



ERICH SCHINDLER



# Fahrdynamik

Grundlagen des Lenkverhaltens  
und ihre Anwendung  
für Fahrzeugregelsysteme

3., aktualisierte Auflage

expert ›





Erich Schindler

# Fahrdynamik

**Grundlagen des Lenkverhaltens  
und ihre Anwendung  
für Fahrzeugregelsysteme**

3., aktualisierte Auflage



Kontakt & Studium

Band 685

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Wilfried J. Bartz

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Mesenholl

**expert** ›

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen  
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.dnb.de> abrufbar.

3., aktualisierte Auflage 2019  
2., aktualisierte Auflage 2013  
1. Auflage 2007

© 2019 · expert verlag GmbH  
Dischingerweg 5 · D-72070 Tübingen

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung  
außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des  
Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen,  
Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in  
elektronischen Systemen.

Internet: [www.expertverlag.de](http://www.expertverlag.de)  
eMail: [info@verlag.expert](mailto:info@verlag.expert)

CPI books GmbH, Leck

ISBN 978-3-8169-3444-8 (Print)  
ISBN 978-3-8169-8444-3 (ePDF)

## Herausgeber-Vorwort

---

Bei der Bewältigung der Zukunftsaufgaben kommt der beruflichen Weiterbildung eine Schlüsselstellung zu. Im Zuge des technischen Fortschritts und angesichts der zunehmenden Konkurrenz müssen wir nicht nur ständig neue Erkenntnisse aufnehmen, sondern auch Anregungen schneller als die Wettbewerber zu marktfähigen Produkten entwickeln.

Erstausbildung oder Studium genügen nicht mehr – lebenslanges Lernen ist gefordert! Berufliche und persönliche Weiterbildung ist eine Investition in die Zukunft:

- Sie dient dazu, Fachkenntnisse zu erweitern und auf den neuesten Stand zu bringen
- sie entwickelt die Fähigkeit, wissenschaftliche Ergebnisse in praktische Problemlösungen umzusetzen
- sie fördert die Persönlichkeitsentwicklung und die Teamfähigkeit.

Diese Ziele lassen sich am besten durch die Teilnahme an Seminaren und durch das Studium geeigneter Fachbücher erreichen.

Die Fachbuchreihe *Kontakt & Studium* wird in Zusammenarbeit zwischen der Technischen Akademie Esslingen und dem expert verlag herausgegeben.

Mit über 700 Themenbänden, verfasst von über 2.800 Experten, erfüllt sie nicht nur eine seminarbegleitende Funktion. Ihre eigenständige Bedeutung als eines der kompetentesten und umfangreichsten deutschsprachigen technischen Nachschlagewerke für Studium und Praxis wird von der Fachpresse und der großen Leserschaft gleichermaßen bestätigt. Herausgeber und Verlag freuen sich über weitere kritisch-konstruktive Anregungen aus dem Leserkreis.

Möge dieser Themenband vielen Interessenten helfen und nützen.

Dipl.-Ing.Hans-Joachim Mesenholl



## Vorwort zur 3. Auflage

---

Fahrzeugregelsysteme haben in den letzten Jahren an Anzahl, Umfang und Komplexität stark zugenommen. Mechanische Komponenten werden dabei meist um mechatronische Systeme ergänzt. Beispiele hierfür sind Fahrdynamikregelsysteme (ESP, Aktivlenkung, Adaptive Fahrwerksregelung) sowie zahlreiche Assistenzsysteme, welche einerseits den Fahrer unterstützen und andererseits Fahraufgaben komplett übernehmen.

Das vorliegende Buch vermittelt die Grundlagen der Fahrdynamik, welche bei der Entwicklung, Applikation und Serienbetreuung von Fahrzeugregelsystemen benötigt werden. Schwerpunktmäßig wird das Lenkverhalten (Handling) behandelt, wobei neben den theoretischen Grundlagen und ihrer Anwendung auch Testverfahren sowie das Verhalten im Grenzbereich betrachtet werden.

Zielsetzung bei der Erstellung des Buches war, den Stoff in kompakter Form darzustellen. Da jedoch aufgrund der enormen Fortschritte in der Mikromechanik immer mehr kostengünstige und fahrzeugtaugliche Sensoren zur Erfassung der Fahrzeugbewegung zur Verfügung stehen und diese zunehmend zum Einsatz kommen, war es notwendig, in Kapitel 3 die Kinematik etwas ausführlicher darzustellen. Diese Kinematikkenntnisse sind notwendig, um einerseits Fahrzeugregelsysteme zu entwickeln (Funktions-, Schätz- und Überwachungsalgorithmen) und andererseits entwicklungsbegleitend fahrdynamische Messungen bzw. Simulationen durchzuführen und deren Ergebnisse richtig zu interpretieren.

