
Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil

Hans-Jürgen Gevatter
Ulrich Grünhaupt
(Hrsg.)

Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil

Fahrzeugelektronik, Fahrzeugmechatronik

2., vollständig bearbeitete Auflage
mit 330 Abbildungen

 Springer

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Gevatter
Rummerweg 11
69121 Heidelberg

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Grünhaupt
Hochschule Karlsruhe–Technik und Wirtschaft
FB Mechatronik und Naturwissenschaften
Moltkestr. 30
76133 Karlsruhe
ulrich.gruenhaupt@hs-karlsruhe.de

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

ISBN 10 3-540-21205-1 Berlin Heidelberg New York
ISBN 13 978-3-540-21205-8 Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch be- rechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jeder- mann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Anzeigen: Renate Birkenstock, renate.birkenstock@springer-sbm.com, Springer-Verlag GmbH,
Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Tel.: +49 30/82787-5732, Fax -5300, springeronline.com/wikom

Umschlaggestaltung: medionet AG, Berlin
Satz: medionet AG, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem Papier 68/3020/M - 5 4 3 2 1 0

Vorwort

Dieses Handbuch soll dem Leser helfen, sich über das anspruchsvolle Thema der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil (d.h. Fahrzeugelektronik und Fahrzeugmechatronik) zu informieren.

Wir legen hiermit die 2. Auflage des seinerzeit erschienenen „Handbuchs der Mess- und Automatisierungstechnik“ vor. Die 1. Auflage behandelte das Grundthema der Mess- und Automatisierungstechnik in der Breite der technologischen Möglichkeiten und gab allen interessierten Lesern umfangreiche Hinweise für die theoretische und praktische Handhabung.

Die 2. Auflage wurde völlig neu überarbeitet und gliedert sich in die zwei Teile „Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil“ und „Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion“.

Das Automobil-Handbuch befasst sich anwendungsorientiert mit den wesentlichen Aspekten des komplexen und anspruchsvollen Themas des Automobils als Mensch-Maschine-System. Daher beschreibt der erste Teil dieses grundlegende Thema.

Es folgt der Teil über die Sensoren, ohne die heute eine betriebs sichere und fahrerfreundliche Führung eines Automobils nicht mehr denkbar ist. Die vom Fahrer und von den Sensoren weitergegebenen Signale werden in der elektronischen und hydraulischen Signalverarbeitung behandelt. Danach folgt die Umsetzung der Stellbefehle durch die elektromechanischen, elektronischen und hydraulischen Aktoren. Daher werden in den weiteren Teilen die grundlegenden Bauelemente zur Umsetzung dieser Signale für die Gewährung der Fahrsicherheit und der Benutzerfreundlichkeit beschrieben.

Mehrere Kapitel befassen sich mit Zukunftsaspekten der Signalverarbeitung im Automobil. Mikrosystemtechnisch hergestellte Bauelemente einerseits und komplexe Bus-Systeme andererseits werden angesprochen.

Alle Kapitel sind mit einem ausführlichen Literaturverzeichnis ausgestattet, das dem Leser den Weg zu weiterführenden Detailinformationen aufzeigt.

Dieses Buch wendet sich an alle Interessenten des umfangreichen Themas der Automobiltechnik: Kfz-Mechaniker, technische Vertriebsingenieure, Projekt- und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie, Forschende, Lehrende und Studierende dieses Fachgebietes und nicht zuletzt technisch nachfragende Benutzer eines Automobils.

Die Herausgeber danken allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Springer-Verlages und der medionet AG für die sorgfältige Mitwirkung. Insbesondere danken wir den Autoren für ihre kompetenten Beiträge zur Darstellung dieses Buches.

Verbesserungsvorschläge und Anregungen für eine eventuell folgende 3. Auflage nehmen wir mit Interesse entgegen.

Berlin, im Juni 2005

Hans-Jürgen Gevatter,
Ulrich Grünhaupt

Autoren

Dr. HEINZ-BERNHARD ABEL
Siemens VDO Automotive AG
64832 Babenhausen

Dr.-Ing. CHRISTIAN BAIER-WELT
64372 Ober-Ramstadt

Prof. Dr.-Ing. habil.
HELMUT BEIKIRCH
Universität Rostock

Dr.-Ing. HEINRICH-JOCHEN BLUME
Siemens-VDO Automotive AG
64832 Babenhausen

Dr.-Ing. SABINE BOLLER
IAV, GmbH, 38518 Gifhorn

Prof. Dr.-Ing. GEORG FREY
Universität Kaiserslautern

Dr. DIETER KRAFT
Bosch GmbH, 71701 Schwieberdingen

Dr. WIKHART LÖHR
IAV GmbH, 80807 München

Prof. Dr.-Ing. HENNING J. MEYER
TU Berlin

Dipl.-Ing. OLIVER PREDELLI
IAV GmbH, 38518 Gifhorn

Dr.-Ing. FRIEDRICH PRINZHAUSEN
73732 Esslingen

Prof. Dr. rer.tech. MICHAEL REISCH
FH Kempten

Dr.-Ing. HELMUT RIEDEL
Audi Electronics Venture GmbH
85080 Gaimersheim

Dr.-Ing. PETER RIETH
Conti Teves AG, 60488 Frankfurt

LUDWIG SCHICK
91091 Grossenseebach

Prof. Dr.-Ing. HELMUT SCHLAAK
TU Darmstadt

Dr.-Ing. HANS-PETER SCHÖNER
Daimler Chrysler Research and
Technology
71059 Sindelfingen

Dr. RALF SCHWARZ
Conti Teves AG
60488 Frankfurt

Prof. Dr.rer.nat.habil.
KLAUS-PETER TIMPE
TU Berlin

Prof. Dr.-Ing. JÜRGEN WILDE
Universität Freiburg

KLAUS SKABROND
Siemens-VDO Automotive AG
65824 Schwalbach

Inhaltverzeichnis

A	Begriffe, Benennungen, Definitionen	1
1	Mensch-Maschine-Interaktion bei der Fahrzeugführung	3
1.1	Das System Fahrer-Fahrzeug	3
1.2	Schwerpunkte der Fahrer-Fahrzeug-Interaktionsgestaltung	5
1.2.1	Informationsdarbietung	5
1.2.2	Fahrerassistenzsysteme	6
1.3	Entwicklungstendenzen	7
	Literatur	7
2	Mechatronik	9
2.1	Mechatronik im Automobil	9
2.2	Funktionale und Lokale Integration	11
2.3	Beherrschung der System-Komplexität	14
2.4	Beispiele für Mechatronische Systeme im Fahrzeug	15
2.4.1	Fahrwerks- und Fahrassistenz-Systeme	15
2.4.2	Mechatronische Systeme im Triebstrang	17
2.4.3	Komfort- und Sicherheitssysteme im Innenraum	19
	Literatur	20
3	Regeln und Steuern	23
3.1	Einleitung	23
3.2	Regeln	24
3.2.1	Definition und Grundstruktur	24
3.2.2	Entwurf von Reglern	25
3.2.3	Anforderungen an Regelkreise	26
3.2.4	Der lineare Standardregelkreis	26
3.2.5	Lineare Regler	28
3.2.6	Nichtlineare Regler	30
3.3	Steuern	31
3.3.1	Definition und Grundstruktur	31
3.3.2	Verknüpfungssteuerungen	32
3.3.3	Ablaufsteuerungen	33
3.3.4	Vergleich der Steuerungsarten	35
	Literatur	36
4	Hilfsenergiequellen	37
4.1	Elektrische Hilfsenergie	37

4.2	Hydraulische Hilfsenergie	39
4.3	Pneumatische Hilfsenergie	39
5	Gebiete der Automatisierungstechnik im Automobil	41
5.1	Triebstrang	41
5.2	Fahrwerk und Fahrassistenz	45
5.3	Innenraum	47
6	Umgebungsbedingungen und Einbauorte	49
6.1	Qualität und Serienanforderung	49
6.2	Einbauorte	49
6.2	Abnahmetests	50
B	Sensoren	53
1	Kraft, Drehmoment	55
	Literatur	56
2	Drucksensoren	57
	Literatur	62
3	Weg, Winkel, Position	63
	Literatur	69
4	Geschwindigkeit	71
	Literatur	73
5	Beschleunigung	75
	Literatur	76
6	Temperatur	77
	Literatur	80
7	Gassensorik	81
	Literatur	85
8	Betriebsstoffsensorik	87
	Literatur	88
9	GPS	91
10	Optische Sensorik	93
	Literatur	97
11	Antennen	99
	Literatur	104

