

1 Einleitung

Fahrsicherheit, Fahrkomfort und Fahrdynamik stellen wesentliche, jedoch meist konträre Schwerpunkte der Fahrzeugentwicklung dar. Eine Erhöhung der passiven Fahrsicherheit ist häufig mit einem Anstieg des Fahrzeuggewichts und so mit einer Verschlechterung der Fahrdynamik verbunden. „Sportliche“ Fahrwerksauslegungen steigern die Bodenhaftung und erleichtern damit die Spurführung des Fahrzeugs. Die Aufbaubeschleunigungen werden dadurch allerdings erhöht und der Fahrkomfort reduziert [50]. Umgekehrt führt eine komfortorientierte Fahrwerksabstimmung zu höheren Radlastschwankungen und folglich zu einer Reduktion des fahrdynamischen Potentials [50].

Aktive Fahrwerkssysteme können diese Zielkonflikte entschärfen. So verhindert das heutzutage in nahezu allen Fahrzeugklassen verfügbare elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) zuverlässig Schleuderunfälle und leistet damit einen wesentlichen Beitrag zur Sicherheit aktueller Fahrzeuge [20]. Neben einer Erhöhung der Fahrsicherheit ermöglicht ein ESP mit erweiterter elektronischer Differentialsperre (XDS) durch gezielte Über- und Untersteuereingriffe eine positive Beeinflussung der Fahrdynamik. Der Fahrkomfort wird nicht beeinträchtigt. Aktive Systeme schaffen so zusätzliche Freiheitsgrade in der Fahrwerksentwicklung und erlauben eine zunehmende Entkopplung und gezielte Beeinflussung spezifischer Fahreigenschaften.

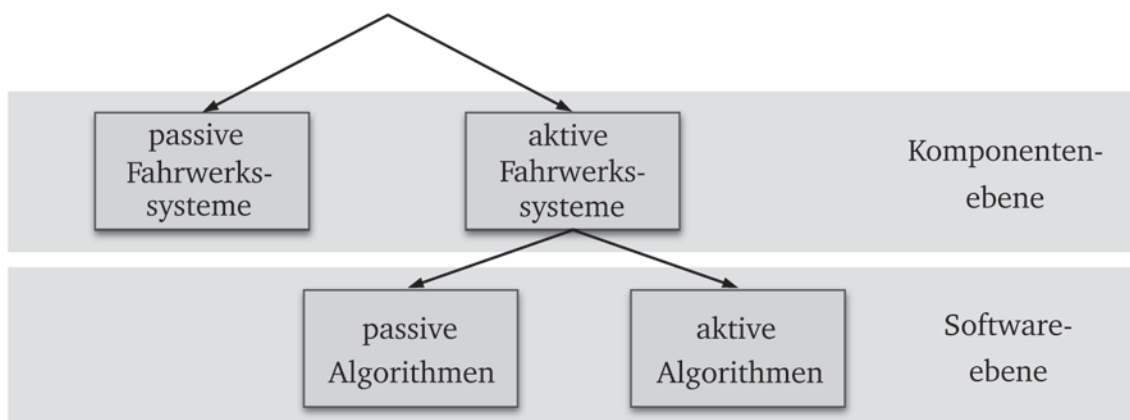


Bild 1.1: Vergleich von passiven und aktiven Fahrwerkssystemen auf Komponenten- und Softwareebene

Passive Fahrwerke stellen hingegen oft eine Kompromisslösung dar [66]. Im Gegensatz zu passiven Systemen zeichnen sich aktive nicht nur durch ihre Komponenten, sondern vielmehr durch eine Kombination von Aktorik und Algorithmik aus. Das Potential aktiver Systeme wird dabei maßgeblich von Softwarefunktionen beeinflusst. Diese können in Analogie zum Fahrwerk entsprechend Bild 1.1 „passiv“ oder „aktiv“ ausgeführt werden. „Passive“ Algorithmen werden statisch implementiert und auf einen bestimmten Arbeitspunkt abgestimmt. Sie sind dadurch nicht in der Lage, auf

Veränderungen von Strecke oder Störgrößen zu reagieren und erfordern einen Abstimmungskompromiss hinsichtlich diverser Fahrsituationen und Umgebungsbedingungen. Der Applikationsaufwand hierfür stellt einen signifikanten Anteil des Entwicklungsaufwands dar [30]. Zur Auflösung dieses Abstimmungskompromisses ist eine Integration von Umgebungsparametern in die Ansteuerung aktiver Systeme notwendig [16]. Änderungen, die durch Beladung, Bereifung oder Fahrbahneinflüsse entstehen, müssen in ihrer Wirkung begrenzt bleiben [4]. Eine geeignete Ansteuerung eines aktiven Systems erfordert daher eine möglichst genaue Erfassung des Fahrzustands [86].