Wegen der großen Bedeutung der Fahrdynamikregelung, die inzwischen als Basis für vielfältige Weiterentwicklungen dient und die bei Systemvernetzungen eine wichtige Rolle spielt, wird diese abschließend in Kapitel 9 kurz vorgestellt.

Entstanden ist dieses Buch während meiner Tätigkeit an der Hochschule Esslingen. Dabei ist meine Erfahrung sowohl aus meiner Lehr-, Beratungs- und Seminar­tätigkeit als auch aus meiner langjährigen Tätigkeit in Forschung und Entwicklung bei der Daimler-Benz AG eingeflossen.

Das vorliegende Buch wendet sich besonders an Ingenieure, welche sich mit der Entwicklung, Applikation und Serienbetreuung von Fahrzeugregelsystemen beschäftigen. Weiterhin sind Ingenieure angesprochen, die in der Fahrwerksentwicklung tätig sind und die ihre Fahrdynamikkenntnisse auffrischen und vertiefen wollen. Darüber hinaus ist das Buch für alle Studierende der Fahrzeugtechnik, des Maschinenbaus und der Mechatronik zu empfehlen, um es vorlesungsbegleitend, aber auch zum Selbststudium zu verwenden.

Mein besonderer Dank gilt dem expert verlag für seine vielfältige Hilfe und die termingerechte Unterstützung bei der Erstellung dieses Buches.

Gleichermaßen bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen Thomas Hanak, Michael Gipser und Mathias Oberhauser sowie bei meinen ehemaligen Kollegen von Daimler-Benz, Peter Gavranovic und Thomas Wohland, für ihre inhaltliche Durchsicht und Anregungen, die mir geholfen haben, mancherlei Ungenauigkeiten zu vermeiden und die Klarheit der Darstellung zu verbessern.

Mein ganz persönlicher Dank gilt meiner Frau Brigitte für ihr Verständnis und ihre Geduld und meinen beiden Kindern Johannes und Damaris für ihre Unterstützung beim Korrekturlesen.

Weissach im Tal, im Januar 2019

Erich Schindler

# Inhalt

---

<b>1</b>	<b>Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug-Umwelt .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Fahraufgaben .....</b>	<b>1</b>
1.2	Kursregelung.....	3
1.3	Definition Fahrverhalten und Fahrdynamik .....	6
1.4	Definition aktive Sicherheit.....	7
<b>2</b>	<b>Anforderungen an die Fahrdynamik.....</b>	<b>9</b>
2.1	Grundsätzliche Anforderungen .....	9
2.2	Anforderungen zur Erhöhung der aktiven Sicherheit .....	9
2.3	Zielkonflikte .....	10
<b>3</b>	<b>Kinematik der Fahrzeugbewegung.....</b>	<b>11</b>
3.1	Freiheitsgrade eines Fahrzeugs.....	11
3.2	Ebene Fahrzeugbewegung .....	13
3.2.1	Koordinatensysteme, Definition fahrdynamischer Größen .....	13
3.2.2	Kinematik der ebenen Starrkörperbewegung.....	15
3.2.3	Ebene Fahrzeugbewegung ohne Schräglaufwinkel .....	20
3.2.4	Ebene Fahrzeugbewegung mit Schräglaufwinkel .....	22
3.2.5	Beschreibung der Bewegung im fahrzeugfesten Koordinatensystem .....	24
3.2.6	Stationäre Gleichungen der ebenen Fahrzeugbewegung.....	27
<b>4</b>	<b>Lenkverhalten – Einspurmodell und Grundlagen .....</b>	<b>29</b>
4.1	Lineares Fahrzeugmodell (Einspurmodell).....	29
4.1.1	Modellbildung.....	29
4.1.2	Zusammenfassung lineares Fahrzeugmodell .....	34
4.2	Stationäres Lenkverhalten .....	35
4.2.1	Eigenlenkverhalten, Unter-, Neutral- und Übersteuern .....	35
4.2.2	Bewegungsgleichungen und stationärer Fahrzustand .....	38
4.3	Instationäres Lenkverhalten .....	49
4.3.1	Giereigenkreisfrequenz, Giereigenfrequenz und Gierdämpfung.....	49
4.3.2	Stabilität .....	52
4.3.3	Übertragungsfunktionen.....	55
4.3.4	Frequenzgänge.....	60
4.3.5	Lenkwinkelsprung .....	77
<b>5</b>	<b>Einfluss von Fahrzeugparametern .....</b>	<b>87</b>
5.1	Einleitung .....	87
5.2	Einfluss einzelner Modellparameter auf das Fahrverhalten .....	87
5.2.1	Einfluss von Fahrzeugmasse $m$ und Trägheitsmoment $J_z$ .....	89
5.2.2	Einfluss von Schwerpunktlage und Lenkübersetzung $i_s$ .....	93
5.2.3	Einfluss der Schräglaufsteifigkeiten $C_v$ und $C_h$ .....	97
5.3	Einfluss von Beladung und konstruktiven Maßnahmen auf das Fahrverhalten .....	101

