

Hermann Winner | Stephan Hakuli | Gabriele Wolf (Hrsg.)

Handbuch Fahrerassistenzsysteme

**Handbuch Verbrennungsmotor**

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

**Lexikon Motorentechnik**

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

**Ottomotor mit Direkteinspritzung**

herausgegeben von R. van Basshuysen

**Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik**

herausgegeben von H.-H. Braess und U. Seiffert

**Bremsenhandbuch**

herausgegeben von B. Breuer und K. H. Bill

**Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik**

von H. Eichseder und M. Klell

**Umweltschutz in der Automobilindustrie**

von D. Gruden

**Fahrwerkhandbuch**

herausgegeben von B. Heißing und M. Ersoy

**Aerodynamik des Automobils**

herausgegeben von W.-H. Hucho

**Verbrennungsmotoren**

von E. Köhler und R. Flierl

**Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen**

von F. Kramer

**Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung**

von G. Leister

**Automobilelektronik**

herausgegeben von K. Reif

**Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz**

herausgegeben von U. Seiffert und G. Rainer

**Rennwagentechnik**

von M. Trzesniowski

**Handbuch Kraftfahrzeugelektronik**

herausgegeben von H. Wallentowitz und K. Reif

**Bussysteme in der Fahrzeugtechnik**

von W. Zimmermann und R. Schmidgall

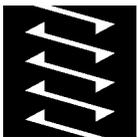
Hermann Winner | Stephan Hakuli | Gabriele Wolf (Hrsg.)

# Handbuch Fahrerassistenz- systeme

Grundlagen, Komponenten und Systeme  
für aktive Sicherheit und Komfort

Mit 550 Abbildungen und 45 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



**VIEWEG+**  
**TEUBNER**

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

Dieses Werk entstand mit freundlicher Unterstützung der Continental AG, Division Chassis & Safety.

1. Auflage 2009

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lektorat: Ewald Schmitt | Gabriele McLemore

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

[www.viewegteubner.de](http://www.viewegteubner.de)



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

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt 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 jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Satz: Klementz publishing services, Gundelfingen

Druck und buchbinderische Verarbeitung: STRAUSS GMBH, Mörlenbach

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0287-3

# Vorwort

Fahrerassistenzsysteme haben sich in den letzten Jahren rasant entwickelt und sind fester Bestandteil in vielen heutigen Fahrzeugmodellen aller Fahrzeugklassen. Forschung und Entwicklung in Unternehmen und Universitäten beschäftigen sich mit der Optimierung der bestehenden Systeme und mit Weiterentwicklungen, die dem Fahrer ein noch höheres Maß an Assistenz und Unterstützung bieten sollen. Zeugnis dieser Arbeiten legen die vielen wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Tagungsbeiträge ab, doch eine umfassende Darstellung des heutigen Stands der Technik sowie der Grundlagen für die Entwicklung solcher Systeme suchte man bisher im deutschsprachigen Raum vergeblich. Zwar existieren einige Fachbücher, die sich mit Fahrerassistenzsystemen beschäftigen, doch sind diese stark auf einzelne Aspekte wie z. B. die Regelung solcher Systeme fokussiert. Aufbauend auf den Inhalten der Vorlesung Fahrerassistenzsysteme, die ich seit 2002 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt (FZD) halte (seit dem Sommersemester 2008 mit erweitertem Umfang unter dem Titel Mechatronik und Assistenzsysteme im Automobil), wurde die Gliederung des vorliegenden Handbuchs Fahrerassistenzsysteme entwickelt.

Der Umfang der Thematik machte es erforderlich, die inhaltliche Arbeit auf viele Schultern zu verteilen, und so halten Sie nun ein Werk in Händen, dessen 44 Kapitel von insgesamt 95 Experten aus Industrie und Wissenschaft geschrieben wurden. Diese Autoren sind es, denen ich in erster Linie zu Dank verpflichtet bin, denn ohne ihre Bereitschaft, Zeit und Mühen in die Erstellung der Manuskripte zu investieren, hätte dieses Buch nicht entstehen können.