„Aktive“ Algorithmen erlauben auf Grund ihrer dynamischen Struktur eine Anpassung an veränderliche Randbedingungen und ermöglichen so auch auf der Softwareebene zusätzliche Freiheitsgrade. Dies führt zu einer Entkopplung von Fahrsituation, Fahrverhalten und Umgebungsbedingungen. Zielkonflikte in der Applikation können aufgelöst und die Ansteuerung situativ verbessert werden. Das Gesamtpotential der Ansteuerung und die Beeinflussungsmöglichkeiten des Fahrverhaltens werden dadurch erhöht.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher die Entwicklung einer Ansteuerung zur Verbesserung des Fahrverhaltens mittels Hinterradlenkung angestrebt. Die Ansteuerung muss robust gegenüber veränderlichen Umgebungsbedingungen sein und Fahrten im Grenzbereich, mit Unter- und Übersteuersituationen, Fahrten mit verschiedenen Reifen und Fahrten bei unterschiedlichen Reibwerten berücksichtigen. Das Fahrverhalten ist dabei agil und für den Fahrer vorhersehbar zu gestalten. Die Fahrzeugstabilität darf zu keiner Zeit gefährdet werden. Die Ansteuerung muss stationäre Genauigkeit aufweisen und das vorgegebene Sollverhalten mit möglichst geringem Zeitverzug einstellen. Das über die Hinterradlenkung veränderte Fahrverhalten soll abschließend hinsichtlich der Fahrzeugagilität, der Fahrzeugbeherrschbarkeit und der Vorhersehbarkeit der Ansteuerung subjektiv bewertet werden.

2 Stand der Technik

Im Folgenden wird der Stand der Technik bezüglich der Eigenschaften und der möglichen Ansteuerungen einer Hinterradlenkung erörtert. Kapitel 2.1 beschreibt dazu den Einfluss einer Hinterradlenkung auf das Fahrverhalten durch eine Verschiebung von Momentanpol und virtuellem Radstand. Weiterhin werden in der Literatur vorhandene Funktionen einer Hinterradlenkung aufgegriffen und klassifiziert. In Kapitel 2.2 werden Ansätze zur Stabilitätsbestimmung des Fahrverhaltens zusammengefasst und typische Merkmale von Steuerung und Regelung diskutiert. Für eine Verbesserung der Ansteuerungsqualität werden im Anschluss Ansätze und mögliche Parameter einer Adaption betrachtet. Kapitel 2.3 fasst wichtige Aspekte zum Stand der Technik zusammen und beschreibt die Zielsetzung der Arbeit.

2.1 Beeinflussung des Fahrverhaltens mittels Hinterradlenkung

Schon seit den 80er Jahren werden Hinterradlenkungen zur Spuränderung der Hinterräder und damit zur Beeinflussung des Fahrverhaltens eingesetzt. Prinzipiell kann zwischen zwei Ausführungsformen unterschieden werden:

1. Passive Hinterachskinematik
2. Aktive Hinterachskinematik

Achsen mit einer passiven Hinterachskinematik werden durch Kinematik und Elastokinematik so ausgelegt, dass durch das Einwirken von Seitenkräften oder Federbewegungen gezielt Spurveränderungen auftreten. Als Beispiele hierfür sind die Weissach-Achse von Porsche, die Raumenkerachse von Mercedes-Benz oder die Schraubenkerachse von BMW [88] zu nennen.

Aktive Hinterachskinematiken hingegen besitzen einen mechanischen, hydraulischen oder elektro-mechanischen Aktor und können so unabhängig von äußeren Einflussfaktoren einen gewünschten Spurwert einstellen. Eine aktive Hinterachskinematik wird häufig auch als Hinterradlenkung bezeichnet. Als erste Bauform erhielt die mechanische Hinterradlenkung 1987 Einzug in ein Serienfahrzeug. Beim Honda Prelude wurde der Vorderradlenkwinkel über ein Getriebe an die Hinterachse übertragen. Der Hinterradlenkwinkel folgte aus der Getriebeübersetzung und dem gestellten Vorderradlenkwinkel nach der Berechnungsvorschrift $\delta_h = k_p(\delta_v)$ [95]. Die mechanische Bauform wies jedoch Nachteile bezüglich Kosten, Gewicht und Package auf. Daher wurden mechanische Bauformen der Hinterradlenkung nach und nach durch elektro-hydraulische und elektro-mechanische Varianten ersetzt. Elektro-hydraulische Aktoren überzeugen durch eine hohe Leistungsdichte und damit hohen Stellkräften. Elektro-mechanische Aktoren hingegen ermöglichen einen großen Stellwinkelbereich