<b>6</b>	<b>Testverfahren und Bewertungsmethoden</b> .....	<b>103</b>
6.1	Zielsetzung.....	103
6.2	Testmethodik .....	104
6.3	Bewertungsmethodik.....	105
6.4	Testverfahren.....	108
6.4.1	Stationäre Kreisfahrt ( <i>ISO 4138</i> ).....	108
6.4.2	Lastwechsel aus stationäre Kreisfahrt ( <i>ISO 9816</i> ).....	110
6.4.3	Lenkwinkelsprung ( <i>ISO 7401</i> ).....	111
6.4.4	Doppelter Fahrspurwechsel ( <i>ISO 3888-1</i> ).....	113
6.4.5	VDA-Spurwechseltest ( <i>ISO 3888-2</i> ) .....	115
6.4.6	Slalom .....	116
6.4.7	Bremsen bei Geradeausfahrt auf homogener Fahrbahn.....	116
6.4.8	Bremsen bei Geradeausfahrt auf einseitig glatter Fahrbahn ( $\mu$ -Split-Bremsung) ( <i>ISO 14512</i> ) .....	117
6.4.9	Bremsen bei Kurvenfahrt ( <i>ISO 7975</i> ).....	119
6.4.10	J-Turn und Fishhook ( <i>SAE 2003 - 01 - 1008</i> ).....	121
<b>7</b>	<b>Reifen</b> .....	<b>123</b>
7.1	Definition Schlupf.....	123
7.2	Umfangskraft.....	125
7.3	Seitenkraft.....	127
7.4	Wechselwirkung zwischen Umfangskraft und Seitenkraft.....	133
<b>8</b>	<b>Lenkverhalten – Allgemeine Beschreibung</b> .....	<b>138</b>
8.1	Einleitung .....	138
8.2	Nichtlineares Einspurmodell.....	139
8.2.1	Kräfte- und Momentenbilanzen .....	139
8.2.2	Fahrverhalten bei stationärer Fahrt.....	141
8.2.3	Fahrverhalten beim Lastwechsel bei Kurvenfahrt .....	142
8.2.4	Fahrverhalten bei Antriebsschlupf.....	144
8.3	Zweispurmodell (4-Rad-Modell).....	146
8.3.1	Radlasten und Wankwinkel bei stationärer Fahrt.....	146
8.3.2	Fahrverhalten bei stationärer Fahrt .....	149
8.3.3	Giermomentenbilanz und Kräftebilanzen in der x-y-Ebene .....	151
8.4	Kinematik, Elastokinematik und Lenkelastizität.....	152
8.4.1	Vorspur .....	152
8.4.2	Kinematik (Radhubkinematik) .....	154
8.4.3	Elastokinematik.....	157
8.4.4	Lenkelastizität .....	158
8.5	Schlussbemerkung .....	159
<b>9</b>	<b>Einführung in die Funktion der Fahrdynamikregelung</b> .....	<b>161</b>
9.1	Einleitung .....	161
9.2	Zielsetzung.....	162
9.3	Regelungskonzept .....	162
9.4	Sollwertberechnung .....	164
9.4.1	Konzepte.....	164
9.4.2	Parameterbestimmung.....	165
9.4.3	Sollwertbegrenzung .....	166

9.4.4	Einfluss der Modellgüte auf die Regelung.....	167
9.5	Erkennung Fahrzustand.....	167
9.6	Fahrdynamikregler.....	168
9.6.1	Möglichkeiten zur Beeinflussung des Giermoments .....	168
9.6.2	Bremseneingriffe beim Über- und Untersteuern.....	171
9.7	Grenzen der Fahrdynamikregelung .....	171
<b>Anhang .....</b>		<b>173</b>
A1	Formelzeichen und Einheiten.....	173
A2	Fahrzeugdaten.....	176
A3	Übungsaufgaben.....	177
A4	Lösungen .....	179
A5	Datenblatt Feder-Masse-System .....	183
A6	Räumliche Fahrzeugbewegung .....	184
A7	Schätzverfahren für die Giergeschwindigkeit.....	186
A8	Erweitertes Einspurmodell .....	187
<b>Literatur .....</b>		<b>188</b>
<b>Sachverzeichnis .....</b>		<b>190</b>



