

# 1 Prolog

## 1.1 Motivation

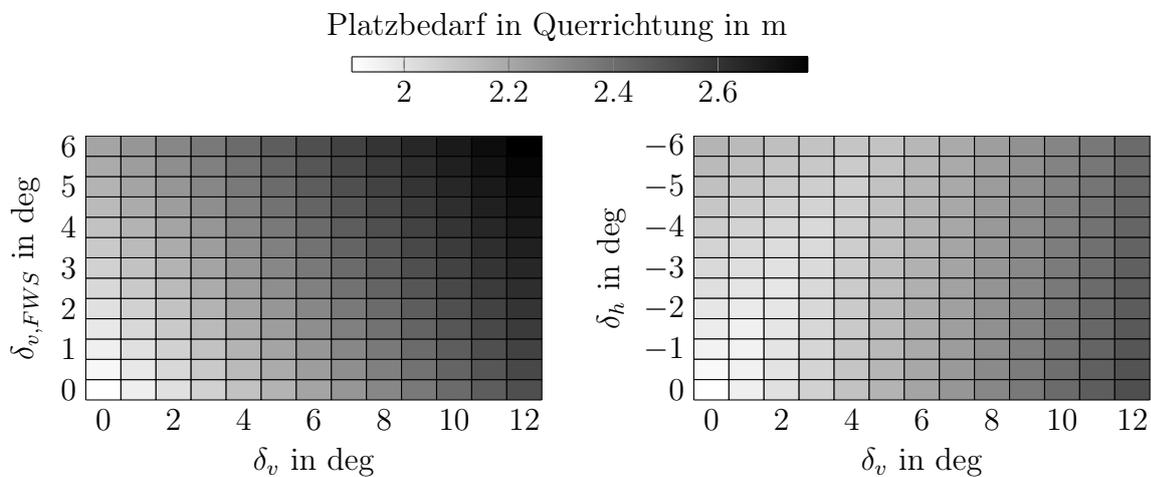
Die Mobilität befindet sich derzeit im Zuge der vierten industriellen Revolution in einem einschneidenden Transformationsprozess, aus dem völlig neuartige Konzepte in Wechselwirkung mit Mensch und Infrastruktur hervorgehen werden [19]. Visionen, wie das unfallfreie Fahren [55, 151], bringen neue Herausforderungen für aktive Fahrwerkregelsysteme, die in der Vergangenheit bereits Fahrsicherheit, -komfort und -dynamik verbessert sowie Konflikte in diesem Spannungsfeld entschärft haben [74, 93, 158].

Die Weiterentwicklung von Lenksystemen folgt diesem Trend. Mittlerweile löst die elektromechanische Lenkung die elektrohydraulische an der Vorderachse immer mehr ab, um den steigenden funktionalen Anforderungen im Systemverbund der Fahrwerks- und Fahrerassistenzsysteme gerecht zu werden. Das Entwicklungszeit-, Qualitäts- und Kostenmanagement wird mit Zunahme der Komplexität deutlich anspruchsvoller. Im Jahr 2002 wurden erstmals Überlagerungslenkungen zur Ausweitung des fahrdynamischen Gestaltungsspielraums in Großserie eingeführt, siehe KOEHN, ECKRICH [110]. Auch die vor über zwei Jahrzehnten erstmalig eingesetzten Zusatzlenkungen an der Hinterachse werden seit 2008 vermehrt in elektromechanischer Bauweise in Serienfahrzeugen zur Gestaltung des Führungsverhaltens im gesamten Geschwindigkeitsbereich genutzt [26, 124, 158, 174, 225]. Der Automobilhersteller *Nissan* hat im Jahr 2013 mit dem *Infiniti Q50* das weltweit erste Serienfahrzeug mit einem *steer-by-wire*-System vorgestellt [141], das neue Freiheitsgrade bis in das Gesamtfahrzeugkonzept eröffnet.

Mit größeren Fahrzeugabmessungen und zunehmender Verstädterung rücken urbane Mehrwertfunktionen in den Fokus der Entwicklung [174]. Bis zum Jahr 2050 wird sich nach [19] der urbane Verkehr verdreifacht haben. Die globale Investitionssumme wird sich auf etwa 800 Mrd. Euro verdoppeln. Antworten auf die begrenzte Verkehrsfläche bei Parkier- und Manövriervorgängen im Niedriggeschwindigkeitsbereich liefert das Forschungsfahrzeug *SpeedE*, siehe HESSE et al. [77]. Bei diesem wird eine *steer-by-wire*-Lenkung mit zwei radindividuellen Lenkaktuatoren, die Einschlagwinkel von bis zu  $90^\circ$  ermöglichen, untersucht. Bereits 1989 stellte nach RICHTER [171] das Unternehmen *Volkswagen* mit dem Forschungsfahrzeug *IRVW-Futura* ein zusätzlich hinterachsgelenktes Fahrzeug mit Lenkwinkeln von bis zu etwa  $40^\circ$  vor. Mittels einer automatischen Einparkfunktion kann dieses Parklücken nutzen, welche lediglich 0.5 m länger als das Fahrzeug sind. Jedoch standen einer Serienrealisierung fehlende Sicherheitskonzepte und damit verbundene erhebliche Entwicklungskosten entgegen. In der Konzeptstudie *Audi Nanuk* aus dem Jahr 2013 wird der Fokus auf kinematische Funktionalitäten aufgegriffen – es werden Hinterachslenkwinkel bis zu  $9^\circ$  vorgeschlagen [20].