bei hoher Stellwinkelgeschwindigkeit [70]. Aktuelle Fahrzeuge wie der Renault Laguna [48] oder der BMW 5er und 7er [115] werden auf Grund der hohen Anforderungen an Energieverbrauch, Stellgeschwindigkeit und Regelbarkeit ausschließlich mit elektro-mechanischen Systemen ausgerüstet. In Bild 2.1 ist das Fahrwerk und die darin integrierte Hinterradlenkung eines BMW 7er dargestellt. Diese erlaubt eine Spurveränderung von $\pm 3^\circ$ [115].



Bild 2.1: Hinterradlenkung im BMW 7er [115]

Detailliertere Informationen zur historischen Entwicklung von Hinterradlenksystemen und deren Ansteuerung sind Driedger, Brinkord et al. [33] zu entnehmen.

Hinterradlenkungen erlauben eine gezielte Beeinflussung des Fahrverhaltens. Dabei verändert sich vor allem das Verhältnis von Gierrate zu Querbeschleunigung. Dies wird im Folgenden anhand einer schematischen Darstellung erläutert. Bild 2.2 zeigt dazu ein Einspurmodell mit dem tatsächlichen Radstand L_{real} . Es wird angenommen, dass die Schräglaufwinkel α_i mit den Radmittelebenen übereinstimmen. Der Momentanpol (MP) der Fahrzeugbewegung ergibt sich durch ein Lot auf die Schräglaufwinkel an Vorder- und Hinterachse. Bei einem nicht hinterradgelenkten Fahrzeug liegt der Momentanpol unter Berücksichtigung der genannten Annahme folglich immer auf Höhe der Hinterachse. Das Stellen eines Lenkwinkels an der Vorderachse führt zu einer seitlichen Verschiebung des Momentanpols und einer alleinigen Veränderung des Kurvenradius.

Bei hinterradgelenkten Fahrzeugen hingegen entsteht ein weiterer Freiheitsgrad und der Momentanpol kann nicht nur seitlich, sondern auch in Richtung der Fahrzeuglängsachse verschoben werden. Dabei ergeben sich prinzipiell zwei Lenkstrategien: gegensinniges und gleichsinniges Lenken. Als gegensinniges Lenken wird eine entgegengesetzte und als gleichsinniges Lenken eine gleichgerichtete Einschlagrichtung der