C	Bauelemente für die Signalverarbeitung mit elektrischer und nichtelektrischer Hilfsenergie	105
1	Elektrische Hilfsenergie	107
1.1	Bipolartransistoren	107
1.2	MOS-Feldeffekttransistoren	111
1.3	Operationsverstärker (OPV)	112
1.3.1	Grundsaltungen mit OPV	113
1.4	Optoelektronische Bauelemente	115
1.4.1	Lichttechnische Grundbegriffe	115
1.4.2	Passive optische Bauelemente	117
1.4.3	Strahlungssender	123
1.4.4	Strahlungsempfänger	124
1.5	Digitale Schaltungen	125
1.5.1	Grundlegende Betrachtungen	125
1.5.2	Schaltkreisfamilien und Schaltkreistechnologien	127
1.5.3	Funktionen digitaler Bauelemente	134
1.5.4	Anwendungsspezifische Schaltungen (ASIC)	142
1.6	Analog-Digital-Umsetzer	145
1.7	Digital-Analog-Umsetzer	152
1.8	Aufbau- und Verbindungstechnik	155
1.8.1	Aufgaben der AVT	155
1.8.2	Packungsebenen der AVT	156
1.8.3	Baugruppenteknik	158
1.8.4	Hybride und Module	164
1.8.5	Entwurf zuverlässiger AVT	176
1.9	Kamerasysteme im Automobil	185
1.9.1	Das sehende Fahrzeug	185
1.9.2	Anforderungen an fahrzeugtaugliche Kameras	187
1.9.3	Fahrerassistenz „Lane Departure Warning“ LDW	190
1.9.4	Fahrerassistenz „Night Vision“	194
1.9.5	Die dritte Dimension: 3D-Kameras	200
	Literatur	202
2	Nichtelektrische Hilfsenergie	207
2.1	Hydraulische Signal- und Leistungsverstärker	207
2.2	Elektro-hydraulische Umformer	208
2.2.1	Elektromechanische Wandler	209
	Literatur	216
D	Aktoren für mechanische Verstellung	219
1	Aktoren mit elektrischer Hilfsenergie	221
1.1	Begriffsdefinition	221
1.2	Einleitung	221
1.3	Allgemeine Beschreibung elektrischer Stellantriebe	223
1.3.1	Hauptgrößen	223

1.3.2	Störgrößen und Umgebungsbedingungen	224
1.4	Auslegung von Stellantrieben unter Fahrzeugbedingungen	225
1.4.1	Vorwiderstand	225
1.4.2	Bordnetzspannung	225
1.4.3	Leistungsgrenzen im Bordnetz	226
1.5	Aktoren	228
1.5.1	Elektromotorische Stellantriebe	228
1.5.2	Getriebe	234
1.5.3	Elektromagnete	237
1.5.4	Piezo-Direktantriebe	239
1.6	Ansteuer- und Steuerelektronik	241
1.6.1	Funktionsstrukturen	241
1.6.2	Leistungsteil	243
1.6.3	Signalverarbeitung und Steuerung	246
	Literatur	248
2	Aktoren mit hydraulischer Hilfsenergie	249
2.1	Aktoren mit hydraulischer Hilfsenergie für stetige Bewegungen	249
2.1.1	Axialkolbenmaschinen	250
2.1.2	Radialkolbenmaschinen	252
2.1.3	Zahnradmaschinen	253
2.1.4	Flügelzellenmaschinen	254
2.1.5	Sperr- und Rollflügelmaschinen	254
2.2	Aktoren mit hydraulischer Hilfsenergie für absätzig Bewegungen	255
2.2.1	Einfachwirkende Zylinder	255
2.2.2	Doppeltwirkende Zylinder	257
2.2.3	Schwenkmotoren	258
	Literatur	258
E	Leistungsübertragung und -steuerung	259
1	Elektrische Kontakte	261
1.1	Ruhender Kontakt	261
1.1.1	Elastische Kontaktverformung	263
1.1.2	Realer Kontakt mit plastischer Verformung	263
1.1.3	Fremdschichten	265
1.1.4	Kontakterwärmung	266
1.2	Schaltender Kontakt	268
1.2.1	Schaltlichtbogen	268
1.2.2	Schalten unter Last	269
1.2.3	Materialwanderung	271
1.3	Kontaktwerkstoffe	272
1.3.1	Metalle	273
1.3.2	Legierungen	273
1.3.3	Verbundwerkstoffe	274
	Literatur	277

2	Elektromechanische Relais	279
2.1	Einsatzbereiche und Relaisstypen	280
2.2	Elektromagnetischer Relaisantrieb	282
2.2.1	Neutrale monostabile Relais (Typ 1)	283
2.2.2	Neutrale monostabile Relais (Typ 2)	285
2.2.3	Remanenzrelais (Typ 3)	286
2.2.4	Gepolte bistabile Relais (Typ 4)	286
2.2.5	Gepolte monostabile Relais (Typ 5)	287
2.3	Schaltvorgänge von Relais	287
2.4	Relaisausführungen	289
2.4.1	Telekom-Relais	291
2.4.2	Netzrelais	292
2.4.3	Kraftfahrzeugrelais	293
2.4.4	Anschlussausführungen	295
	Literatur	296
3	Mikromechanische Relais	297
3.1	Schaltverhalten bei kleinen Kontaktkräften	297
3.2	Spannungsfestigkeit	299
3.3	Konzepte für Mikroantriebe	300
3.3.1	Elektromagnetischer Antrieb	302
3.3.2	Elektrostatistischer Antrieb	303
3.3.3	Piezoelektrischer Antrieb	303
3.3.4	Thermomechanischer Antrieb	304
3.4	Technologische Realisierungen von Mikrorelais	304
3.4.1	Elektromagnetisches Mikrorelais	305
3.4.2	Elektrostatische Mikrorelais	306
3.5	Hochfrequenzschalter (RF MEMS)	310
	Literatur	311
4	Halbleiter-Relais	315
4.1	Elektronische Schalter	317
4.2	Halbleiter-Relais mit galvanischer Trennung	320
4.3	Elektronische Lastrelais für Wechselstrom	322
	Literatur	323
5	Leistungselektronische Bauelemente	325
5.1	Grundlagen der Leistungselektronik	325
5.1.1	Aufgaben und Einsatzgebiete der Leistungselektronik	325
5.1.2	Schalt- und Kommutierungsvorgänge	327
5.1.3	Leistungselektronische Grundsaltungen	329
5.2	Bauelemente der Leistungselektronik	332
5.2.1	Einteilung leistungselektronischer Bauelemente	332
5.2.2	Leistungshalbleiter	332
5.2.3	Smart-Power-Schaltungen	344
	Literatur	348

F	Hilfsenergiequellen	351
1	Elektrische Hilfsenergiequellen	353
	Literatur	357
2	Pneumatische Hilfsenergiequellen	359
	Literatur	360
3	Hydraulische Hilfsenergiequellen	361
	Literatur	364
G	Anzeigeegeräte und Bedienelemente	365
1	Einleitung, Sehen und Bedienen	367
1.1	Zentrale Anzeigeegeräte, Primäranzeigen	367
1.2	Sekundäre Anzeigeegeräte, Sekundäranzeigen	367
1.3	Eingabelemente für den Fahrer	368
2	Anzeigeegeräte	369
2.1	Analoge Anzeigeegeräte	369
2.1.1	Antriebe	369
2.2	Digitale Anzeigeegeräte	375
2.2.1	Liquid-Crystal-Display (LCD)	377
2.2.2	Vakuum-Fluoreszenz-Display (VFD)	384
2.2.3	Organic Light Emitting Diodes (OLED)	384
2.2.4	Ausblick	385
3	Integration der Anzeigeegeräte ins Fahrzeug	387
3.1	Einzel-Instrumente	387
3.2	Kombinations-Instrumente	387
3.3	Hybrid-Instrumente	388
3.4	Frei konfigurierbares Kombinations-Instrument	388
3.5	Head-up-Display (HUD)	389
4	Bedienelemente	391
4.1	Ergonomie und kurzer Rückblick	391
4.2	Einzelne Stellelemente im Umfeld des Kombinations- Instrumentes	392
4.3	Automobile Schaltertechnik	393
4.4	Zentrale Bedienkonzepte	393
H	Anwendungsbeispiele	397
1	Triebstrang	399
1.1.	Elektronische Motorkontrolle	399
1.1.1	Komponenten und Funktionen	399
1.1.2	Funktionsebenen innerhalb des Steuergerätes	404
1.1.3	Bedatung	405
1.2	Tiptronic	406