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ebenfalls mit der Verbesserung des Fahrzeugverhaltens im urbanen Verkehrsraum durch eine zusätzliche, aktive Hinterachslenkung. Mit diesen Eingriffen kann gegenüber Zusatzlenkeingriffen an der Vorderachse der Platzbedarf in Querrichtung bei gleich befahrener Trajektorie verringert werden. In Abbildung 1.1

ist dieser Zusammenhang, auch unter individueller Änderung der Trajektorien mit der Variation der Lenkeinschläge, für den kinematischen Fall erkennbar. Die Vorteile von Parkier- und Manövriervorgängen im kinematischen Niedrigkeitsgeschwindigkeitsbereich werden im Weiteren nicht detailliert betrachtet, sie wurden bereits in RICHTER [171] und ZIMMER [241] untersucht. Vielmehr steht die dynamische Ansteuerung im Vordergrund, die eine Weiterentwicklung etablierter Regelkonzepte erfordert. Das globale Ziel ist die Erleichterung der Fahraufgabe durch – im Vergleich zu dominierenden Serienlösungen – große Hinterachslenkwinkel. Damit geht nach RUSS et al. [174] eine Erhöhung der Ergonomie einher. Typische Anwendungsfälle sind beispielsweise Stadtspurwechsel, Abbiegesituationen, Serpentina sowie Kreisverkehrsdurchfahrten. Zusätzlich soll der Fahrspaß gesteigert und der vor allem im Premiumsegment bestehende Wunsch nach Individualisierung erfüllt werden. Zur Beurteilung des Kundennutzens ist eine geeignete Methodik zu erarbeiten.



**Abbildung 1.1:** Kinematische Platzbedarfsänderung in Querrichtung durch Zusatzlenkeingriffe an Vorder- oder Hinterachse [Vorderachslenkwinkel  $\delta_v$ , Vorderachszusatzlenkwinkel  $\delta_{v, FWS}$ , Hinterachszusatzlenkwinkel  $\delta_h$ ]

## 1.2 Stand der Forschung und der Technik

Die Auslegung passiver Fahrwerke durch Kinematik und Elastokinematik ist sehr weit ausgereift und im Wesentlichen kostenfokussiert [3, 171]. Mit aktiven Komponenten, beispielsweise zum Stellen eines Zusatzlenkwinkels an Vorder- und Hinterachse, können nach LAUMANN [118] und OBERMÜLLER [144] Zielkonflikte des Fahrzeugverhaltens entschärft und der Gestaltungsraum ausgeweitet werden.

Nachfolgend wird der Entwicklungsstand aktiver Lenkungen vorgestellt. Im Anschluss werden die Anwendung der Trajektorienoptimierung zum Entwurf optimaler Steuerungen sowie technisch realisierbare Steuerungs- und Regelungskonzepte diskutiert. Dabei werden von den umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten die wesentlichen Konzepte mit Fokus auf die aktive Hinterachslenkung besprochen. Abschließend werden Methoden und Werkzeuge zur Bewertung des objektiven Fahrverhaltens und der subjektiven Fahreindrücke vorgestellt. Diese Diskussion wird bezüglich Normalfahrerbewertungen im Kontext der Fahrwerksentwicklung vertieft.



## 1.2.1 Entwicklungsstand aktiver Lenkungen

In der vorliegenden Arbeit werden an der Vorderachse *Zahnstangenlenkungen* betrachtet, bei denen die Drehung des Lenkrads zu einer Verschiebung der Zahnstange und damit zur Lenkbewegung der Räder führt, vergleiche Abb. 2.4. Wird diese manuell ausgeführt, resultiert die Zahnstangenverschiebung aus dem vom Fahrer eingeleiteten Winkel und dem zugehörigen Moment [158].

Bei Servolenkungen erfolgt eine Unterstützung der Lenkaktivitäten durch eine in Abhängigkeit vom anstehenden Lenkradmoment an der Zahnstange eingeleitete Hilfskraft. Dabei bieten nach PFEFFER, HARRER [158] elektromechanische Systeme den vergleichsweise größten Gestaltungsspielraum im Bezug auf Komfort- und Sicherheitsfunktionen.

Neben der Unterstützung durch ein Zusatzmoment gibt es Systeme zum Stellen von Zusatzlenkwinkeln, deren Funktionalitäten im Fokus dieser Arbeit stehen. Bei jenen aktiven Lenksystemen können *fahrerunabhängige* Winkelveränderungen an der Vorder- und/oder Hinterachse realisiert werden. Damit ergeben sich nach PFEFFER, HARRER [158] und ULLMANN [199] Freiheiten zur funktionalen Ausgestaltung und Vernetzung, gleichzeitig steigen jedoch die Sicherheitsanforderungen an das System.