# 1 Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug-Umwelt

---

Das Fahren eines Fahrzeugs kann als *Regelaufgabe* aufgefasst werden, bei der der Fahrer den „Regler“ und das Fahrzeug die „Strecke“ darstellt. Die Umwelt beinhaltet den Straßenverlauf und die Verkehrssituation. Der Straßenverlauf führt zur „Sollwertvorgabe“ für die Kursregelung, und die Verkehrssituation zwingt den Fahrer zu – meist schnellen – Regelaktivitäten, beispielsweise zur Vermeidung eines Auffahrunfalls.

Will man mittels fahrdynamischer Untersuchungen nicht nur das Fahrzeugverhalten, sondern auch Aspekte der Fahrsicherheit betrachten, so ist es unerlässlich, das Gesamtsystem „Fahrer-Fahrzeug-Umwelt“ aus regelungstechnischer Sicht zu betrachten. Ziel dieses Kapitels ist es, eine kurze Einführung in diesen Themenkreis zu geben.

## 1.1 Fahraufgaben

Bei jeder Fahrt hat der Fahrer grundsätzlich drei Regelaufgaben zu bewältigen. Es handelt sich dabei um

- die *Navigation*,
- die *Längsregelung* und
- die *Kursregelung*.

Bei der *Navigation* muss der Fahrer zunächst festlegen, welchen Streckenverlauf er wählt, um das Ziel zu erreichen. Während der Fahrt ist er gezwungen, vor jeder Kreuzung bzw. vor jedem Straßenteiler zu entscheiden, ob und in welche Richtung er abbiegen muss und welche Fahrspur er dabei zu wählen hat, *Bild 1.1*. Die Entscheidung muss zwischen dem Hinweisschild und der Kreuzung selbst erfolgen, wobei häufig noch ein Teil dieser Zeit für erforderliche Spurwechsel verwendet werden muss. Aus eigener Fahrpraxis weiß jeder Autofahrer, dass gerade im Stadtverkehr oder auf Landstraßen oftmals zu wenig Zeit zur Verfügung steht, um rechtzeitig eine Entscheidung zu treffen. Selbst auf Autobahnen kann es manchmal knapp werden.

Auch wenn es gelingt, rechtzeitig eine Entscheidung zu treffen, so muss sich der Fahrer in diesen Zeitabschnitten primär auf die Navigationsaufgabe konzentrieren, mit der Folge, dass die anderen Regelaufgaben nicht mit der gleichen Aufmerksamkeit verfolgt werden. Navigationssysteme können den Fahrer von diesen Aufgaben entlasten und so einen Beitrag zur Erhöhung der Fahrsicherheit leisten. Voraussetzung ist allerdings, dass die Programmierung nicht während der Fahrt erfolgt und das Bereitstellen von Zusatzinformationen ohne komplizierte Menübedienung ermöglicht wird.

Die zweite Aufgabe, die ein Fahrer zu bewältigen hat, ist die *Längsregelung*. Sie teilt sich auf in *Geschwindigkeitsregelung* und *Abstandsregelung*. Auf verkehrsarmen Straßen ohne vorausfahrende Fahrzeuge kann der Fahrer die Geschwindigkeit frei wählen. Natürlich wird er dabei die Wetter- und Straßenverhältnisse, den Streckenverlauf sowie die vorhandenen Geschwindigkeitsbeschränkungen berücksichtigen. Aus regelungstechnischer Sicht gibt der Fahrer eine *Soll-Geschwindigkeit* vor und versucht diese durch die Stellgrößen Gas, Bremse und Gangwahl (bei einem Fahrzeug mit Schaltgetriebe) einzuregeln.

Diese Regelstrategie muss der Fahrer unterbrechen, sobald er sich einem vorausfahrenden langsameren Fahrzeug annähert. Er ist gezwungen, von Geschwindigkeitsregelung auf Abstandsregelung „umschalten“. Anstelle der Geschwindigkeit wird nun der Abstand zur *Regelgröße*; der Fahrer wird versuchen, auf einen *Soll-Abstand* zu regeln. Sobald sich die Verkehrssituation ändert und wieder „freie Fahrt“ möglich ist, kann er wieder zur Geschwindigkeitsregelung zurückkehren. Es handelt sich also – von den Übergängen abgesehen – um ein mehr oder weniger hartes Umschalten zwischen zwei Regelstrategien und nicht um eine Mehrgrößenregelung.