1.3	Nebenaggregate	410
1.4	Abgas	412
1.5	Kühlwasser-Temperaturregelung	416
1.6	Valvetronic	419
1.7	Wartungsanzeigen	424
	Literatur	425
2	Fahrzeugbewegung	427
2.1	Systemvernetzung im Fahrwerk	427
2.1.1	Einleitung	427
2.1.2	Systeme im vernetzten Fahrwerk	428
2.1.3	Global Chassis Control	441
2.1.4	GCC „Spin Offs“ – Ausgewählte Beispiele zum Aufzeigen des Funktionspotenzials durch Systemvernetzung	449
2.1.5	Ausblick	451
2.2	Federung	453
2.3	Reifendruck-Kontrolle	462
2.4	Geschwindigkeits- und Distanzregelung	464
2.5	Dynamische Stabilitäts-, Brems- und Traktionskontrolle	470
2.6	Servolenkung	472
	Literatur	477
3	Innenraum	481
3.1	Innenraum-Klimaregelung	481
3.2	Navigationssysteme	485
3.3	Zündschlüssel mit Funkfernbedienung	490
3.4	Airbagsystem	492
3.5	Sitzgurtstraffer	497
3.6	Parkdistanzkontrolle	498
3.7	Front- und Heckscheibenheizung	500
3.8	Verkehrsnachrichtenempfang	501
3.9	Zentral-Steuergerät	502
	Literatur	504
J	Vernetzte Systeme im Automobil – Kommunikationsnetz und Datenverarbeitung	507
1	Anforderungen	509
2	Elektronische Steuergeräte	511
2.1	Eingangsschaltung	511
2.2	Logikteil zur Signalverarbeitung	512
2.3	Ausgangsschaltung mit Stell- und Regelgrößen	513
3	Architektur	515
	Literatur	515
4	CARTRONIC®	517
4.1	Vernetzte Teilsysteme	517

4.2	Beispiele für vernetzte Teilsysteme im Fahrzeug	517
4.3	Neue Anforderungen	518
4.4	Das Konzept	518
4.5	Strukturierung und Architektur	519
4.6	Regeln der Funktionsarchitektur	520
4.7	Anforderungsanalyse	520
4.8	Strukturierungselemente	521
4.9	Systeme, Teilsysteme und Komponenten	521
4.10	Strukturierungsregeln	522
4.11	Modellierungsregeln	522
4.12	Typische Architekturmerkmale	522
4.13	Der Produktentstehungsprozess	523
4.14	Konsequenzen und Ausblick	524
	Literatur	524
5	Kommunikationsnetze	525
5.1	Multimedia-Vernetzung	526
5.2	Multiplexanwendungen für Karosserie und Innenraum	526
5.3	Echtzeitanwendungen in Antriebstrang und Fahrzeugbewegung	527
6	Controller Area Network (CAN)	529
6.1	Buskonfiguration	529
6.2	Adressierung	530
6.3	Logische Buszustände	530
6.4	Priorisierung	530
6.5	Buszugriff	530
6.6	Botschaftsformat	531
6.7	Data Frame und Remote Frame	532
6.8	Störungserkennung	532
6.9	Störungsbehandlung	533
6.10	Fehlereingrenzung	533
6.11	Implementierung	533
6.12	Standardisierung	533
6.13	Erweiterung auf zeitbestimmte Systeme	534
K	Das Kommunikationssystem FlexRay – ein Überblick	537
	Das Kommunikationssystem FlexRay – ein Überblick	539
	Elektronik und Bussysteme in Kraftfahrzeugen	539
	CAN	541
	Anforderungen an FlexRay als ein zukünftiges Kommunikationssystem	543
	Technische Eigenschaften von FlexRay	545
	Literatur	556
	Allgemeines Abkürzungsverzeichnis	557
	Sachverzeichnis	635

Teil A

Begriffe, Benennungen, Definitionen

- 1 Mensch-Maschine-Interaktion
bei der Fahrzeugführung 3**
- 2 Mechatronik 9**
- 3 Regeln und Steuern 23**
- 4 Hilfsenergiequellen 37**
- 5 Gebiete der Automatisierungstechnik
im Automobil 41**
- 6 Umgebungsbedingungen
und Einbauorte 49**

1 Mensch-Maschine-Interaktion bei der Fahrzeugführung

K.-P. TIMPE

1.1 Das System Fahrer-Fahrzeug

Die heute und in absehbarer Zeit wichtigsten Aufgaben bei der Fahrzeugführung – verstanden als das Führen eines Kraftfahrzeuges von einem Ausgangsort zu einem Zielort – sind in Tabelle 1.1 zusammengestellt. Für die Erfüllung dieser Fahraufgaben stehen dem Fahrzeugführer Informationen über Umweltbedingungen, den Zustand einzelner Fahrzeugkomponenten, die Systemdynamik oder zum Flottenmanagement zur Verfügung. Aber auch die Nutzung von Navigationsdaten (GPS) sowie „Infotainment“ oder Dienstleistungsangeboten, oft in Fahrerinformationssystemen (FIS) integriert, werden für die Bewältigung der Fahraufgaben zunehmend wichtiger.

Vor dem Hintergrund der steigenden Anforderungen an die Sicherheit, die Wirtschaftlichkeit, den Fahrkomfort sowie die Akzeptanz wird die optimumnahe Gestaltung der Interaktionen des Fahrers mit seinem Fahrzeug und der Umgebung entscheidend für die Erfüllung dieser Ziele. Zur differenzierten Analyse, Bewertung und Gestaltung dieser Interaktionen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umgebung hat sich eine abstrahierende Betrachtung auf der Ebene der Informationszirkulation zwischen Fahrer und Fahrzeug bewährt. In noch zulässiger Vereinfachung stellt sich ein solches System wie in Abb. 1.1 skizziert dar.

Ein Fahrer fällt entsprechend seiner Zielstellung, des Fahrauftrages und der wahrgenommenen Rückmeldungen über die Situation, die Umgebung und den Fahrzeugzustand Entscheidungen und „führt“ das Fahrzeug durch seine Lenkeingriffe. Die Güte der Fahrzeugführung resultiert aus der Güte der Abstimmung von Fahrhandlungen mit den technischen Fahrzeugparametern und den situa-

Tabelle 1.1. Aufgaben bei der Fahrzeugführung

Primäraufgaben	Planen und Navigieren (z. B. Auswahl, Ändern oder Eingeben einer Fahrroute) Manövrieren, Führen (z. B. Überholvorgang einleiten) Stabilisieren (z. B. Spur- oder Abstand halten)
Sekundäraufgaben	Kommunizieren (z. B. Telefonieren, Routen erfragen, Hotel bestellen) Überwachen und Bedienen (z. B. Temperatur kontrollieren, Radio einschalten, Klimaanlage regeln usw.) Informationen des Bordcomputers verarbeiten (z. B. Maut-Daten) ...

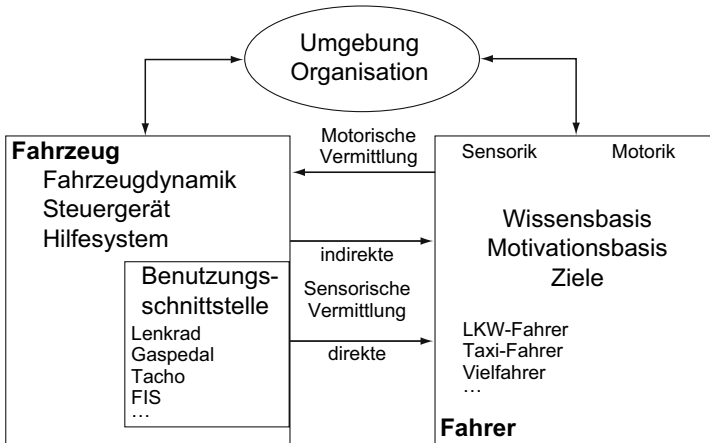


Abb. 1.1. Das System Fahrer-Fahrzeug als Mensch-Maschine-System

tiven Bedingungen. Anliegen der Mensch-Maschine-Betrachtung ist die optimale Auslegung der Wahrnehmungs- und Handlungsbedingungen für die Fahrzeugführung. Dazu zählen neben der anthropometrischen Auslegung des Fahrzeuginnenraums die Gestaltung

- der Bewegungs- und Sichtbedingungen im Fahrzeuginneren und nach außen,
- von Anzeige- und Bedieneinheiten und ihre Anordnung auf dem Armaturenbrett, den Konsolen und im Cockpit allgemein,
- neuer Interaktionsmöglichkeiten wie Steer-by-wire, Sidestick-Steuerung, synthetischer Lenkmomente, o.ä.,
- der Fahrerinformationssysteme und
- eine fahrdynamische Bewertung.