Der Vollständigkeit halber seien noch *steer-by-wire*-Systeme erwähnt, bei denen die mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und gelenkten Rädern entfällt. Da keine unmittelbare Übertragung der Reifenrückstellmomente erfolgt, muss der Fahrzustand über ein aktives Bedienelement rückgemeldet werden [34, 158]. Der funktionale Gestaltungsspielraum im Hinblick auf Führungs- und Störverhalten ist bei diesen Systemen nach SUISSA, BÖTTIGER [193] enorm, jedoch müssen hohe Sicherheitsanforderungen erfüllt werden [34, 141].

### Aktive Überlagerungslenkung

Bei Überlagerungslenkungen wird der vom Fahrer gestellte Lenkwinkel verändert. Die damit einhergehende variable Lenkübersetzung erweitert den fahrdynamischen Applikationsbereich und löst den Zielkonflikt zwischen Agilität bei kleinen Geschwindigkeiten und Stabilität bei hohen Geschwindigkeiten weitgehend auf [158].

Bereits 1972 wurde die Überlagerungslenkung von Ford patentiert [159]. Erst im Jahr 2000 erfolgte die Darstellung einer variablen, geschwindigkeitsabhängigen Lenkübersetzung durch *Honda* [1]. Die ersten Überlagerungslenkungen im eigentlichen Sinn sind seit 2002 im Großserieneinsatz angekommen, zu Beginn in Fahrzeugen der Marken *Lexus* und *BMW* [158].

Die technische Realisierung kann durch eine additive Verschiebung des Lenkgetriebes oder eine relative Verschiebung zwischen Zahn- und Spurstange erfolgen [158]. Durchgesetzt hat sich die Integration eines Winkelüberlagerungsgetriebes, dessen Merkmal eine ungleiche Übersetzung zwischen Eingangs- und Ausgangswelle ist. Dadurch entsteht bereits rein mechanisch ein Differenzwinkel, der zusätzlich durch einen Elektromotor beeinflusst wird. Eine direkte Auslegung trägt durch Abnahme der zu stellenden Zusatzlenkwinkel zur akustischen Verbesserung im niedrigen Geschwindigkeitsbereich bei, da die Geräuschemissionen nach [158] proportional zur Überlagerungsaktivität sind. Jedoch muss die Beherrschbarkeit des Fahrzeugs im Fehlerfall stets gewährleistet sein, siehe NEUKUM, KRÜGER [138] und ULLMANN [200]. Zusätzlich ergeben sich durch hohe Lenkdynamiken bei Stabilisierungsvorgängen weitere Anforderungen aus Sicht der funktionalen Sicherheit. Dies betrifft geringere Fehlertoleranzzeiten, jene Zeit vom Erkennen des Fehlers bis zum Abstellen des gleichen, sowie zum Teil eine redundante Auslegung der fahrdynamisch relevanten Sensorik.

Mit einer aktiven Überlagerungslenkung können vielfältige Funktionen verwirklicht werden. Die Reduktion des Lenkaufwands durch eine direkte Lenkübersetzung erleichtert *Parkier- und Manövriervorgänge*. Durch eine variable, von Fahrzustandsgrößen abhängige Lenkübersetzung können *Agilisierungs- und Stabilisierungseingriffe* vorgenommen werden. Der Zielkonflikt zwischen Handlichkeit (direkte Übersetzung) und Stabilität (indirekte Lenkung) wird komplett aufgelöst. Bei mittleren Geschwindigkeiten kann die Gierverstärkung angehoben und bei hohen entsprechend abgesenkt werden. Zudem ist laut PFEFFER, HARRER [158] ein Ziel, dass bei hohen Geschwindigkeiten eine kleine und konstante Querbeschleunigungsverstärkung herbeigeführt wird. Im Zusammenspiel mit einer Fahrdynamikregelung ist die Optimierung von *Stabilisierungseingriffen* möglich. Vor allem bei Geschwindigkeiten größer 100 km/h führen die im Vergleich zu Bremsingriffen schnelleren Lenkeingriffe zur Erhöhung der Gesamtstabilität [74, 158]. Das *Störverhalten* ( $\mu$ -split-Situation, Seitenwind) kann durch korrigierende Lenkeingriffe verbessert werden. Für die Realisierung von *Fahrerassistenzsystemen*, beispielsweise Spurhalte- und Ausweichassistent, ist aktorseitig der Einsatz einer Überlagerungslenkung möglich. Durch die Vernetzung mit einer Lenkmomentenstelleinheit können *Steer-by-wire-Teilfunktionalitäten* umgesetzt werden, wodurch sich beispielsweise Einparkhilfen ohne Lenkradbetätigung umsetzen lassen.