Abstandsregelsysteme, wie sie seit einiger Zeit auf dem Markt sind, arbeiten mit genau diesen Regelstrategien. Das heißt: Um diese zu aktivieren, muss der Fahrer immer zuerst eine Soll-Geschwindigkeit vorgeben. Der Soll-Abstand wird dann in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit vom System vorgegeben und kann optional noch vom Fahrer leicht modifiziert werden.

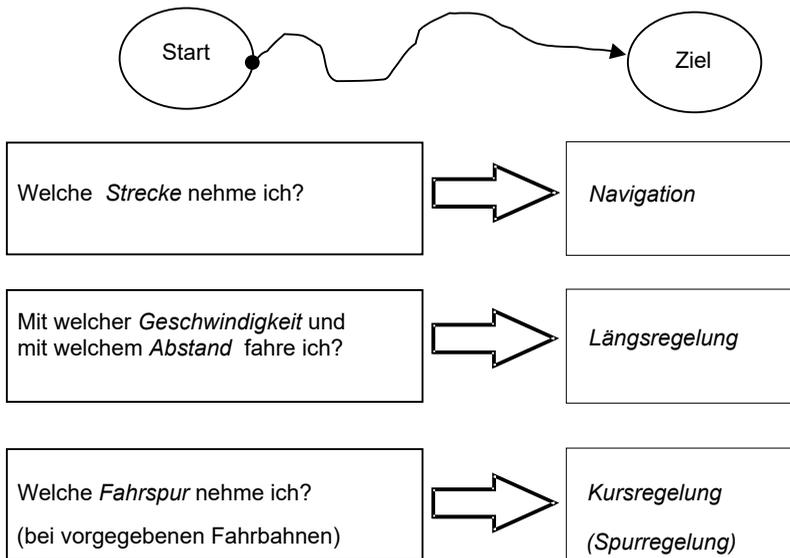


Bild 1.1: Regelaufgaben beim Fahren

Inzwischen sind High-End-Abstandsregelsysteme am Markt verfügbar, welche in der Lage sind, die Längsregelung nahezu komplett zu übernehmen. Dadurch kann sowohl der Fahrer entlastet als auch die Verkehrssicherheit erheblich verbessert werden.

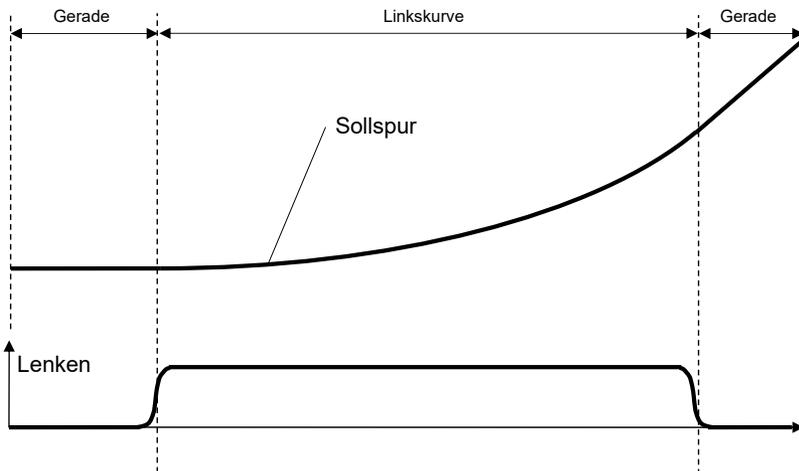
Die dritte Aufgabe besteht für den Fahrer in der *Kursregelung*. Sie wird im folgenden Abschnitt separat behandelt.

## 1.2 Kursregelung

Die Beschreibung der Kursregelung soll sich zunächst auf eine sogenannte „Normalfahrt“ beschränken. Gemeint ist damit eine Fahrt auf einer kurvigen und griffigen Straße, bei der nur kleine bis mittlere Querbeschleunigungen auftreten und das Fahrzeug im linearen Bereich der Querdynamik und noch nicht im Grenzbereich betrieben wird. Außerdem sollen Überholvorgänge und schnelle Ausweichmanöver nicht betrachtet werden.

Unter diesen Randbedingungen besteht die Aufgabe darin, auf einer vorgegebenen Fahrbahn eine *Fahrspur* zu wählen und zu versuchen, diese mit geeigneten Lenkbewegungen einzuregeln.