Kriterien für den optimalen Informationsaustausch sind die eindeutige, fehlerfreie und rasche Informationsaufnahme und -interpretation sowie situationsgerechte Ausführung von Fahrhandlungen. Mit Hilfe sog. Mock-ups bzw. „Sitzkisten“ oder Fahrzeugsimulatoren werden im Produktentwicklungsprozess unterschiedliche Cockpitentwürfe bzw. Teilkomponenten u.a. getestet und gegebenenfalls iterativ verbessert. Darüber hinaus wird es mit solchen Simulationen bereits in den frühen Entwicklungsphasen möglich, Bewertungen aus Kundensicht zu erhalten. Valide subjektive Aussagen zur Attraktivität und Akzeptanz der untersuchten Fahrzeugkomponenten, zum Fahrgefühl u.ä. bilden heute unabdingbare Ergänzungen für die Bewertung technischer Systemlösungen.

1.2 Schwerpunkte der Fahrer-Fahrzeug-Interaktionsgestaltung

1.2.1 Informationsdarbietung

Charakteristisch für die Fahrzeugführung ist die hohe Automatisierung der motorischen Reaktionen eines Fahrers. Diese in den sog. Ebenenmodellen als fertigkeitstypisch beschriebene Koordinationsleistung zwischen Wahrnehmung (Informationsaufnahme, z.B. charakterisiert durch Augenbewegungen) und Motorik (z.B. charakterisiert durch Hand- oder Armbewegungen) setzt eine den Leistungsvoraussetzungen des Fahrers angepasste Übertragung und Darbietung der Information im Cockpit voraus. Dazu ist es erforderlich, die anforderungsgerechte Anordnung, Bemaßung, Auswahl und Kompatibilität der Anzeigen und Bedienelemente zu sichern sowie bei der Kodierung der Information (z.B. bzgl. Modalität, Form, Farbe oder Größe der Anzeigen bzw. Bedieneinheiten) die Gesetzmäßigkeiten der menschlichen Wahrnehmung und Motorik zu beachten, um hohe Bediensicherheit und auch hohen Bedienkomfort zu erreichen. Für die Anliegen der Fahrzeugführung hinsichtlich der Gestaltung von Einzelkomponenten und ihrer Integration im Cockpit sind diese klassisch-ergonomischen Fragestellungen ingenieurmäßig gut aufbereitet und häufig in Normen und Empfehlungen standardisiert.

Der gegenwärtig eingeschlagene Weg, verstärkt Kombinationsanzeigen oder multifunktionale Bedienelemente (z.B. Dreh-Drücksteller) einzusetzen, wirft neben ihrer Akzeptanz jedoch weiterführende Fragestellungen auf [1.3, 1.4], deren Lösung im Vordergrund neuer Fahrzeugentwicklungen steht. Dazu zählen die Festlegung von Tiefe vs. Breite der Menüstrukturen, die Auswahl, Gestaltung und räumliche Anordnung neuer Anzeigeformen (z.B. Head-up-Displays, Gestenerkennung, frei konfigurierbare Displays), die Vermeidung einer Informationsüberflutung beim Einsatz von Fahrerinformationssystemen, die Erhaltung der Aufmerksamkeit des Fahrers, die Entwicklung von Signalisations- und Warnstrategien zur Vermeidung kritischer Fahrzustände (z.B. des „Sekundenschlafs“), die Beachtung von Grenzen der sensorischen Unterscheidbarkeit der beanspruchten Wahrnehmungskanäle u. a. m. Vor allem die Allgemeine Psychologie und Wahrnehmungspsychologie stellen neben einem umfangreichen Methodeninventar zur wissenschaftlichen Bearbeitung dieser Sachverhalte umfangreiches und gesichertes Wissen für die Bearbeitung derartiger Fragestellungen zur Verfügung [1.5].

Eine vielversprechende Möglichkeit, den Sicherheitsbeeinträchtigungen durch die zunehmende Informationsmenge zu begegnen, besteht im multimodalen/-medialen Informationsaustausch. So kann die ablenkende Wirkung visueller Anzeigen nicht nur durch Verzicht auf entsprechende Instrumentierung verringert werden, sondern auch durch die Nutzung anderer Informationskanäle. Um die visuelle Ablenkung einzuschränken, werden daher auch zunehmend akustische Ein- und Ausgaben sowie Multifunktionsdisplays mit in die Kommunikation einbezogen. Auch der kinästhetische und der haptische Kanal werden gegenwärtig auf ihre Eignung für die Verbesserung des Fahrverhaltens beim Einsatz neuer Fahrzeugkomponenten von vielen Herstellern bzgl. ihrer Vor- und Nachteile getestet.

Eng verknüpft mit diesem Gegenstandsbereich sind systemtechnische Gestaltungslösungen im Kontext der Integration von Assistenzsystemen im Fahrzeug.

1.2.2

Fahrerassistenzsysteme

Um die genannten Ziele der Fahrzeugführung bei der Erfüllung der Fahraufgabe zu erreichen, wurden und werden zahlreiche Unterstützungs- bzw. Assistenzsysteme für beide Typen der genannten Fahraufgaben entwickelt. Daten- bzw. Situationserfassung und -bewertung, Fahrerzustandserfassung, Bestimmung der zielführenden Sollwerte, deren Vergleich mit den Handlungen sowie Informationen über Abweichungen und Auslösung von Korrekturen kennzeichnen potentielle Leistungsbereiche heutiger Assistenzsysteme. Wissen über Nutzer, zu erfüllende Aufgaben und die aktuelle Situation müssen häufig in diesen Systemen implementiert werden. Tabelle 1.2 zeigt Beispiele heutiger und in Entwicklung befindlicher Assistenzsysteme, die sowohl die Wahrnehmungsprozesse als auch die kognitiven Prozesse bei der Fahrzeugführung unterstützen.

Von herausragender Bedeutung sind Informations- und Kommunikationssysteme, die der Erfassung, Interpretation und Übermittlung der Fahrumgebung (z.B. durch bildverarbeitende Sensorik, aber auch Enhanced Night Vision) und Fahrzeugzustände dienen. Im Rahmen einer umfangreichen Analyse [1.1] wurden 20 Gruppen derartiger Systeme festgestellt, weitere Innovationen sind zu erwarten. Diese reichen von autonomen Fahrzeugen über Müdigkeitswarner bis hin zum Verkehrsmanagement. Mit dieser Vielzahl neuer Systeme hat sich eine neue Qualität in der Fahrzeugführung entwickelt, deren Nutzung für einen Sicherheitsgewinn eine zusätzliche Ablenkung des Fahrers ausschließen muss.

Vor dem Hintergrund dieser Situation und den zukünftig zu erwartenden weiteren Telematiksystemen sowie einer Vernetzung der Fahrzeuge untereinander ist es wichtig, die Bewertung der Interaktionen Fahrer-Fahrzeug-Umgebung und die Gestaltung des Informationsaustausches zwischen diesen Systemen mit den Erkenntnissen über humanwissenschaftliche Interaktion und Kommunikation zu verknüpfen. Es wird zunehmend wichtiger zu sichern, dass die ursprünglichen Ziele bei der Einführung von Fahrerassistenzsystemen – wie Erhöhung der Fahrersicherheit, Kompensation von Fahrfehlern, Vermittlung zusätzlicher Fahrerinformation usw. – weiterhin zentrales Anliegen für die Bestgestaltung der Fahrzeugführung bleiben. Dabei ist auf Grund gegenwärtig geltender juristischer Festle-

Tabelle 1.2. Systeme zur Unterstützung verschiedener Fahraufgaben

Fahraufgabe	Assistenzsystem (Beispiele)
Navigieren	DMRG, RDS-TMC
Führen	ACC, CC, HC, ANB; LDW, SWA, Nachtsicht
Stabilisieren	ABS, ESP, DSC

(Abkürzungen: DMRG: Dual Mode Route Guidance; RDS-TMC: Radio Data System-Traffic Message Channel; ACC: Active Cruise Control; HC: Heading Control; ABS: Anti Blocking System; DSC: Dynamic Stability Control; ESP: Elektronisches Stabilitätsprogramm; ANB Automatische Notbremse; LDW: Lane Departure Warning; SWA: Spurwechselassistent)

gungen zu gewährleisten, dass der Fahrer immer in der Verantwortung für die Fahrzeugführung bleibt, also auch ein Assistenzsystem situationsabhängig übersteuern kann.