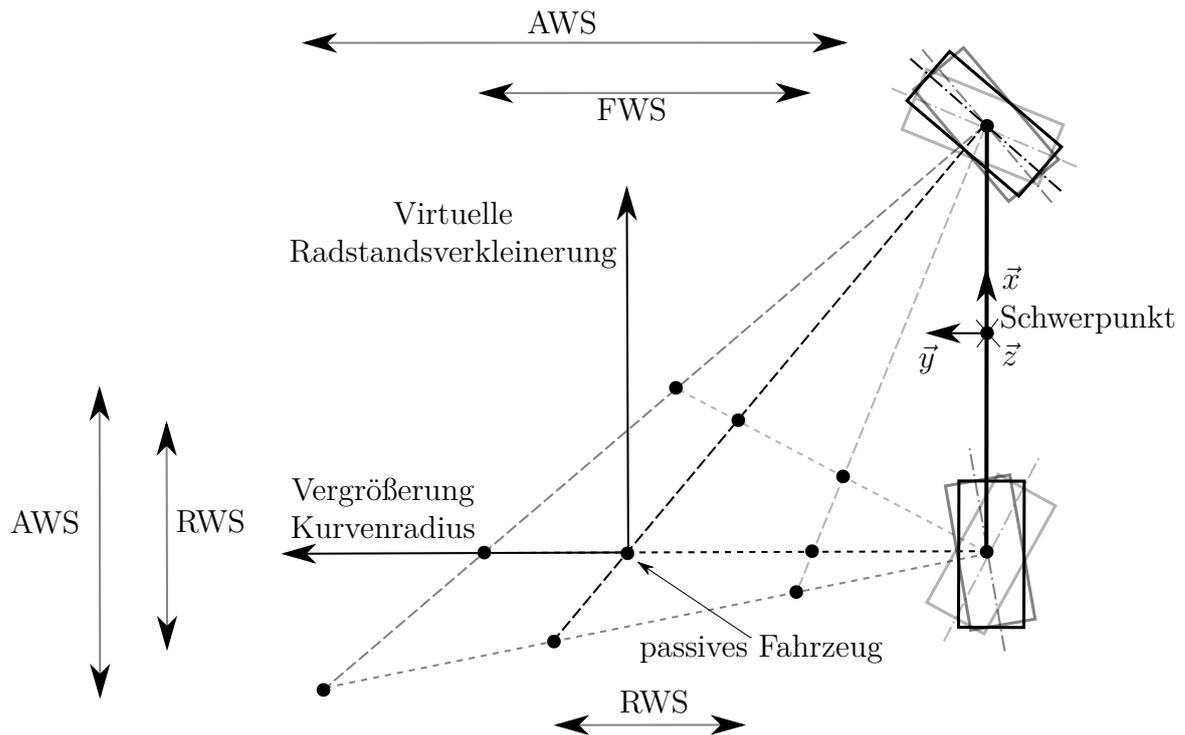
### Aktive Hinterachslenkung

Im Folgenden werden aktive Hinterachslenkungen nur in Ergänzung zu einer vom Fahrer und optional aktiv gelenkten Vorderachse betrachtet. Eine reine Hinterachslenkung ist nach [57, 158] in Personenkraftwagen aufgrund von Stabilitätsproblemen, fehlendem Rückstellmoment (Gesetzesanforderung) und Bordsteinberührungen beim Verlassen einer Parklücke nicht geeignet. Hinterachszusatzlenkungen werden im Allgemeinen bei kleinen Geschwindigkeiten gegensinnig zu den Vorderrädern eingeschlagen, um den Wendekreis zu reduzieren und die Agilität zu steigern. Ein gleichsinniger Einschlag bei höheren Geschwindigkeiten stabilisiert das Fahrzeug durch Abschwächung der Gierbewegung und Verkleinerung der Phase zwischen Gier- und Querbeschleunigungsbewegung [8, 27, 158].

Bereits 1936 wurde im Kübelwagen *Typ 107 VL* von *Mercedes-Benz* eine mechanische Hinterradlenkung verbaut. In Serienfahrzeugen wurden Hinterachslenkungen seit den 1980er Jahren verbaut und bis in die 1990er Jahre stetig weiterentwickelt, siehe [136, 158, 175, 176, 227]. Einen guten Überblick geben LAUMANN [118] und WALLEN-TOWITZ [226]. Dann verschwanden die Systeme jedoch aufgrund von Mehrkosten und funktionalen Defiziten. Zudem trugen die aufkommenden Fahrdynamikregelungen zu dieser Situation bei, da durch radindividuelle Bremsingriffe, kurz ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm), ein wirksamer Stabilisierungseingriff möglich geworden war [53, 130, 157, 236]. Nach zwei Jahrzehnten geringer Aktivität seitens der Fahrzeughersteller, wurde die aktive Hinterachslenkung in elektomechanischer Bauweise kombiniert mit komplexen Regelstrategien erneut aufgegriffen. Neben *Zentralaktuatoren* werden nach LUNKEIT, WICHERT [124] beispielsweise bei begrenztem Bauraum *Dualaktuatoren* eingesetzt.

