.

Ab Kapitel 5 rückt der Fokus von der Simulation und reinen Theorie, hin zur realen Anwendung und Umsetzung auf dem Versuchsträger mit den für die Umsetzung der Fahraufgabe notwendigen Komponenten. Abschnitte 5.2 und 5.3 beschreiben die Ausstattung des Versuchsträgers mit Sensorik und Aktorik, wobei speziell seitens der Aktorik detaillierter auf die automatisierte Kupplung, Schaltung und den Lenkmotor eingegangen wird.

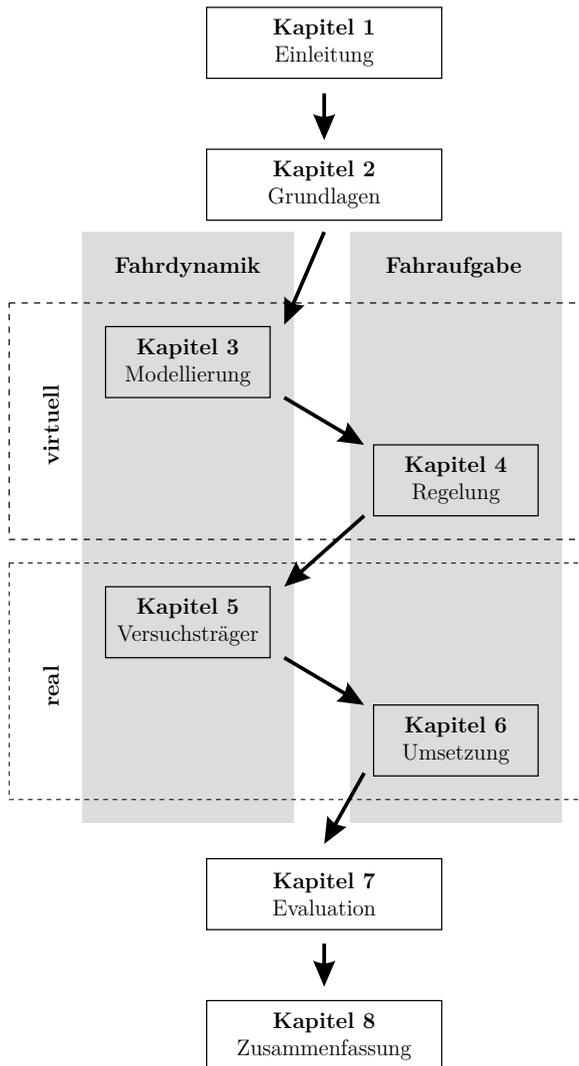


Abbildung 1.4.: Grafische Darstellung des Aufbaus der Arbeit

Die für die Implementierung verwendete Software wird zu Beginn des Kapitels 6 erläutert und daraufhin der Algorithmus und die Fahrstrategie vorgestellt. Im Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Regelung dann in Simulationen und Realversuchen evaluiert.

Zusammenfassend schließt Kapitel 8 die Arbeit und deren Ergebnisse ab und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen.

1.3. Historie der Fahrdynamikmodellierung von Einspurfahrzeugen

Die Stabilisierung instabiler Systeme ist ein wichtiger Anwendungsfall der Regelungstechnik. Besonders anschauliche, mechanische Systeme, wie beispielsweise das invertierte Pendel, werden in der Literatur oft gewählt, um verschiedene Regelungsansätze miteinander zu vergleichen. [9]

Auch instabile Fortbewegungsmittel auf zwei Rädern sind gerne gewählte Anschauungsobjekte. Sowohl parallel montierte Räder wie bei Segways und Hoverboards, bei denen das Gefährt nach vorne und hinten kippen kann [12, 25, 50], als auch hintereinander montierte Räder, wie bei Fahrrädern, sind oft Gegenstand der Untersuchungen [4, 18, 19]. Diese Arbeit betrachtet ausschließlich letztere, wobei der Fokus auf der Bewegung im Raum liegt.

Bereits in der Beschreibung seiner 1817 erfundenen Laufmaschine geht Karl Friedrich Christian Ludwig Freiherr von Drais auf die Stabilisierung derselben mittels Gewichtsverlagerung ein. [17]

„[Man] suche sich dadurch mit der Maschine im Gleichgewicht zu erhalten, indem man immer da sanft hinunterdrückt, wo das Brettchen anfangen will, in die Höhe zu steigen [...]“

Da das erwähnte Balancierbrettchen, welches ebenfalls als Armauflage dient, jedoch fest mit dem Rahmen verbunden ist (siehe Abbildung 1.5), wäre eine reine Krafteinleitung des Fahrers ohne Bodenkontakt folgenlos. Daher beschreibt das Hinunterdrücken wahrscheinlich eine Schwerpunktsverlagerung in diese Richtung.