Die Entwicklungskriterien für Assistenzsysteme gleichen den bereits für Teilkomponenten aufgeführten Kriterien. Hinzu kommen jedoch solche komplexen Ziele wie rasche Erlernbarkeit, Systemtransparenz oder hohe Erwartungskonformität, um in jeder Situation die Gebrauchssicherheit des Fahrzeuges in seiner Umgebung zu gewährleisten und zu erhalten. Überlagert werden diese Ziele u. a. von den Markterfordernissen, der Markenphilosophie und den Fahrerwünschen, da die neue Technik natürlich nicht am Kunden vorbei entwickelt werden darf.

1.3 Entwicklungstendenzen

Insgesamt ist der Bereich Fahrzeugführung von einer großen Dynamik und einem hohen Entwicklungstempo in Forschung, Entwicklung und Fertigung gekennzeichnet. In ferner Zukunft erwartet man, die Daten aller Sensoren zu einem dynamischen Zustandsbild für die anforderungsgerechte Darstellung der Fahrsituation im Cockpit verschmelzen zu können. Rechnerunterstützte Entwicklungstools, vibroakustische oder Voll-Simulationssysteme und die Erarbeitung immer validerer Fahrermodelle ermöglichen durch effektiven Systemvergleich, dass die humanwissenschaftlichen Erkenntnisse und gegebenenfalls kulturabhängigen Nutzeranforderungen zur fahrerspezifischen Informationsverarbeitung konstruktiv und intensiv für die angestrebte Optimierung der Mensch-Maschine-Interaktion bei der Fahrzeugführung genutzt werden können. Visionäre Zielstellungen wie Fahrertypenerkennung, individuelle oder intuitive Bedienkonzepte, Intentionserfassung u. a. sind ohne weitreichende Berücksichtigung humanwissenschaftlicher, speziell psychologischer Grundlagen nicht realisierbar. Vor allem die Einbeziehung von Persönlichkeitsmerkmalen bei der Fahrzeugführung wird für lange Zeit eine Herausforderung für die technische Fahrzeugentwicklung bleiben.

Die heute in allen großen Unternehmen etablierten Labors zur Mensch-Maschine-Systemgestaltung, entsprechende Abteilungen in der Hochschullandschaft und in Ingenieurbüros, arbeiten mit großem Mitteleinsatz an den hier umrissenen und vielen weiteren Themen. Dies geschieht zumeist in interdisziplinären Teams, um die disziplinären Erfahrungen als zielführende Synergien zu nutzen, da eine rein technologiegetriebene Fahrzeugentwicklung in ein Dilemma führen würde. Unabhängig von der Automatisierungsstufe muss es das Ziel der Fahrzeugentwicklung bleiben, die technologischen Weiterentwicklungen hin zum attraktiven, akzeptierten und „vorausschauenden Auto“ so mit den Fahrereigenschaften abzustimmen, das unfallfreies Fahren eines Tages keine Traum mehr ist.

Literatur

Zu den hier dargestellten Themen liegt ein sehr umfangreiches Schrifttum vor, das aus Platzgründen nicht angeführt werden konnte. Der Text stützt sich auf folgende Darstellungen mit zahlreichen Einzelbeiträgen zu den benannten Themen.

- 1.1 Färber B, Färber B (1999) Telematik-Systeme und Verkehrssicherheit. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft 104. Wirtschaftsverlag NW
- 1.2 Jürgensohn T, Timpe KP (Hrsg) (2001) Kraftfahrzeugführung. Springer, Berlin, Heidelberg, New York
- 1.3 Marzi R et al. (Hrsg) (2002) Bedienen und Verstehen. In: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22, Band 8. VDI Verlag, Düsseldorf
- 1.4 Willumeit HP, Kolrep H (Hrsg) (1998) Wohin führen Unterstützungssysteme? Entscheidungshilfe und Assistenz in Mensch-Maschine-Systemen. Pro Universitate Verlag, Sinzheim
- 1.5 Zimolong B, Konradt U (Hrsg) (2005) Ingenieurpsychologie. In: Enzyklopädie der Psychologie, Band D/III/2. Hogrefe-Verlag, Göttingen, Bern, Toronto, Seattle

2 Mechatronik

H.-P. SCHÖNER

2.1 Mechatronik im Automobil

In der Automobiltechnik beruhen seit einiger Zeit – und wohl auch für die absehbare Zukunft – die meisten Innovationen u.a. auf dem Einsatz von Elektronik. Damit verbunden ist ein ständiges Wachstum des Elektronik-Anteils der Produktionskosten im Automobil (s. Abb. 2.1). Viele dieser Innovationen sind jedoch weniger reine Elektronik-Funktionen, sondern sie zeichnen sich aus durch Automatisierungs- und Regelungsfunktionen für die mechanischen Komponenten im Kraftfahrzeug. In den drei wesentlichen mechanischen Subsystemen im Fahrzeug, nämlich dem Fahrwerk, dem Triebstrang und dem Kabinenbereich, werden die mechanischen Systeme immer mehr von Elektronik überwacht, gesteuert, geregelt und in Zukunft eventuell sogar mehr oder weniger autonom betrieben. Die anfangs nur zusätzlich eingebrachte Elektronik ist inzwischen auf dem Wege, ein vollständig integrierter Bestandteil des ursprünglich rein mechanischen Systems zu werden [2.1, 2.2].

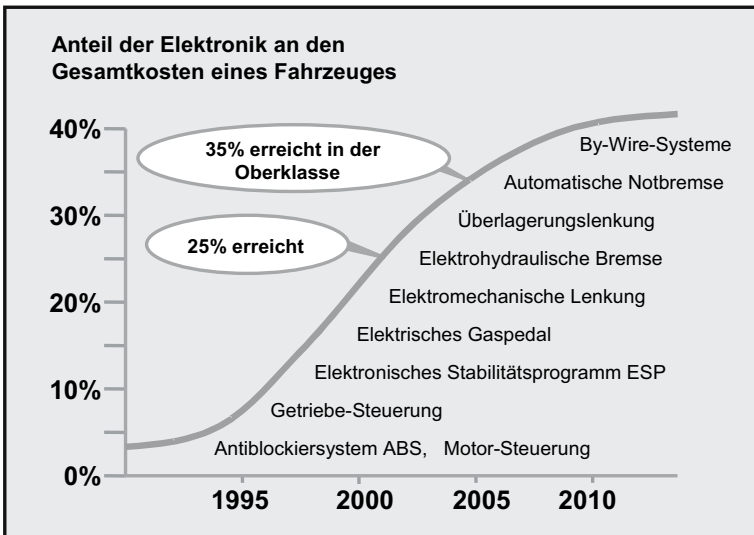


Abb. 2.1. Entwicklung des Anteils der Elektronikkosten an den Gesamtkosten eines Fahrzeuges

Der Begriff *Mechatronik* – zunächst in Japan eingeführt für die Regelung von mechanischen Systemen mit mehreren Freiheitsgraden, bei denen die verkoppelte Dynamik der mechanischen Komponenten die Auslegung der Regelkreise stark beeinflusst – hat sich inzwischen weltweit etabliert für Systeme, die sich allgemein auszeichnen durch eine starke Vernetzung zwischen Mechanik, Elektronik und Informationstechnik [2.3]. Diese Vernetzung äußert sich sowohl im *funktionalen Zusammenwirken* zwischen mechanischen, elektronischen und informationstechnischen Systemteilen, als auch in der *räumlichen Verknüpfung* von Mechanik und Elektronik in der Aufbau- und Verbindungstechnik. Eine weitere zentrale Eigenschaft mechatronischer Systeme ist ihre Komplexität und damit verbunden die Notwendigkeit zur *interdisziplinären Zusammenarbeit* und zur *systematischen Vorgehensweise* beim Entwurf, der Realisierung, Prüfung und Inbetriebnahme der Systeme.

Treibende Kraft für Innovationen sind natürlich in erster Linie funktionale Verbesserungen, welche durch die Einführung von Elektronik realisiert werden sollen. In Fahrzeugen sind hier die Steigerung von Komfort, Sicherheit und Zuverlässigkeit zu nennen, in Verbindung mit Verbesserungen bezüglich Fahreigenschaften, Treibstoffverbrauch, Abgas-Emissionen, aber auch bezüglich Herstellungskosten. Diese Funktionen werden realisiert durch ein komplexes Zusammenwirken von Sensoren und Aktoren mit Informationsverarbeitung.