Die für die aktive Vorderachslenkung genannten Funktionalitäten sind prinzipiell auch mit einer Hinterachslenkung realisierbar. Gesamtheitlich betrachtet ist die Performance einer Hinterachszusatzlenkung laut WASCHL et al. [229] größer. Mit einer Überlagerungslenkung kann die Quergeschwindigkeit systembedingt nur begrenzt verändert werden. Für den kinematischen Fall wird in Abb. 1.2 eine aktive Überlagerungslenkung an der Vorderachse (FWS, engl. *front-wheel steering*) mit einer aktiven Hinterachszusatzlenkung (RWS,

engl. *rear-wheel steering*) und einer Kombination beider Systeme (AWS, engl. *all-wheel steering*) anhand der Lage der zugehörigen Momentanpole (MP) verglichen<sup>1</sup>. Das passive Fahrzeug besitzt einen festen Momentanpol auf Höhe der Hinterachse. Mit FWS-Eingriffen kann dieser auf Höhe der Hinterachse relativ zum Fahrzeug verschoben werden, sodass sich der Kurvenradius verändern lässt. Mit einer Hinterachslenkung ist darüber hinaus auch eine Verschiebung in Fahrzeuginnenrichtung möglich. Dies führt zu einer virtuellen Radstandsänderung. Das aktive Fahrzeug nimmt damit ein Fahrverhalten eines Fahrzeugs mit anderem Radstand an. Bei RWS-Eingriffen ändern sich die Lage des Momentanpols stets in zwei Raumdimensionen.



**Abbildung 1.2:** Wirkung aktiver Lenkeingriffe auf den kinematischen Momentanpol [Einspurmodell mit fahrzeugfestem Koordinatensystem]

Eine aktive Hinterachslenkung kann die Gier- oder Quergeschwindigkeit stationär und dynamisch ändern. Mit gegensinnigen Lenkeingriffen kann die Gierverstärkung im fahrerrelevanten Frequenzbereich erhöht werden – hingegen wird durch gleichsinnige Lenkeingriffe bei hohen Längsgeschwindigkeiten der Schwimmwinkel reduziert und folglich das Fahrzeug stabilisiert. Bei vollständiger Kompensation des Schwimmwinkels, siehe AHRING [8] und HIGUCHI, SAITOH [79], besteht jedoch nach PFEFFER, HARRER [158] die Gefahr einer Überkompensation und einer zu starken Untersteuertendenz des Fahrzeug. Durch RWS-Eingriffe in Richtung des Einschlags der Vorderräder erfolgt der Seitenkraftaufbau an Vorder- und Hinterachse gleichmäßig. Dies führt zu einer langsameren Zunahme der Gierrate und einem schnelleren Querschleunigungsaufbau. Bezogen auf die Lenkeingaben sind die Fahrzustandsgrößen Giergeschwindigkeit und Querschleunigung phasentreuer, siehe WALLBRECHER et al. [225].

<sup>1</sup>Die Aussagen gelten qualitativ auch für den allgemeinen, dynamischen Fall.



Prozessbetriebs kann der Wirkungsgrad für ein dynamisches System unter gegebenen Randbedingungen abgeschätzt werden, sodass diese optimierungsbasierten Verfahren nach RAU [167] eine Entscheidungsgrundlage für die Variantenreduktion bieten. Eine Methode in der *offline*-Entwurfsphase ist die *Trajektorienoptimierung*, siehe WASCHL et al. [229]. Dabei wird der zeitabhängige Stelleingriff, unter welchem ein dynamisches System festgelegte Randbedingungen erfüllt und ein definiertes Kostenfunktional einen minimalen Wert annimmt, ermittelt. Die Lösung erfolgt im Allgemeinen unter Nutzung numerischer Verfahren, die in direkte und indirekte unterteilt werden [63, 154].

Bei *indirekten* Methoden werden die Hamilton-Gleichungen minimiert, wobei das in PONTYAGIN et al. [160] eingeführte Prinzip angewandt wird. Dabei muss ein Randwertproblem gelöst werden, siehe beispielsweise [7, 65, 140]. Nachteil hierbei ist, dass die Aktorikbelastung in Form der Stellwinkelgeschwindigkeit nicht unmittelbar einbezogen werden kann. Im Gegensatz dazu werden bei Anwendung der *direkten* Methode Systemzustand und Stelleingriff diskretisiert, sodass ein endlich-dimensionales nichtlineares Programm (NLP, engl. *nonlinear programming problem*) entsteht. Dieses wird anschließend mit numerischen Verfahren gelöst. Eine verbreitete Lösungsmethode ist die sequentielle quadratische Programmierung (SQP, engl. *sequential quadratic programming*), siehe beispielsweise PROKOP [161].