Diese Regelaufgabe lässt sich am besten mittels einer einfachen Fahrspurvorgabe erläutern: Als *Sollspur* gegeben sei eine Gerade, eine sich anschließende Linkskurve und wieder eine Gerade im Anschluss an die Kurve, *Bild 1.2*.



*Bild 1.2:* Qualitativer Verlauf der Lenkbewegung bei einer antizipatorischen Steuerung

Ein erfahrener Fahrer wird bei dieser Standardaufgabe die vor ihm liegende Kurve richtig einschätzen und aufgrund seiner Erfahrung nicht erst dann, wenn die Kurve beginnt, sondern schon kurz davor das Lenkrad nach links einschlagen und im Idealfall den Lenkwinkel so wählen, dass das Fahrzeug praktisch auf der Sollspur fährt. Am Kurvenende wird er entsprechend mit einem kurzen Vorhalt zurücklenken und damit in die Geradeausfahrt übergehen.

Diese Strategie beinhaltet eine *Vorausschau* und ist im regelungstechnischen Sinne eine *Steuerung*, da keine Rückkopplung und auch kein Abgleich zwischen *Soll-* und *Istspur* vorhanden ist. Sie wird *antizipatorische (vorausschauende) Steuerung* genannt und setzt voraus, dass der Fahrer das Fahrzeug sehr gut kennt und aus Erfahrung weiß, welche Lenkamplituden er wählen muss, um das Fahrzeug auf der gewünschten Spur zu halten.

Natürlich wird es selbst bei dieser einfachen Fahraufgabe nicht möglich sein, damit das Fahrzeug exakt auf der Sollspur zu halten. Zum einen wird auch einem erfahrenen Fahrer nicht immer eine ideale antizipatorische Steuerung gelingen, und zum anderen treten häufig Störungen auf (Querneigung der Fahrbahn, Seitenwind), die zu einer Abweichung vom Sollkurs führen.

Es werden also im realen Fahrbetrieb immer mehr oder weniger große Regelabweichungen auftreten. Diese müssen dann durch eine „klassische“ *Regelung* minimiert werden. Der Fahrer erkennt diese Abweichungen zwischen der Soll- und Istspur und wird versuchen, diese durch geeignete Lenkbewegungen „auszuregulieren“. Diese Strategie wird *kompensatorische Regelung* genannt. Dabei wird der Fahrer – wie bei der antizipatorischen Steuerung – ebenfalls vorausschauend handeln, aber aufgrund seiner *Reaktionszeit* und seiner begrenzten Dynamik in Bezug auf seine Lenkaktivitäten wird sein Übertragungsverhalten *Tot-* und *Verzögerungszeiten* beinhalten.

Diese kompensatorische Regelung kann erheblich beeinträchtigt werden, wenn der Fahrer die Vorausschau nicht mehr einsetzen kann, was beispielsweise bei dichtem Nebel der Fall ist. Unabhängig von der ohnehin vorhandenen Gefahr eines Auffahrunfalls ist der Fahrer gezwungen, seine Geschwindigkeit zu reduzieren, um die Querabweichungen in Grenzen zu halten.

Aber auch bei einer Geradeausfahrt unter Seitenwind kann in der Regel eine Vorausschau nicht eingesetzt werden. Dadurch verursachte Querabweichungen lassen sich zwar über eine kompensatorische Regelung reduzieren, aber während des Ausregelvorgangs sind bestimmte Querabweichungen nicht vermeidbar.

Beide Strategien stellen die Bausteine für ein Fahrermodell dar, welches in der Literatur als *Zwei-Ebenen-Modell* bezeichnet wird und welches auf die Arbeiten von Donges [11] zurückgeht, *Bild 1.3*.

Es enthält zusätzlich den Block *Fahrerrauschen*. Damit sind Lenkbewegungen gemeint, die vom Fahrer unbeabsichtigt aufgebracht werden. Sie entstehen beispielsweise dann, wenn der Fahrer eine Hand vom Lenkrad nimmt, um Schalter zu betätigen, oder auf unebenen Fahrbahnen hervorgerufen durch vertikale Beschleunigungen.

gen. Dieses Fahrerrauschen führt natürlich auch zu kleinen Kursabweichungen, welche wiederum ausgeregelt werden müssen.