Drei Jahre später beschreibt Drais in [20] das Stabilisieren über Lenkimpulse und das initiale Gegenlenken beim Einleiten einer Kurvenfahrt.

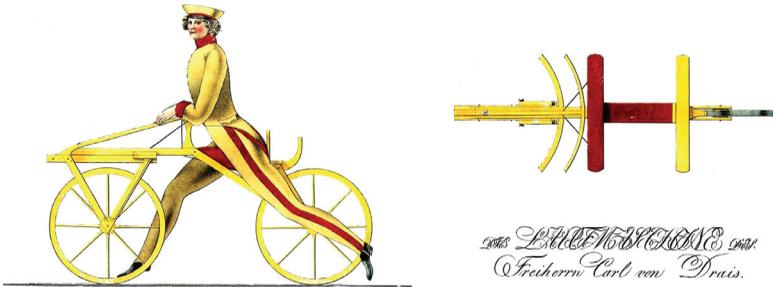


Abbildung 1.5.: Die Laufmaschine des Freiherrn Karl von Drais [17]

„[Wenn] man [...] aus Versehen die Balance etwas verloren hat, kann man sich gewöhnlich mit den Füßen helfen, oder durch das Leiten, wenn man ein Bisschen gegen die Richtung leitet, auf welche der Schwerpunkt den Ganzen sich neigte, und wenn man eine Schwenkung machen will, richte man unmittelbar vorher den Schwerpunkt etwas auf die innere Seite und lenke gleich darauf hin. [...]“

All diese Beobachtungen sind jedoch rein verbal und ohne mathematische Gleichungen belegt.

Erst 1899 stellen Whipple und Carvallo unabhängig voneinander die Bewegungsgleichungen für ein Fahrrad auf [11, 52] und untersuchen dessen Stabilität. Laut [27] sind 1953 in der Dissertation von Döhring [14] erstmalig auch Motorräder Ziel der Untersuchung. Einflüsse von Reifen und Fahrwerk werden dort jedoch noch vernachlässigt und erst 1971 von Sharp berücksichtigt [45].

Nicht nur die Modellierung der Fahrzeugdynamik, sondern auch deren Beeinflussung durch das menschliche Fahrverhalten, ist von wissenschaftlichem Interesse. Durch das im Vergleich zum Fahrrad hohe Gewicht des Motorrads fällt der Anteil der Fahrer Masse relativ gesehen geringer aus, weshalb es oftmals vernachlässigt oder zur Fahrzeugmasse addiert wird [52]. Soll der Einfluss der Gewichtsverlagerung auf die Fahrdynamik untersucht werden, so wird der Fahrer meist als zwei Massepunkte betrachtet, von denen der erste dem Unterkörper entspricht und als starr mit dem Motorrad verbunden angenommen wird. Der Oberkörper kann vereinfacht als Massepunkt auf einem inversen Pendel modelliert werden, welches sich aus der Symmetrieebene des Fahrzeugs hinauslehnen kann [4, 43]. Andere Ansätze gehen sogar so weit, den biomechanischen

Bewegungsapparat des Menschen inklusive Skelett und Muskeln nachzubilden [22].

Zur Modellierung des Menschen ist nicht nur dessen physische Position, sondern auch dessen Verhalten, wichtig [59]. Angefangen bei der Perzeption [29] visueller Reize und deren Informationsaufnahme, über die hierarchischen Ebenen der Informationsverarbeitung [16, 38] bis hin zur Modellierung kognitiver Prozesse [32, 37] sind bereits wichtige Erkenntnisse erarbeitet, welche ebenfalls die Absprungbasis für diese Arbeit darstellen. Darin wird bereits untersucht, wie der Mensch als Regler eines technischen Systems beschrieben werden kann.

Insbesondere für die Modellierung des menschlichen Fahrverhaltens durch modellprädiktive Regelung kann auf den Ergebnissen aus dem Pkw-Bereich aufgebaut werden [35, 36, 51]. In [5] wird diese Methodik bereits auf ein Kurvenwarnsystem für Einspurfahrzeuge angewendet, welches die Motorradfahrdynamik jedoch auf die eines rollenden Rades reduziert und damit ein nichtlineares Modell in die Zukunft prädiziert. Zusätzlich muss für die dort gewählte Problemformulierung in Form eines Randwertproblems nicht nur der Anfangszustand, sondern auch der Endzustand der Optimierung bekannt sein.