Nachfolgend werden verschiedene fahrdynamische Anwendungsbeispiele genannt, die richtungweisend für die vorliegende Arbeit sind. In RAU [167] und RAU, RAUH [168] wird das Trajektorienoptimierungswerkzeug GESOP (engl. *Graphical Environment for Simulation and Optimization*) zur Optimierung einer aktiven Feder- und Sturzmanipulation genutzt. Die Trajektorienoptimierung wird auch für Lenksysteme angewandt, siehe [81, 100, 180, 184]. Mit der direkten Methode wird in SOUDBAKSHI et al. [184] der Vorderachslenkwinkel angepasst, um eine Pfadfolgeregelung unter möglichst minimaler Querbeschleunigung zu gewährleisten. Als Fahrzeugmodell wird ein lineares Einspurmodell mit Aktordynamik, jedoch ohne Aktorlimitierungen, verwendet.

In WASCHL et al. [229] werden verschiedenen Aktorkonfigurationen (aktive Lenkung, aktive Differentiale, *Torque Vectoring* - Drehmomentenverteilung) für ein Modell mit zehn Freiheitsgraden hinsichtlich ihres fahrdynamischen Gestaltungsspielraums untersucht. Zum Finden einer optimalen Lösung wird ein gradientenbasierter Algorithmus mit Backpropagation (engl. *back propagation through time (BPTT) conjugate optimization algorithm*) angewandt, siehe [96–99, 232]. Für die fahrdynamische Bewertung werden ausschließlich die zeitbereichsbezogenen Kriterien quadratisches Mittel (RMS, engl. *root mean square*), Schwimmwinkelverstärkung sowie das Verhältnis zwischen gefahrener Strecke und Manöverzeit genutzt. Aufgrund ungenauer Lösungen bei Multiaktorkonfigurationen wird in WASCHL et al. [229] die TOMLAB-Plattform (Optimierungsumgebung in MATLAB) hinzugezogen. Die Lösungen unter Anwendung des Algorithmus SNOPT (engl. *sparse nonlinear optimizer*), siehe GATH [63], zeigen für Hinterachslenkeingriffe die größte Performance auf.

## Steuerungen

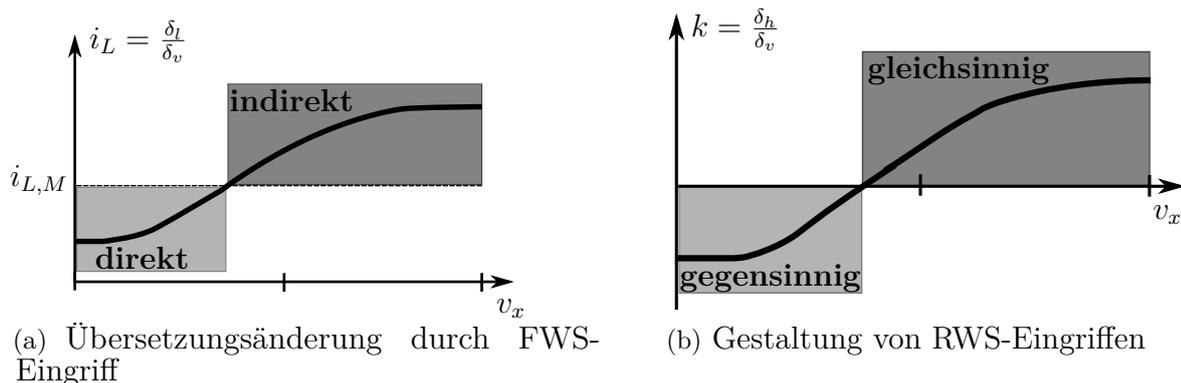
Zur Vorgabe der Stellwinkel der aktiven Hinterachslenkung sind reine Steueransätze bekannt:

- Proportionalsteuerung,
- Schwimmwinkelkompensation,
- Steuerung mit separatem Referenzmodell,
- Adaptive Steuerung.

Dabei dominiert die sogenannte *Proportionalsteuerung* [8, 76, 171]. Bei dieser wird der Hinterachslenkwinkel  $\delta_h$  in Abhängigkeit des um einen Faktor  $k$  verstärkten Vorderachslenkwinkels  $\delta_v$  vorgegeben:

$$\delta_h = k \cdot \delta_v. \quad (1.1)$$

Wie Abbildung 1.4 zeigt, wird der im Allgemeinen geschwindigkeitsabhängige Faktor  $k$  zur Herbeiführung eines gegensinnigen, agilisierenden Lenkeinschlags im kleinen Geschwindigkeitsbereich bis zu einer definierten Geschwindigkeit (beispielsweise  $v_x = 50$  km/h) negativ gewählt und wechselt für größere Geschwindigkeiten sein Vorzeichen. Mit weiter zunehmender Geschwindigkeit steigt  $k$  und damit der durch gleichsinniges Lenken herbeigeführte Stabilisierungseingriff an. Für Stabilisierungseingriffe sind im Vergleich zu Eingriffen zur Erhöhung der Manövrierbarkeit nach HEISSING, ERSOY [74] nur kleine Lenkwinkel erforderlich. Die Abbildung 1.4 zeigt die grundsätzliche Auslegung für eine Hinterachszusatzlenkung. In ähnlicher Weise kann die Manipulation der Lenkübersetzung mit einer Überlagerung lenkung erfolgen. Bei kleinen Geschwindigkeiten wird der Lenkradwinkelbedarf im Vergleich zum passiven Fahrzeug verringert, bei größeren steigt er an. Damit wird eine reine dynamische Gierverstärkungsänderung erreicht. Mit einer Hinterachslenkung kann zusätzlich das Schwimmwinkelverhalten beeinflusst werden.