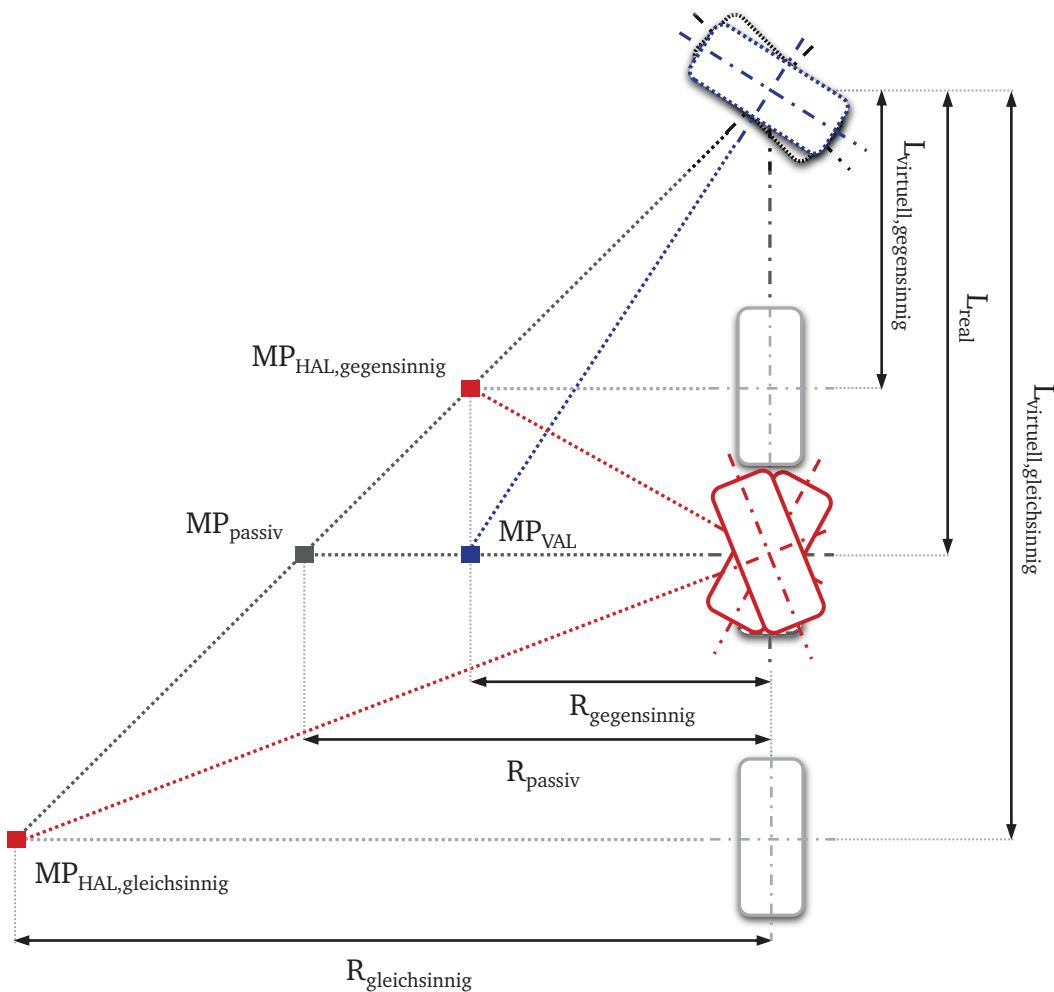


Bild 2.2: Einfluss von Lenkbewegungen an Vorder- und Hinterachse auf Kurvenradius und virtuellen Radstand am Einspurmodell

Vorder- und Hinterräder bezeichnet. Der Kurvenmittelpunkt verschiebt sich im Fall eines gegensinnigen Lenkeinschlags am Lot der Schräglaufwinkel der Vorderachse nach vorne. Damit wird sowohl der Kurvenradius als auch der virtuelle Radstand des Fahrzeugs verkleinert. Der virtuelle Radstand lässt sich durch eine Projektion des Momentanpols auf ein nicht hinterrad gelenktes Fahrzeug bestimmen. Das Fahrverhalten wird durch eine Verkleinerung des virtuellen Radstands handlicher und agiler [83]. Handlichkeit wird dabei in Anlehnung an Heissing und Brandl [49] als Fahrzeugreaktion bei kurvigem Straßenverlauf im unteren Geschwindigkeitsbereich definiert. Agilität beschreibt die Direktheit und die Spontanität, mit der Lenkbewegungen im höheren Geschwindigkeitsbereich umgesetzt werden.

Gleichsinniges Lenken hingegen vergrößert den virtuellen Radstand. Dies führt zu einer Reduktion der Gierbewegung des Fahrzeugs. Damit wird die Untersteuertendenz des Fahrzeugs verstärkt und ein stabileres Fahrverhalten generiert. Die Fähigkeit einer Hinterradlenkung, neben der Beeinflussung des Kurvenradius auch den virtuellen

Radstand zu verändern, ermöglicht eine Auflösung des Zielkonflikts zwischen Agilität und Stabilität [119]. Damit können mit einer Hinterradlenkung folgende Funktionen realisiert werden [13, 46, 51, 63, 70, 84]:

Hohe Komplexität der Ansteuerung		<ul style="list-style-type: none"> - höhere Kontrollierbarkeit und Sicherheit im Grenzbereich - Unterstützung des ESPs - Untersteuereingriffe - Verbesserung des Kurvenbrems- und Lastwechselverhaltens - Ausregelung von Störgrößen
	Geringe Komplexität der Ansteuerung	<ul style="list-style-type: none"> - Wendekreisreduktion - variable Lenkübersetzung - geringer Platzbedarf beim Einparken
Niederdynamischer Fahrbereich (Komfortbereich)		Hochdynamischer Fahrbereich (Grenzbereich)

Bild 2.3: In der Literatur aufgeführte Funktionen zur Verbesserung des Fahrverhaltens mit einer Hinterradlenkung [13, 46, 51, 63, 70, 84]

In Bild 2.3 werden aus der Literatur bekannte Funktionen zur Verbesserung des Fahrverhaltens mittels Hinterradlenkung entsprechend dem jeweiligen Fahrbereich und der notwendigen Komplexität der Ansteuerung klassifiziert.