An einem solchen Projekt sind jedoch noch mehr Menschen beteiligt, und ich möchte es nicht versäumen, allen in diesem Vorwort für ihren Beitrag zu danken.

Ganz besonders zu Dank verpflichtet bin ich meinen beiden Mit-Herausgebern Herrn Stephan Hakuli und Frau Gabriele Wolf, in deren Händen die Organisation und alle operativen Aufgaben dieses Projekts von der Autorenbetreuung über die Zusammenarbeit mit dem Verlag bis zur Erstellung des Gesamtmanuskripts lagen. Für ihr ausgezeichnetes Projektmanagement und ihre Bereitschaft, diese zusätzlichen Aufgaben neben ihrer Arbeit als wissenschaftliche Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik auf sich zu nehmen, danke ich ihnen sehr herzlich. Frau Wolf danke ich darüber hinaus, dass sie den Anstoß dazu gab, dieses von mir in Gedanken schon länger gehegte Projekt in die Tat umzusetzen.

Dem Verlag Vieweg+Teubner danke ich für die Bereitschaft, dieses Handbuch herauszugeben. Für die angenehme Zusammenarbeit und kompetente Betreuung sei Herrn Ewald Schmitt, Frau Elisabeth Lange und Frau Gabriele McLemore gedankt.

Das Lektorat für dieses Buch wurde von Susanne und Katharina Mitteldorf durchgeführt. Ihre sorgfältige und aufmerksame Prüfung hat die hohe sprachliche Qualität der Texte ermöglicht, und dafür sowie die angenehme Zusammenarbeit bedanke ich mich sehr herzlich bei ihnen.

Herrn Danijel Pusic danke ich für seine Mitarbeiter bei der Konzeption des Buches und der Erarbeitung der Gliederung. Unterstützt wurden die Arbeiten an diesem Handbuch in vielfältiger Weise durch die studentischen Hilfskräfte Herrn Johannes Götzelmann, Herrn Richard Hurst, Frau Hyuliya Rashidova und Herrn Philip Weick. Auch ihnen sei gedankt.

Ich bedanke mich außerdem bei allen FZD-Mitarbeitern, die durch Korrekturlesen, fachliche Diskussionen oder sonstige hilfreiche Beiträge an der Entstehung dieses Buchs mitgewirkt haben.

Darmstadt, im Mai 2009

Prof. Dr. rer. nat. *Hermann Winner*

# Die Herausgeber

Prof. Dr. rer. nat. **Hermann Winner** studierte Physik an der Westfälischen-Wilhelms-Universität (WWU) in Münster/Westfalen. Anschließend arbeitete er als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Angewandte Physik der WWU Münster, wo er 1987 für seine Arbeit über die „Dynamik der Domänenwände in metallischen Ferromagnetika“ promoviert wurde.

Von 1987 bis 1994 arbeitete Hermann Winner bei der Robert Bosch GmbH in Karlsruhe, Ettlingen und Schwieberdingen in der Vorentwicklung von Mess- und Informationstechnik und war dabei u. a. verantwortlich für die Projekte PROMETHEUS-Drive-by-Wire, die Elektrohydraulische Bremse und Adaptive Cruise Control. In seiner Funktion als Leiter der Serienentwicklung von Adaptive Cruise Control lag sein Schwerpunkt auf Systementwicklung und Applikation und er führte das System schließlich zur Serie. In den Jahren 1993 bis 2001 war Hermann Winner außerdem Experte bei der ISO/TC204/WG14 – Vehicle/Roadway Warning and Control Systems – davon fünf Jahre als Leiter der deutschen Spiegelgruppe AK I.14 des FAKRA.