**Abbildung 1.4:** Wirkung aktiver Zusatzlenkungen bezogen auf ein passives Fahrzeug mit fester Lenkübersetzung an der Vorderachse

Neben der geschwindigkeitsabhängigen Wahl wird in ASANUMA et al. [18] die Variation des Proportionalfaktors über der Querbewegung vorgeschlagen. In RICHTER [171] wird ein kurzzeitig gegensinniges Lenken bei hohen Längsgeschwindigkeiten zu einer dynamischen Gestaltung des Gierübertragungsverhaltens empfohlen. In STÄHLIN et al. [187] erfolgt die Wahl des Lenkeinschlags manöverabhängig. Der einfache Steueransatz nach Gl. (1.1)

kann durch dynamische Elemente erweitert werden [8, 28, 171]. Mit einem Vorhaltglied erster Ordnung wird eine Steigerung von Anlenk- und Ansprechverhalten möglich. Neben Fahrzeugträgheiten können nach dem Ansatz von MORGANDO, VELARDOCCHIA [132] die inverse Aktordynamik und das Reifeneinlaufverhalten berücksichtigt werden.

Vor allem in der ersten großen Entwicklungswelle, vergleiche Abschn. 1.2.1, wurden Steuerungen zur *Schwimmwinkelkompensation* entwickelt [8, 50, 74, 165]. Ein Vorteil dieser Ansteuerung ist die hohe Stabilität bei Ausweichmanövern, jedoch reduziert sich die Lenkwilligkeit nach AHRING [8] und LAUMANN [118] durch eine zunehmende Untersteuertendenz des Fahrzeugs. Zudem kann eine Überkompensation aufgrund von Modellunsicherheiten zu negativen Ergebnissen führen [158].

Den bisher vorgestellten Steuerungsansätzen liegt entweder kein Streckenmodell zu Grunde oder die Steuerung geht aus diesem Modell mit festgelegten Randbedingungen für das Referenzverhalten direkt hervor. Hingegen werden in den Arbeiten von AHRING [8] und LAUMANN [118] das Referenzmodell und der Steuerungsalgorithmus zur Erhöhung der Modularität getrennt behandelt. In [118] wird ein invertiertes Einspurmodell zweiter Ordnung zum Vorsteuerentwurf für eine integrale Fahrdynamikregelung genutzt. Die Systeminversion erfolgt für den Ausgang Gierbeschleunigung, um eine propere<sup>2</sup> Vorsteuerung zu generieren. Die Referenzmodelle werden aus Einspurmodellen verschiedener Ordnung oder durch Vorgabe charakteristischer Kenngrößen synthetisiert, vergleiche [113, 132, 133]. In MORGANDO, VELARDOCCHIA [132] wird ein lineares Einspurmodell mit Berücksichtigung des Reifeneinlaufverhaltens und dem Ausgang Gierrate zum Entwurf einer Steuerung genutzt. Zur Erstellung des Referenzmodells werden Kriterien aus dem Giergeschwindigkeits- und Schwimmwinkelfrequenzgang mit subjektiven Testfahrerbewertungen korreliert, um ein „natürliches“ Fahrverhalten abzuleiten. Aus simulativen Tests wird in [132] die Zielstellung formuliert, dass bei einem Regelkonzept zur schnellen Reaktion auf Fahrereingaben mindestens 70 % der Stellgröße durch den Vorsteueranteil bereitgestellt werden sollen. Der *feedback*-Anteil wird in der zweiten Teilarbeit [133] ergänzt, damit werden die Betrachtungen auf Robustheit und Systemvernetzung ausgeweitet. Ebenso findet in den Arbeiten [8] und [118] eine Ergänzung um einen Regelanteil statt, der im Weiteren dem Konzept der *Modellfolgeregelung* zugeordnet wird.

In OBERMÜLLER [144, 145] und SCHINDLER, OBERMÜLLER [177] wird ein *adaptiver* Steueransatz untersucht. Der Fahrzustand wird dabei mit einem linearen, parametervarianten Einspurmodell (ESM) erfasst. Die zwei Achsschräglaufsteifigkeiten werden *online* auf Basis eines *divided difference Kalman-filter* derart verändert, dass stets das aktuelle Fahrverhalten wiedergegeben wird. Die adaptive Steuerung wird aus den resultierenden Schräglaufsteifigkeiten parametrisiert und besitzt die Eingänge Vorderachswinkel, Querbeschleunigung sowie Giergeschwindigkeit und -beschleunigung. Zusätzlich wird in der Arbeit von OBERMÜLLER [144] ein *offline*-Ansatz zur Bestimmung der Fahrzeugstabilität anhand von Phasenraumdiagrammen untersucht, um im Fahrversuch auf Basis einer vorab erstellten Datenbank eine stabilisierende Ansteuerung zu berechnen, vergleiche dazu VIENTINGHOFF [206]. Dieses Vorgehen stellt jedoch hohe Anforderungen an Rechenzeit sowie Speicherbedarf und ist gleichzeitig schwer im Bezug auf Anforderungen der Robustheit und der funktionalen Sicherheit umzusetzen.