Der Fahrbereich wird dazu in einen niederdynamischen Komfortbereich und einen hochdynamischen Grenzbereich unterteilt. Der Komfortbereich umfasst hauptsächlich Fahrmanöver bei langsamen Geschwindigkeiten im linearen Fahrbereich. Dazu zählen Einparkmanöver, Rangiermanöver, Stadtfahrten bis etwa 50 km/h und Fahrmanöver mit geringen Lenkwinkelgeschwindigkeiten. Fahrten bei höherer Geschwindigkeit, hoher Querbeschleunigung oder Fahrmanöver mit hoher Reibwertausnutzung an der Haftgrenze des Reifens werden dem hochdynamischen Fahrbereich zugeordnet. Dazu zählen schnelle Spurwechselmanöver, Fahrmanöver mit einem hohen Lenkwinkelgradienten und Unter- und Übersteuermanöver.

Auf der Ordinate ist der Grad der Komplexität der Ansteuerung aufgetragen, der zur Realisierung der entsprechenden Funktion notwendig ist. Dabei wird zwischen geringer und hoher Komplexität unterschieden. Ansteuerungen geringer Komplexität sind durch einfache, proportionale Zusammenhänge gekennzeichnet und werden zu Beginn von Kapitel 2.2.2 genauer beschrieben. Komplexe Ansteuerungen erfordern eine genaue Kenntnis des Fahrzustands des Fahrzeugs und werden daher meist situationsabhängig aktiviert oder durch einen Regelkreis gestützt.

Nach Bild 2.3 lassen sich die dargestellten Funktionen in zwei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe enthält Funktionen aus dem niederdynamischen Fahrbereich, die durch

eine Ansteuerung geringer Komplexität erreicht werden können. Dies ermöglicht die Umsetzung von Komfortfunktionen mit vertretbarem Aufwand. Die zweite Gruppe beschreibt Funktionen aus dem hochdynamischen Fahrbereich und erfordert hierfür komplexe Ansteuerstrategien. Auf Grund der Funktionsvielfalt und des Potentials zur Beeinflussung des Fahrverhaltens liegt der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf Funktionen der zweiten Gruppe.

2.2 Ansätze zur Ansteuerung einer Hinterradlenkung

Im Rahmen dieses Kapitels werden zunächst Bewertungskriterien für einen objektiven Vergleich von Steuerung und Regelung erarbeitet. Auf Basis der definierten Kriterien erfolgt eine Bewertung von Steuerung und Regelung hinsichtlich einer Eignung zur Ansteuerung der Hinterradlenkung. Da die Qualität einer Steuerung oder Regelung vom Systemzustand abhängig ist und das Übertragungsverhalten der Strecke Fahrzeug je nach Stabilität der Fahrsituation stark differiert, wird in Kapitel 2.2.1 über eine Analyse der Fahrstabilität der Systemzustand eingegrenzt. Hierfür werden bekannte Methoden zur Fahrstabilitätsanalyse vorgestellt. Liegen Informationen über die Systemstabilität und das entsprechende Übertragungsverhalten vor, kann eine Ansteuerung entworfen werden. Dazu werden in Kapitel 2.2.2 Ansätze zur Steuerung und in Kapitel 2.2.3 Ansätze zur Regelung der Hinterradlenkung dargestellt. In Kapitel 2.2.4 werden dann Adaptionismethoden aufgeführt, die eine detailliertere Abbildung des Fahrverhaltens erlauben und damit eine Verbesserung der Ansteuerung ermöglichen.

Für den Entwurf einer Ansteuerung existieren nach Odenthal [77] und Laumanns [66] folgende Bewertungskriterien:

- Stabilität
- Regelgüte
- Robustheit
- Abstimmbbarkeit

Ein lineares System wird nach Unbehauen als asymptotisch stabil bezeichnet, „wenn alle Pole, d.h. sämtliche Wurzeln der charakteristischen Gleichung, negative Realteile aufweisen“ [112]. Instabile Ansteuerungen neigen häufig zu starkem Schwingverhalten, hoher Stelldynamik und hoher Stellgrößenausnutzung. Ein Fahrzeug mit instabiler Ansteuerung der Hinterradlenkung ist für den Fahrer meist nicht beherrschbar. Für eine Ansteuerung der Hinterradlenkung muss daher zu jedem Zeitpunkt stabiles Verhalten sichergestellt werden.