Wie Runge [2.4] herausstellt, würde die steigende Anzahl von neuen Funktionen mehr und mehr Platz benötigen, wenn sie ohne konzeptionelle Änderungen implementiert würden; dies steht in krassem Widerspruch zu dem immer knapper werdenden Platz, welcher für solche Funktionen aufgrund der vielfältigen Randbedingungen im Fahrzeugdesign zur Verfügung steht (s. Abb. 2.2). Nur durch *mechatronische Integration*, also sowohl durch kompakte Aufbautechnik als auch durch Integration in Mikrosystemen kann die steigende Funktionalität überhaupt im Fahrzeug untergebracht werden.

Neben der räumlichen Beschränkung sind die Kosten eine zweite Randbedingung, welche die Implementierung immer weiterer Funktionen im Fahrzeug begrenzen. Wie in Abb. 2.3 [2.5] dargestellt, macht die Elektronik in einem typischen

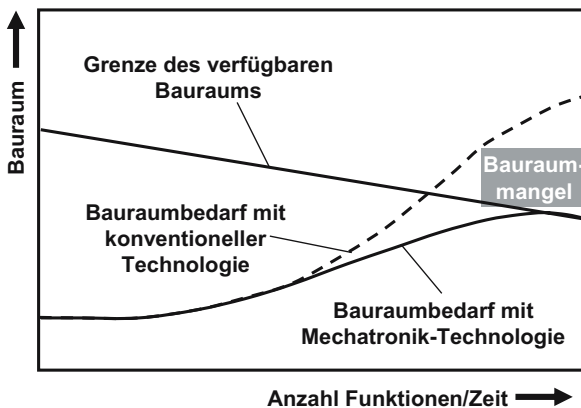


Abb. 2.2. Bauraum-Knappheit als eine wesentliche Triebfeder für die Entwicklung der Mechatronik (nach [2.3], Quelle VW)

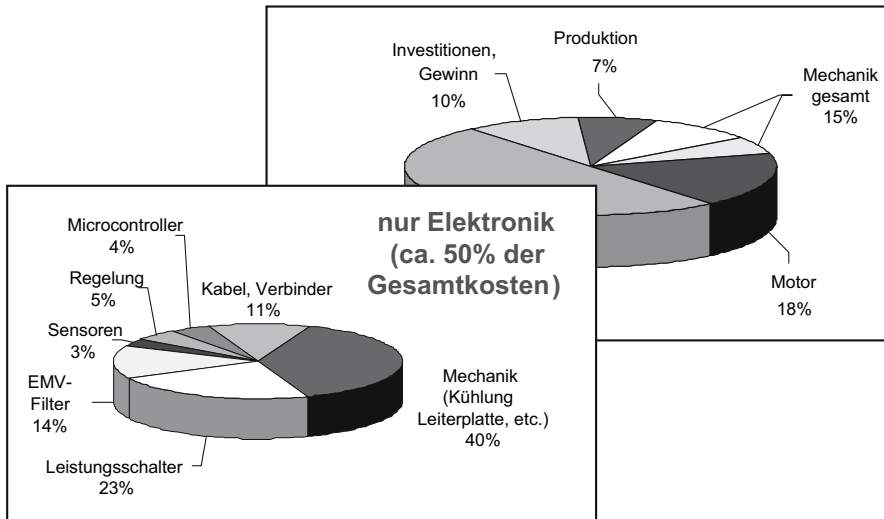


Abb. 2.3. Aufteilung der Gesamtkosten bzw. der Elektronikkosten in einem typischen Kfz-Aktor vor mechatrischer Integration [2.5]

Kfz-Aktor (vor der mechatrischen Integration) etwa 50 % der Gesamtkosten aus. Wenn man diese 50 % genauer betrachtet, stellt man fest, dass ein erheblicher Teil der Elektronik-Kosten durch weitgehend mechanische Komponenten wie Gehäuse, Entwärmung (Kühlung), Platine, Steckverbinder und Kabel verursacht wird. Ein wichtiges Ziel der Kfz-Mechatronik ist, in der Aufbautechnik einen Teil der Kosten durch geschickte Kombination mit mechanischen Teilen einzusparen.

Kfz-Mechatronik – im Sinne von gesamtheitlichem, synergetischen Entwurf des Gesamtsystems – muss also einerseits die Systemkomplexität beherrschbar machen, andererseits aber auch durch Integration Platz und Kosten sparen; erst so werden viele weitere Innovationen im Automobilbau überhaupt möglich [2.2].

2.2 Funktionale und Lokale Integration

Funktionale Integration

Der erste Schritt in der Automatisierung eines mechanischen Systems (s. Abb. 2.4) ist oft das Einfügen von *Aktoren* (A); neben der dadurch erzielbaren Komfortsteigerung können so Stellkräfte oder Stellgeschwindigkeiten gegenüber einer manuellen Betätigung erhöht werden. Für diesen Schritt wird Hilfsenergie (s. Kap. A4) benötigt, welche über die Aktoren in das System eingebracht wird. Beispiele in Kraftfahrzeugen für diesen Grad der Automatisierung sind etwa elektrische Sitzversteller, elektrische Fensterheber, Bremsen mit Bremskraftverstärker und Servolenkungen [2.2].

Mit dem Ziel einer weiteren Automatisierung – oder um den Prozess besser reproduzierbar zu gestalten – wird als nächster Schritt oft eine *elektronische Steuerung* (E) implementiert. In der Elektronik werden Informationen gesammelt, ver-

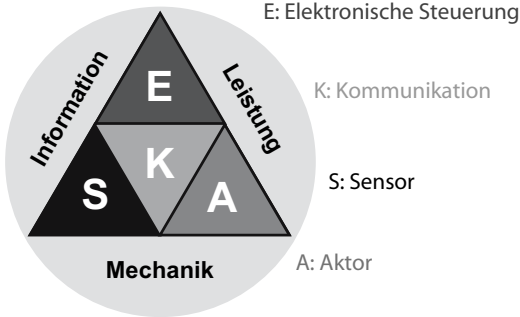


Abb. 2.4. Mechatronische Integration: Aktoren, Sensoren, Elektronik und Kommunikation in enger Wechselwirkung miteinander und mit der Umgebung [2.1]

arbeitet und gespeichert; Beispiele hierzu sind Sitzverstellungen mit Positionsspeicher oder auch Scheibenwischer-Intervallschaltungen.

Um die Güte der Steuerung zu erhöhen und das System an wechselnde Umgebungsbedingungen anzupassen, werden zusätzlich *Sensoren* (S) eingeführt. Sie liefern genaue Informationen über den Zustand des mechanischen Systems, erlauben einen bedarfsgerechten Betrieb oder die Reaktion auf unvorhersagbare Umgebungsbedingungen. Als Beispiele hierfür können Fensterheber mit Einklemmschutz, Scheibenwischer mit Regensensor, ein Antiblockier-Bremssystem (ABS) oder auch die Motorregelung mit Lambda-Sonde genannt werden.

Wenn ein System eine gewisse Größe überschreitet und somit verteilt im System Signale empfangen oder verarbeitet werden müssen, wird ein *Kommunikationssystem* (K) im Fahrzeug benötigt. In modernen Kraftfahrzeugen, angefangen von der Oberklasse, ist durch Einführung des CAN-Busses (s. Teil K) dieser Status bei mehreren Systemen erreicht; neben der drahtgebundenen Kommunikation wird auch die drahtlose Kommunikation immer wichtiger. Als Beispiele solcher verteilter Systeme seien Fahrdynamik-Regelungen genannt, aber auch etwa Zentralverriegelungen mit automatischer Fensterschließung.

Ein geregeltes System gemäß Abb. 2.4 erlaubt die Realisierung einer Vielzahl von *Funktionen* im Vergleich zu einem reinen mechanischen System. Mit der geeigneten Elektronik lassen sich – wenn nötig – komplexe Signal-Verarbeitungsprozesse (analog oder digital über Software gesteuert) implementieren, aber insbesondere die platzsparende Speicherfunktion der Elektronik erlaubt die Realisierung von beliebigen (und leicht anpassbaren) Nichtlinearitäten sowie von zustandsabhängigen und zeitvariablen Steuergesetzen. In einer weiteren Ausbaustufe lassen sich adaptive und selbstlernende Systeme implementieren. Alle diese Systeme können aber auch noch als automatisierte Systeme bezeichnet werden. Zu einem mechatronischen System gehört aber noch mehr.

Ein wichtiger Aspekt der Mechatronik ist die funktionale und lokale Integration der genannten Komponenten (Aktorik, Sensorik, Verarbeitungselektronik, Kommunikation); ohne Integration würden die Systeme für die automobilen Anwendung zu groß und zu teuer.