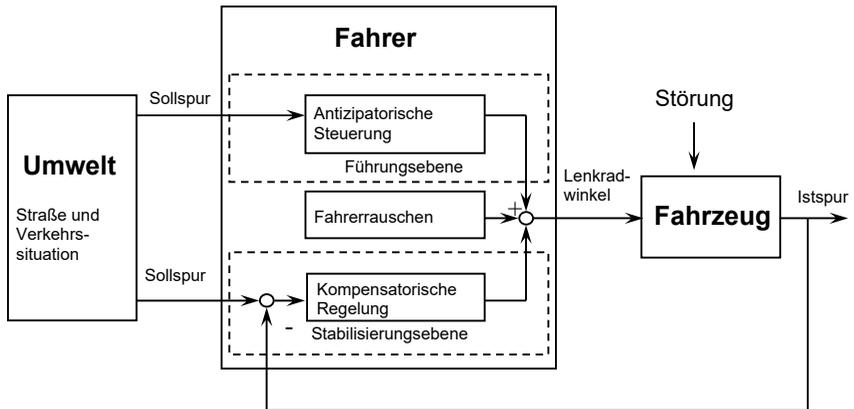


Bild 1.3: Zwei-Ebenen-Modell zur Beschreibung der Kursregelung

Das Zwei-Ebenen-Modell ist insgesamt gut geeignet, das Verhalten eines Fahrers bei der Kursregelung zu beschreiben. Beim *Fahrantänger* erfolgt die Kursregelung primär über die kompensatorische Regelung. Wegen der fehlenden Fahrerfahrung ist die antizipatorische Steuerung noch nicht stark ausgebildet. Beim *erfahrenen Fahrer* erfolgt die Kursregelung überwiegend durch die antizipatorische Steuerung. Die dann noch verbleibenden Spurbabweichungen werden durch die kompensatorische Regelung ausgeregelt.

Man kann zeigen (siehe [2], [1]), dass der Fahrer sehr gut in der Lage ist, im normalen Fahrbetrieb sein Übertragungsverhalten dem Übertragungsverhalten des Fahrzeugs anzupassen, und dadurch seine Regelaufgabe ohne größere Probleme bewältigen kann.

Unter der Voraussetzung, dass das dynamische Verhalten des Fahrzeugs das vom Fahrer erwartete Verhalten aufweist und die Störungen in bestimmten Grenzen bleiben, ist bei normalen Fahrsituationen und bei guten Sichtverhältnissen der gesamte Regelkreis stabil.

Das ist jedoch nicht mehr gegeben, wenn sich die dynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs plötzlich und für den Fahrer unerwartet ändern, was oft im Grenzbereich der Fall sein kann. Der Fahrer wird dadurch überrascht und wird in der Regel unangemessen reagieren und so die Kontrolle über das Fahrzeug verlieren. Aber auch Störungen wie Seitenwind oder starke Reibwertschwankungen der Fahrbahn kön-

nen, wenn sie bestimmte Grenzen überschreiten, zum Verlust der Fahrstabilität führen. In solchen Fällen ist ein Fahrer, der das Fahrverhalten seines Fahrzeugs nur bei normalen Fahrsituationen kennt, mit seiner kompensatorischen Regelung überfordert.

### 1.3 Definition Fahrverhalten und Fahrdynamik

Aus regelungstechnischer Sicht gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten, das *Fahrverhalten* zu definieren. Zum einen kann man das Fahrzeug ohne den Regelkreis betrachten und dann das Führungs- und Störungsübertragungsverhalten als Fahrverhalten definieren, wie es beispielsweise in [2] beschrieben wird:

*Das Fahrverhalten eines Kraftfahrzeugs ist die Reaktion des Fahrzeugs auf*

- das Lenken des Fahrers, auf
- das Beschleunigen und Verzögern über Fahr- und Bremspedal

*während der Kurvenfahrt und auf äußere Störungen.*

Oder man betrachtet wie in [1] vorgestellt den gesamten Regelkreis und kommt dann zu folgender Definition:

*Der Begriff Fahrverhalten beinhaltet das Gesamtverhalten des geschlossenen Regelkreises Fahrer- Fahrzeug-Umwelt.*

Beide Definitionen sind notwendig und sinnvoll. Die Erste ist unerlässlich zur objektiven Beschreibung der Fahreigenschaften eines Kraftfahrzeugs. Außerdem bildet sie eine gute Datenbasis, wenn es darum geht, eine Korrelation zwischen objektiven Merkmalen eines Fahrzeugs und subjektiver Beurteilung herzustellen.

Die zweite Definition ist immer dann sinnvoll einzusetzen, wenn der Regelkreis und besonders Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt im Vordergrund stehen. „Wie gut ist ein Fahrzeug in einer kritischen Situation beherrschbar?“ oder „Wie reagiert ein Fahrer, wenn ABS bei einer Notbremsung ausfällt?“ sind Beispiele für entsprechende Fragestellungen.