Die Regelgüte beschreibt die Abweichung zwischen Soll- und Istsignal einer Ansteuerung und wird häufig auch als Führungsverhalten bezeichnet. Nach Schulz [98] kann das Führungsverhalten eines Regelkreises in stationäre Genauigkeit und dynamisches Verhalten des Einschwingvorgangs unterteilt werden. Stationäre Genauigkeit liegt dann vor, wenn sich die Regelgröße am Ende ihres Einschwingvorgangs nahe am



Sollwert befindet. Das dynamische Verhalten des Einschwingvorgangs wird durch Größen wie Überschwingweite, An- und Ausregelzeit charakterisiert [98]. Regelgüte bzw. Führungsverhalten stehen meist im Zielkonflikt zur Stabilität [66].

Die Robustheit dient als Maß für die Stabilitätsreserve und wird primär von Veränderungen der Regelstrecke beeinflusst [98]. Eine Ansteuerung gilt als abstimmbare, wenn ein direkter Zusammenhang zwischen Abstimmparameter und Fahrverhalten existiert. Damit wird eine Parametrierbarkeit der Ansteuerung ohne detaillierte Kenntnis der Ansteuerstrategie ermöglicht.

Wird unter Berücksichtigung der genannten Kriterien eine Ansteuerung entworfen, kann diese als Steuerung oder Regelung ausgeführt werden. Bild 2.4 zeigt die typische Struktur einer Steuerung.



Bild 2.4: Struktur einer Steuerung

Über eine Sollwertvorgabe wird die Führungsgröße w erzeugt. Die Steuerung berechnet auf Basis der Führungsgröße w die Stellgröße u . Diese dient als Eingang der Strecke. In Abhängigkeit von der Stellgröße u verändert sich das Übertragungsverhalten der Strecke, wodurch die Ausgangsgröße y beeinflusst wird. Die Ausgangsgröße y ist einem Ist- oder Messwert gleichzusetzen.

Die Steuerung besitzt exaktes Führungsverhalten, wenn die Ausgangsgröße y und die Führungsgröße w übereinstimmen. Hierfür muss das Systemverhalten der Steuerung zu jedem Zeitpunkt genau der inversen Systemdynamik der Strecke entsprechen.

Nach Ahring [4] und Laumanns [66] besitzt eine Steuerung prinzipbedingt folgende Vorteile:

- Direkte Reaktion auf Führungsgrößen
- Keine Soll-/Istabweichung zur Stellgrößenberechnung notwendig
- Keine Stabilitätsprobleme

Als Nachteile werden aufgeführt:

- Genauigkeit der Steuerung ist abhängig von der Modellgüte
- Modell ist oft zu ungenau

Eine Änderung der Führungsgröße w bewirkt bei einer Steuerung eine sofortige Anpassung der Stellgröße u . Damit kann die Steuerung sehr schnell und ohne zusätzlichen Phasenverzug auf Veränderungen der Sollwertvorgabe reagieren. Eine Soll-/Istabweichung oder eine Messung von Zustandsgrößen ist bei einer Steuerung im

Gegensatz zu einer Regelung nicht notwendig. Die Stabilität einer Steuerung wird auch bei starker Variation der Einflussgrößen nicht gefährdet [111]. Dies ist vor allem für die Ansteuerung sicherheitsrelevanter Systeme von Vorteil.

Allerdings wird das Führungsverhalten einer Steuerung direkt durch die Abbildegenauigkeit der Strecke beeinflusst. Existiert ein genaues Modell der Strecke, ergibt sich durch Inversion eine Steuerung mit gutem Führungsverhalten. Unterliegt die Strecke jedoch einer zeitlichen Veränderung oder dem Einfluss von Störgrößen, führt dies zu einer zunehmenden Abweichung von Soll- und Istverhalten.

Eine Ansteuerung der Hinterradlenkung erfordert daher bei Verwendung einer Steuerung eine möglichst genaue Abbildung des Fahrverhaltens. Einfache Ein- und Zweispurmodelle zur Modellierung des Fahrverhaltens beschreiben real existente Einflussfaktoren wie eine nichtlineare Reifencharakteristik, Änderungen von Beladung, Reifen oder Reibwert meist nur unzureichend und verhindern damit ein gutes Führungsverhalten [16].