Funktionale Integration bedeutet hierbei, dass bei jeder Teilfunktion des Systems während der Entwicklung entschieden werden muss, ob diese mit einer mechanischen, einer elektronischen oder einer Software-basierten Lösung realisiert wird. Die gezielte Wahl der unter den Systemrandbedingungen am besten geeig-

neten Technologie ist entscheidend für die späteren Systemkosten. Oft sind Funktionen, die eine nennenswerte Leistung benötigen, vorzugsweise mit mechanischen Mitteln, zeitkritische Signalvorauswertung mit elektronischen Schaltungen und komplexe Entscheidungsalgorithmen am besten Software-basiert zu realisieren. Im Einzelfall kann die optimale Lösung natürlich auch anders ausfallen.

Lokale Integration

Die *lokale Integration* ist der zweite Aspekt: Ihr Ziel ist es, geringeres Bauvolumen und Gewicht, eine geringere Teilezahl, weniger Schnittstellen und somit sowohl eine preiswertere Herstellung als auch eine erhöhte Zuverlässigkeit im Betrieb zu erreichen. Die technische Herausforderung bei der Integration von Elektronik in die oft raue Umgebung der Mechanik ist der sachgemäße Umgang mit verschärften Umgebungsbedingungen bezüglich Temperatur, Vibrationen und elektromagnetischer Interferenz (EMV) für die elektronischen Komponenten des Systems.

Mit Hilfe von Mikroelektronik und Mikromechanik lässt sich die Integration auf kleinstem Raum realisieren: Neben der Integration von reinen Signalverarbeitungs-Funktionen (z.B. in Form von *Mikrocontrollern* in unterschiedlicher, für die jeweilige Aufgabe angepasster Leistungsfähigkeit) spielt die Zusammenlegung von Leistungshalbleitern mit den dazugehörigen Ansteuerbausteinen (*Smart Power Bausteine*) eine immer wichtigere Rolle; die *Mikromechanik* hat sich für die Realisierung von Sensoren mit integrierten Signalauswertungen (z.B. in Form von Druck- und Beschleunigungssensoren) etabliert.

Allerdings ist eine vollständige lokale Integration nicht automatisch die preiswerteste Lösung: Oft werden Varianten für verschiedene Leistungsklassen oder Ausbaustufen des Systems gefordert. Eine wohldurchdachte *Modularisierung* des Systems mit einem Schnittstellenkonzept, welches eine hohe Zahl an Gleichteilen auch für unterschiedliche Varianten und für zukünftige Entwicklungsschritte ermöglicht, ist der Schlüssel zum optimalen System. Dies gilt insbesondere für Module mit hohem Entwicklungsaufwand, wie z. B. hochintegrierte mikroelektronische und mikromechanische Komponenten.

Eine vollständige Beschreibung der *Schnittstellen* in einem solchen Modulkonzept schließt die folgenden Definitionen ein:

- **Mechanische Schnittstellen:** Befestigungspunkte, Kontakte, Anschlüsse, Materialpaarungen
- **Raumbedarf:** Räumliche Ausdehnung, Bewegungsraum, Platz für Zusammenbau und Service
- **Leistungs- und Medienflüsse:** Kräfte und Bewegungen, Drücke und Durchflüsse, Spannungen und Ströme, Stoffmengen und Medieneigenschaften
- **Informationsflüsse:** Steuersignale, Kommunikationsprotokolle
- **Benutzer-Schnittstellen:** Bedienkonzept, Systemverhalten, Außenwirkung
- **Umgebungsbedingungen:** Robustheit bzw. Wechselwirkung bzgl. Temperatur, Strahlung, Feuchtigkeit, Staub, Fremdstoffe, Schwingungen, ...

Diese Beschreibung der Schnittstellen ist gleichzeitig die Basis für die Zusammenarbeit zwischen Automobilhersteller und System- bzw. Komponentenhersteller. Sie wird im *Lastenheft* niedergelegt.

2.3 Beherrschung der System-Komplexität

Neben den Aspekten der funktionalen und lokalen Integration ist die Beherrschung der *System-Komplexität* die zweite generelle Herausforderung für die Kfz-Mechatronik. In Erweiterung von Abb. 2.4 stellt eher Abb. 2.5 die augenblickliche Situation in Oberklasse-Fahrzeugen dar: In neueren Entwicklungen besteht die Tendenz, eine immer größere Anzahl an Freiheitsgraden des mechanischen Systems zu beeinflussen; dazu werden mehr und mehr Aktoren (A) benötigt. Mehrgrößen-Regelungen und bedarfsgerechtes Systemverhalten erfordern immer mehr Sensoren (S) zur Erfassung des Betriebszustandes oder der Umgebungsbedingungen. Die ständige Leistungssteigerung und der damit einhergehende Preisverfall bei Speicherplatz und Rechenkapazität in der Elektronik (E) macht den Einsatz von komplexen Signalverarbeitungs- und Steuerungsalgorithmen für „intelligente“ und lernende Systeme möglich. Und um an allen Stellen des Fahrzeuges jederzeit auf aktuelle Sensorsignale und Informationen über die Systemzustände aller relevanten anderen Systeme zurückgreifen zu können, ist ein schnelles und evtl. hierarchisch strukturiertes Kommunikationssystem (K) erforderlich [2.2].

Eine große Herausforderung in der Realisierung solch komplexer Systeme liegt in der Beherrschung des gesamten *Entwicklungsprozesses* [2.6]:

- funktionale Definition des Systems,
- Spezifikation der Subsysteme, Module und Komponenten,
- ihre Realisierung und Implementierung,
- ihr Test,

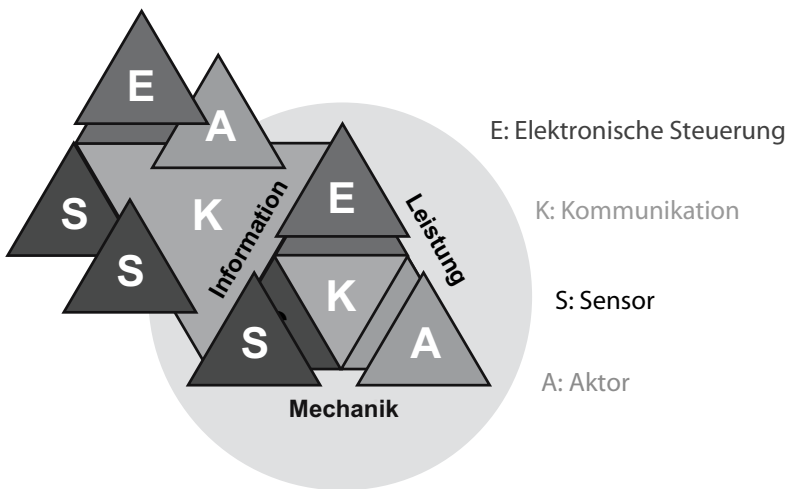


Abb. 2.5. Komplexität mechatronischer Systeme: Intelligente Subsysteme mit einer Vielzahl von Komponenten und Interaktionen [2.1]

- die Validierung der Funktionen,
- Systemüberwachung und Diagnose im Betrieb.

Ebenso wie bei der lokalen Integration spielt auch hier die Gestaltung der Schnittstellen und Modulkonzepte die entscheidende Rolle für die effiziente Durchführung des Entwicklungsprozesses: Module müssen möglichst wenig – oder zumindest rückwirkungsarm gestaltete – Schnittstellen besitzen, um separat entwickelt, gefertigt und getestet werden zu können.

Bezüglich der *Steuerung und Regelung* liegt die Herausforderung in der Entwicklung von robusten mehr-dimensionalen Regelungen von verteilten und zunehmend sicherheitskritischen Systemen. Dabei muss das System tolerant gegenüber beliebigen Einzelfehlern, bei wichtigen Funktionen sogar gegenüber Mehrfach-Fehlern sein, ohne dass eine kritische Fehlfunktion eintritt [2.7]. Da bei einer hohen Systemkomplexität die Anzahl der möglichen Fehlerkombinationen schnell ins Unermessliche wächst, muss in der Systemgestaltung die Auswirkung von Fehlern von vornherein berücksichtigt werden (u.a. durch *fail-silent-* oder *fail-operational-*Eigenschaften von Subsystemen [2.7]). Präventive *Diagnose* muss in der Lage sein, eine Degradation einer Komponente schon zu erkennen, bevor sie sich in einem Fehlerverhalten des Systems auswirkt. Und im Falle eines solchen drohenden Funktionsverlustes muss das System schnell und kostengünstig reparierbar sein. Schließlich muss ein solch komplexes System im Kraftfahrzeug auch noch so gestaltet sein, dass ein Fahrer ohne spezielles Training das System bedienen kann und er nicht durch eine Flut an überflüssiger oder sogar falsch interpretierbarer Information irritiert wird. Dies gilt insbesondere für die *Anzeige von Fehlerzuständen* bezüglich der Separierung von ursächlichen Fehlern und Folgefehlern, aber auch in der Beschränkung von Anzeige und Bedienung auf das wirklich Wesentliche für den Normalbetrieb.