Die vorgestellten Steuerungen zeichnen sich durch eine direkte Reaktion auf Führungsgrößen aus, wodurch nach KÖNIG et al. [104] die subjektive Bewertung des Fahrverhaltens

---

<sup>2</sup>Der Zählergrad ist kleiner gleich dem Nennergrad einer Übertragungsfunktion.

verbessert wird. Solange die Strecke stabil ist, was für die im Stand der Technik bekannten Zustandsgrößen von Querdynamikmodellen zutrifft, kann eine stabile Steuerung die Strecke nicht destabilisieren. Den Vorteilen steht jedoch ein hoher Applikationsaufwand bei Proportionalsteuerungen und die Forderung einer hohen Abbildungsgüte bei modellbasierten Ansätzen gegenüber. Das stationäre und dynamische Führungsverhalten ist direkt von der Modellgenauigkeit abhängig. Klassische Entwurfsmodelle wie das Ein- und Zweispurmodelle mit festen Parametern bilden das Nominalverhalten hinreichend gut ab [48, 109, 117]. Unter real existierenden Einflüssen wie Reifen-, Beladungs- und Reibwertänderungen verschlechtern sich die Ergebnisse jedoch nach BÖRNER [36] und OBERMÜLLER [144] deutlich. Ein Lösungsansatz im Bereich der Steuerungen ist die vorgestellte adaptive Steuerung.

## Regelungen

Durch eine Regelung kann Störeinflüssen (beispielsweise Seitenwind, Reibwertänderungen) und den aus Modellfehlern resultierenden Abweichungen durch Minimierung der Regelabweichung zwischen Referenzvorgabe und rückgeführter Fahrzustandsgröße entgegengewirkt werden [165, 171, 201]. Bei Regelungen tritt durch die in der Fahrzustandsgröße einfließenden Latenzen, die Reglerdynamik sowie die Aktuatordynamik ein Phasenverzug auf. Die Zeitverzögerungen in der Messgröße entstehen durch die verzögerte Reaktion des Fahrzeugs auf Stellgrößenänderungen, die Sensierung (gegebenenfalls Beobachtung) und die Kommunikation. Dieser Phasenverzug kann zu einer Verschlechterung des Fahrverhaltens oder gar einer Instabilität führen [8, 24, 25, 27, 144].

Neben dem technischen Regler stellt der Fahrer selbst auch einen Regler dar, siehe PROKOP [162]. Er besitzt nach ISERMANN [93] eine Reaktionszeit von etwa einer Sekunde. Aktive Fahrdynamikregelungen weisen deutlich kleinere Zeitkonstanten auf, sodass eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen werden kann. Typische Eingriffszeiten sind in HEISSING, ERSOY [74] für FWS-Systeme mit 25 – 75 ms und für Bremsengriffe mit 50 – 175 ms angegeben. Zur Verhinderung einer schlechten subjektiven Bewertung sollten nach OBERMÜLLER [144] Regeleingriffe bezüglich einer Hinterachslenkung mit einem Verzug von weniger als 50 ms erfolgen. Bei diesen hohen, dynamischen Anforderungen muss laut BURGIO [37] ein Kompromiss zwischen Regelgüte und Stabilität für das Regelkonzept gefunden werden.

Eine Kombination von Steuerung und Regelung führt zu einer gesamtheitlich „guten“ Lösung. Für Regelstrukturen, bei denen der auf einer Steuerung und der auf einer Rückführung basierende Stelleingriff aufaddiert werden sowie die Eingriffe auf einem einzigen Referenzmodell basieren, werden die Begriffe *Zwei-Freiheitsgrade-Struktur* nach GRAICHEN et al. [66] oder *Modellfolgeregelung* nach AHRING [8] und nach LAUMANN [118] verwendet. Die einzelnen Stellgesetze können unabhängig voneinander entworfen werden: die Vorsteuerung zielt auf Verbesserungen der Performance hin, die Rückführung sichert die Stabilität.

Im Stand der Technik sind vielfältige Regelungsansätze bekannt – aktuelle Gierratenregelungen finden sich in ARIPIN et al. [17], historische Regelungen sind in WALLENTOWITZ [226] zusammengefasst. Bei einigen Reglern wird ein Modell direkt im Stellgesetz berücksichtigt, bei anderen dient es ausschließlich zur Festlegung der Reglerparameter. Teilweise werden PID-Regler (engl. *proportional integral derivative controller*) und Zustandsregler komplett heuristisch entworfen. Die folgenden Ansätze werden im Weiteren diskutiert:

- P- und PI-Regler (Proportional- und Proportional-Integral-Regler),