Eine Regelung hingegen kann über eine Rückführung der Zustandsgrößen selbstständig Störgrößen ausregeln. Die entsprechende Struktur eines Regelkreises ist in Bild 2.5 dargestellt. Dabei wird ähnlich zu einer Steuerung über eine Sollwertvorgabe die

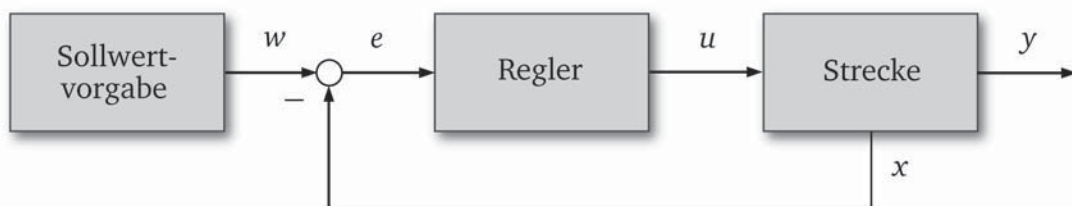


Bild 2.5: Struktur einer Regelung

Führungsgröße w berechnet. Wird als Führungsgröße w eine der Zustandsgrößen verwendet und gilt damit $w = x_{soll}$, kann die Führungsgröße w mit der Zustandsgröße x verglichen und die Regelabweichung e berechnet werden. Der Regler generiert dann aus der Regelabweichung e die Stellgröße u . Mit dem Übertragungsverhalten der Strecke ergibt sich daraus die Ausgangsgröße y .

Nach Ausführungen in der Literatur [4, 21, 29, 86] besitzt eine Regelung folgende Eigenschaften:

Vorteile:

- Selbstständiges Ausregeln von äußeren Störungen
- Identisches Systemverhalten unabhängig von äußeren Störgrößen

Nachteile:

- Phasenverzug bei Stellgrößenberechnung durch Soll-/Istabweichung

- Phasenverzug kann zur Reglerinstabilität führen
- Reduzierte Reglerstabilität durch äußere Störungen
- Zielkonflikt zwischen Regelgüte und Reglerstabilität

Im Gegensatz zur Steuerung ist eine Regelung in der Lage, selbstständig Störgrößen auszuregeln [111]. Tritt durch eine Modellungenauigkeit oder nicht modellierte Einflussfaktoren eine Abweichung zwischen Soll- und Istverhalten auf, wird diese durch den Regler aufgenommen und mittels Anpassung der Stellgröße u ausgeglichen. Damit kann eine Regelung auch bei einer Veränderung der Strecke stationäre Genauigkeit und hohes Führungsverhalten realisieren. Das Verhalten der Strecke wird durch die Regelung annähernd konstant gehalten [4].

Im Bezug auf die Ansteuerung einer Hinterradlenkung kann eine Regelung das Fahrverhalten auch bei veränderlichen Umgebungsbedingungen wie Seitenwind oder Reibwertsprüngen stabilisieren und dem Fahrer ein gewohntes Fahrgefühl vermitteln. Kurzfristige Störgrößen werden vom Regler kompensiert und erfordern kein Eingreifen des Fahrers. Damit vereinfacht sich für den Fahrer die Fahraufgabe und die Fahrsicherheit wird erhöht [4].

Für die Berechnung einer Stellgröße benötigt eine Regelung allerdings eine Soll-/Istabweichung. Diese führt zu einem „Nacheilen“ des Reglers und damit zu einer Erhöhung des Phasenverzugs. Auf Grund des Zeitverhaltens eines Reglers wird der benötigte Wert der Stellgröße nicht instantan, sondern mit der im Regler hinterlegten Dynamik aufgebaut. Dadurch steigt der Phasenverzug weiter an. Neben einer Verschlechterung des Führungsverhaltens kann ein hoher Phasenverzug eine Instabilität des Reglers bewirken [4].