Häufig wird auch von den Motorzeitschriften und in der Fachliteratur der Begriff *Handling* zur Beschreibung des Fahrverhaltens verwendet. Handling ist ein Überbegriff zur Beschreibung aller querdynamischen Eigenschaften und beinhaltet neben objektiven Merkmalen auch die subjektiven Fahreindrücke. Ein gutes Handling bedeutet,

- dass das Fahrzeug auf die Lenkeingaben des Fahrers spontan und angemessen reagiert,
- dass der Fahrer ohne Mühe und dennoch präzise das Fahrzeug auf einen Kurs regeln kann und

- dass der Fahrer vom Fahrzeug eine gute Rückmeldung erhält und es auch Spaß bereitet, das Fahrzeug auf einer kurvenreichen Strecke zu bewegen.

Im Zusammenhang mit dem Fahrverhalten und dem Handling eines Fahrzeugs wird auch oft der Begriff *Fahrdynamik* verwendet. Man kann ihn wie folgt definieren:

*Fahrdynamik ist die analytische und experimentelle*

- *Beschreibung,*
- *Analyse,*
- *Optimierung und*
- *Bewertung*

*des Fahrverhaltens vorwiegend mittels systemdynamischer und regelungstechnischer Methoden.*

In den Motorzeitschriften wird darüber hinaus Fahrdynamik etwas weiter gefasst und im Zusammenhang mit Fahrfreude, Fahrerlebnis und Fahrleistung genannt.

## **1.4 Definition aktive Sicherheit**

*Aktive Sicherheit* ist ein Begriff, der sich nicht auf eine einzelne Fahrzeugeigenschaft, sondern auf den Straßenverkehr und dort wiederum auf die Vermeidung von Unfällen bezieht. Er ist wie folgt definiert:

*Unter aktiver Sicherheit werden alle Merkmale eines Kraftfahrzeugs verstanden, die dem Fahrer helfen, bei allen Verkehrssituationen Unfälle zu vermeiden.*

Sie wird unterteilt in

- *Fahrsicherheit,*
- *Konditionssicherheit,*
- *Wahrnehmungssicherheit* und
- *Bedienungssicherheit.*

Unter *Fahrsicherheit* versteht man dabei alle Maßnahmen zur Verbesserung der Fahreigenschaften und zur Vermeidung von Fahrfehlern. Die Optimierung des Regelkreises spielt dabei eine wichtige Rolle. Besonders in kritischen Situationen muss ein Fahrzeug für den Fahrer beherrschbar bleiben.

Unter *Konditionssicherheit* versteht man alle Maßnahmen zur Vermeidung bzw. zur Abminderung einer physiologischen Belastung (Ermüdung). Eine wichtige Maßnahme dabei ist sicher die Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums. Aber auch eine komfortorientierte Fahrwerksabstimmung kann beispielsweise dazu beitragen, die

Belastung infolge von Aufbaubeschleunigungen zu reduzieren und dadurch einen Beitrag zur Verbesserung der Konditionssicherheit zu leisten.

Unter *Wahrnehmungssicherheit* versteht man alle Maßnahmen zur Verbesserung der Sicht und des Auffälligkeitsgrades eines Fahrzeugs. Beispielhaft sind hierbei Lackierungen mit Signalfarben bzw. das Fahren bei Tage mit Licht zu nennen.

Unter *Bedienungssicherheit* versteht man alle Maßnahmen zur Verbesserung der Bedienung eines Fahrzeugs. Alle Betätigungselemente wie Pedale, Schalter und Hebel sind so auszulegen, dass sie leicht, schnell und vor allem verwechslungssicher betätigt werden können.

Durch die zunehmende Komplexität von modernen Fahrzeugen mit einer Vielzahl von Funktionen und durch neue Bedien- und Anzeigekonzepte ergeben sich bezüglich der Bediensicherheit sowohl Chancen aber auch Risiken. Die Fülle der Funktionen kann leicht dazu führen, dass die Übersicht verloren geht, die Zeiten mit Blickabwendung zunehmen und es länger dauert, bis einfache Funktionen aktiviert werden.

Dem stehen Verbesserungspotenziale gegenüber, wenn es gelingt, dem Fahrer zunehmend auf *akustischem* und *haptischem* Wege Rückmeldungen zu geben und so die Blickabwendung zu reduzieren. Weiterhin ist denkbar, alle optischen Anzeigen auf das Notwendigste zu beschränken und dabei für die wichtigsten Informationen Head-Up-Displays einzusetzen.