2.4

Beispiele für Mechatronische Systeme im Fahrzeug

Im Kraftfahrzeug unterliegen praktisch alle Systeme einem Wandel von ursprünglich reinen mechanischen Systemen zu mechatronischen Systemen, deren Eigenschaften von der Elektronik stark geprägt sind. Im Folgenden sollen einige Beispiele diskutiert werden.

2.4.1

Fahrwerks- und Fahrassistenz-Systeme

Der offensichtlichste (da in der Werbung am stärksten herausgestellte) Einzug der Mechatronik spielt sich in Fahrwerkssystemen ab. Seit vielen Jahren sind Systeme wie *ABS (Anti-Blockier-System, seit Ende der 70er Jahre)* und *ESP (Elektronisches Stabilitäts-Programm, seit 1995)* in Fahrzeugen eingeführt und inzwischen zumindest auf dem europäischen Fahrzeugmarkt nicht mehr wegzudenken. Durch sensorische Überwachung der Raddrehzahlen (ABS-Sensoren) und durch Vergleich von Lenkwunsch des Fahrers (Lenkwinkel-Sensor) und tatsächlicher Fahrzeugbewegung (mikromechanischer Gierraten- und Querschleunigungs-Sensor) wird

gezielt auf die Bremsen der einzelnen Räder Einfluss genommen [2.8]. Inzwischen ist durch die Unfallstatistik nachgewiesen, dass diese Systeme die Anzahl von Unfällen deutlich reduziert haben [2.9].

Das bisher am weitesten gehende mechatronische Bremssystem wurde 2001 von einem deutschen Hersteller von Oberklasse-Fahrzeugen eingeführt. Diese *elektrohydraulische Bremse SBC (Sensotronic Brake Control, Abb. 2.6)* wird im Normalbetrieb vollständig aus einem elektrohydraulischen System als Hilfsenergiequelle gespeist und komplett elektronisch geregelt. Das Bremspedal ist im Normalbetrieb ausschließlich Sollwertsignal-Geber, und die Kraft des Bremsfußes wird nur noch im Falle eines Ausfalls des elektrischen Systems als Rückfallebene genutzt [2.10]. Das System kann dadurch, dass die Bremsfunktion unabhängig von der Pedalkraft des Fahrers ist, eine Vielzahl von zusätzlichen Funktionen übernehmen: Eine Trocknung von feuchten Bremsbelägen durch gelegentliches unmerkliches leichtes Anlegen der Bremsbacken, eine schnelle Vorkonditionierung der Bremsen für den Fall einer Notbremsfunktion und eine Haltefunktion der Bremse zum Anfahren am Berg.

Neben der Bremse wird auch die Federung von Oberklasse-Fahrzeugen durch mechatronische Systeme aktiviert. *Aktive Wankstabilisierung (ARS, Active Roll Stabilization)* für die Kompensation von Wank-Bewegungen während Kurvenfahrten führt insbesondere bei hohen Fahrzeugen zu einer deutlichen Verbesserung des Fahrgefühls. Hierzu wird über eine Auswertung des Lenkwinkel-Sensors

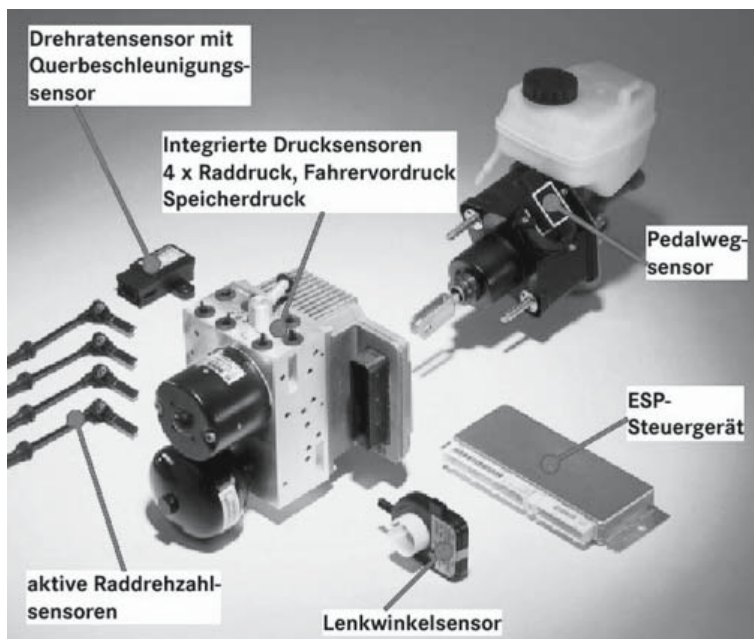


Abb. 2.6. Komponenten des SBC-Systems (Sensotronic Brake Control) [2.10]

gesteuert auf die Federbeine oder den Stabilisator Einfluss genommen. Das obere Ende der aktiven Federungssysteme ist das vollständige aktive Fahrwerk (unter dem Namen *ABC – Active Body Control* in Serie [2.11]), welches sowohl Wank- und Nickbewegungen des Fahrzeuges als auch Schwingungsanregungen durch Fahrbahnunebenheiten bis zu einem gewissen Maß kompensieren kann. Durch Weg- und Beschleunigungssensoren an jedem Rad stellt eine komplexe Regelung über hydraulische Aktoren die Auslenkung der Federbeine ein.

Auch die Lenkung – als letzte der drei wesentlichen Freiheitsgrade im Fahrwerk – wird inzwischen zu einem mechatronischen System: Nicht nur wird die bisher übliche rein hydraulische Lenkunterstützung seit einigen Jahren in immer mehr Fahrzeugen durch *elektrische Servolenkssysteme* mit geringerer Leistungsaufnahme ersetzt. Auch die Lenkübersetzung wird durch eine *Überlagerungslenkung* (seit 2003 in Serie) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit beeinflusst, um den bisherigen Kompromiss zwischen eher indirekter Lenkung für schnelle Autobahnfahrt und möglichst direkter Lenkung fürs Rangieren aufzulösen [2.12]. Damit sind die aktorischen Voraussetzungen für weitere zukünftige Assistenzsysteme, z.B. zur Kompensation von Seitenwinddrift, zur automatischen Spurführung (z.B. Einpark-Assistent) oder zur Stabilisierung bei extremen Fahrmanövern im Markt eingeführt.

2.4.2

Mechatronische Systeme im Triebstrang

Der Einzug von Mechatronik im Triebstrang findet zwar weniger öffentlichkeitswirksam als in Fahrwerk, aber dennoch mit gleicher Intensität statt. Der längst vollzogene Wegfall von Unterbrecherkontakten und die Einführung der viel robusteren und flexibleren Transistorzündung war nur der erste Schritt, den man im Nachhinein als eine mechatronische Lösung bezeichnen kann. Bei vielen Fahrzeugen hat ein (redundanter) Sensor am Fahrpedal zusammen mit einer elektronischen Steuerung des *Drosselklappenaktors* den lange üblichen Bowdenzug längst abgelöst.

Einspritz-Systeme beruhen heute nicht nur auf einer umfangreichen Software, welche die verschiedenen Betriebszustände des Motors für die zeit- und mengenrichtige Zumessung des Treibstoffs berücksichtigt. Auch bei den Injektoren setzen sich inzwischen mechatronische Lösungen durch: Piezoelektrische Aktoren (s. Kap. C2) erlauben durch ihre höhere Grenzfrequenz und Kraftdichte eine präziser dosierte und häufigere Einspritzung als elektromagnetische Einspritz-Aktoren. Durch Mehrfacheinspritzung während eines Verbrennungstaktes wird die Verbrennung bezüglich Wirkungsgrad und Geräuschbildung positiv beeinflusst [2.13]. Zusätzliche Stellmöglichkeiten an Verbrennungsmotoren werden genutzt, um den Treibstoffverbrauch zu reduzieren und um die Emissionen weiter zu senken. Dabei sollen hier beispielhaft die *Abgasrückführung* (AGR) über eine elektromechanisch verstellbare Abgasrückführklappe und die *Nockenwellenverstellung* über elektronisch gesteuerte hydraulische oder elektrische Nockenwellenversteller genannt werden.

Für die Zukunft ist angestrebt, noch weitere Freiheitsgrade beim Gaswechsel der Zylinder zu nutzen, als mit den bisherigen mechanisch angetriebenen Venti-