Eine Regelung der Hinterradlenkung unterliegt daher einigen Randbedingungen. Auf Grund der Mehrfachreglerstruktur im Fahrzeug muss eine gegenseitige Beeinflussung des Reglers Mensch und der Hinterradlenkung ausgeschlossen werden [29]. Dies kann durch eine Trennung der Regeldynamik beider Regler erreicht werden. Normalfahrer reagieren auf Fahrzeugreaktionen erst nach ca. einer Sekunde [57]. Regeleingriffe mit einer Zeitkonstante von kleiner 50 ms werden vom Fahrer als „konstant“ wahrgenommen und verhindern damit eine gegenseitige Beeinflussung. Tritt eine Überlagerung der Regeldynamik auf, kann dies zur Reglerinstabilität führen [29]. Da die Wahrnehmung des Menschen sehr empfindlich auf einen Phasenverzug der Hinterradlenkung reagiert, müssen Phasenverzüge möglichst gering gehalten werden [12, 13]. Für eine Regelung der Hinterradlenkung wird daher eine hohe Dynamik gefordert. Die hohe Reglerverstärkung beeinträchtigt dann jedoch zunehmend die Stabilität des Regelkreises und führt zu einem Zielkonflikt zwischen Regelgüte und Reglerstabilität [4]. Nach Burgio [21] muss die Regeldynamik daher so gewählt werden, dass die Stabilität unter allen Umständen gewährleistet bleibt. Dies bedingt jedoch einen Kompromiss hinsichtlich des erreichbaren Fahrverhaltens. „So führt etwa eine für eine glatte oder rutschige Fahrbahnoberfläche optimierte Abstimmung zu einem auf trockenem Asphalt zu weichen und unzureichenden Fahrverhalten“ [21].

Der Vergleich von Steuerung und Regelung hat gezeigt, dass beide Strategien Vorzüge hinsichtlich einer Ansteuerung der Hinterradlenkung besitzen. Die Steuerung zeichnet sich hauptsächlich durch eine schnelle Reaktion auf Änderungen der Führungsgröße und eine systemimmanente Stabilität aus. Die Regelung erlaubt hingegen ein verbessertes Führungsverhalten bei Veränderungen der Regelstrecke und ein selbstständiges Ausregeln von Störgrößen. Ziel für die Ansteuerung der Hinterradlenkung ist daher eine Kombination der Vorteile von Steuerung und Regelung.

2.2.1 Methoden zur Analyse der Fahrstabilität

Neben der Stabilität von Steuerung und Regelung muss bei der Ansteuerung einer Hinterradlenkung auch die Gesamtstabilität Fahrer - Fahrzeug - Regelsystem berücksichtigt werden. So kann zum Beispiel ein Fahrzeug im Grenzbereich durch einen gegensinnigen Lenkeinschlag der Hinterradlenkung die Stabilitätsgrenze überschreiten. Für den Fahrer ist das Fahrzeug dadurch nur noch schwer kontrollierbar. Eine zu hohe Fahrstabilität hingegen führt zu einem Fahrverhalten mit stark reduzierter Handlichkeit, Agilität, Kurvenwilligkeit und einer Verschlechterung des Ansprechverhaltens [21, 66]. Eine gezielte Auslegung der Ansteuerung erfordert daher eine genaue Kenntnis des aktuellen Fahrzustands und des Abstands zur Fahrstabilitätsgrenze. In diesem Kapitel werden deshalb Methoden zur Analyse der Fahrstabilität aufgezeigt [16, 26, 57, 79, 113, 116]. Diese lassen sich entsprechend ihrer Berechnungsvorschrift gliedern:

- Berechnung einer Gierratenabweichung
- Betrag des Schwimmwinkels
- Auswertung der charakteristischen Geschwindigkeit
- Eigenwertberechnung
- Phaseplane-Methode

Die Stabilitätsbetrachtung mittels Gierratenabweichung berechnet über ein lineares Modell des Fahrverhaltens eine Gierrate und vergleicht diese mit der im Fahrzeug gemessenen Gierrate. Überschreitet die Differenz beider Gierraten einen Grenzwert, wird das Fahrverhalten als instabil bezeichnet. Dabei wird die zunehmende Nichtlinearität des Fahrverhaltens bei einer Annäherung an die Stabilitätsgrenze ausgewertet. Dieses Verfahren wird beispielsweise im ESP verwendet [57]. Ein Nachteil des Verfahrens ist die notwendige Definition der Grenzwerte. Die Grenzwerte sind nach Vietinghoff [113] meist vom Fahrmanöver abhängig und daher nur sehr aufwändig zu bestimmen. Ein Wechsel zwischen Unter- und Übersteuersituationen führt zu einem Durchlaufen des gesamten Toleranzbands der Grenzwerte. Eine Instabilität kann so erst beim Verlassen des Toleranzbands erkannt werden. Notwendige Eingriffe erfolgen dadurch oft zu spät [113]. Für eine Fahrzeugstabilisierung mittels Hinterradlenkung ist vor allem in Übersteuersituationen ein frühzeitiges Eingreifen erforderlich. Auf Grund der verzögerten Erkennung einer Fahrzeuginstabilität und des hohen