Seit 2002 ist Hermann Winner Inhaber des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Darmstadt und Leiter des gleichnamigen Fachgebiets (FZD). Er baute dort die Forschung auf dem Gebiet der Fahrerassistenzsysteme aus, das heute eine der Kernkompetenzen von FZD darstellt. Dies zeigt sich anhand zahlreicher, erfolgreich durchgeführter Forschungsprojekte mit der Automobil- und Zulieferindustrie zu den Themen Umfeldsensorik, Funktionsbewertungen von Notbrems-, Notausweich- und Einbiege-/Kreuzen-Assistenz sowie Systemarchitektur von Fahrerassistenzsystemen.

**Stephan Hakuli** studierte Physik an der TU Darmstadt und schloss 2005 als Diplomingenieur der Physik ab. In seiner Diplomarbeit konzipierte und realisierte er ein Verfahren zur gescannten Belichtung und Vermessung holographischer Head-up-Displays. Seit Dezember 2005 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik und koordinierte zwei Jahre lang die Lehraktivitäten des Fachgebiets. Im Rahmen seiner Forschungstätigkeit beschäftigt er sich mit Conduct-by-Wire, einem integrierten Fahrerassistenzkonzept für manöverbasierte Fahrzeugführung. [Foto: Fischer, Weinheim]

**Gabriele Wolf** studierte Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Maschinenbau an der TU Darmstadt und der TU Eindhoven. Sie ist seit Januar 2004 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Fahrzeugtechnik, wo sie sich zunächst im Rahmen eines interdisziplinären Projekts mit Innovationspotenzialen im Fahrwerk beschäftigte. Im Bereich der Fahrerassistenzsysteme befasst sie sich mit der Bewertung von Systemen zur Unfallvermeidung, wobei sowohl technische als auch wirtschaftliche und gesellschaftliche Aspekte berücksichtigt werden.

[Foto: Fischer, Weinheim]



# Autorenverzeichnis

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Abendroth, Bettina, Dr.-Ing.      | Technische Universität Darmstadt          |
| Auer, Richard, Dr. rer. nat.      | Volkswagen AG                             |
| Bachmann, Alexander, MSc          | Universität Karlsruhe (TH)                |
| Bachmann, Jürgen, Dipl.-Ing. (FH) | BMW Motorrad                              |
| Bartels, Arne, Dr.-Ing.           | Volkswagen AG                             |
| Bayer, Bernward, Dr.-Ing.         | Continental AG                            |
| Bender, Eva, Dr.-Ing.             | Continental AG                            |
| Bielefeld, Jürgen, Dr.            | BMW Group                                 |
| Bock, Thomas, Dr.-Ing.            | Audi AG                                   |
| Brenner, Peter, Dipl.-Ing. (FH)   | ZF Lenksysteme GmbH                       |
| Breuer, Jörg, Dr.-Ing.            | Daimler AG                                |
| Brosig, Stefan, Dr.-Ing.          | Volkswagen AG                             |
| Bruder, Ralph, Prof. Dr.-Ing.     | Technische Universität Darmstadt          |
| Büring, Hendrik, Dipl.-Ing. (TH)  | ZF Lenksysteme GmbH                       |
| Büse, Axel, Dipl.-Ing.            | Continental AG                            |
| Buxbaum, Bernd, Dr.               | PMD Technologies GmbH                     |
| Danner, Bernd, Dipl.-Ing.         | Daimler AG                                |
| Darms, Michael, Dr.-Ing.          | Continental AG                            |
| Didier, Muriel, Dr.               | Technische Universität Darmstadt          |
| Donges, Edmund, Dr.-Ing.          | vormals BMW AG                            |
| Dörner, Karlheinz, Dipl.-Ing.     | MAN Nutzfahrzeuge AG                      |
| Duchow, Christian, Dipl.-Ing.     | Universität Karlsruhe (TH)                |
| Eckert, Alfred, Dipl.-Ing.        | Continental AG                            |
| Fechner, Thomas, Dipl.-Ing.       | Continental AG                            |
| Flemisch, Frank, Dr.-Ing.         | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt |
| Gasser, Tom Michael, Ass. jur.    | Bundesanstalt für Straßenwesen            |
| Gayko, Jens E., Dr.-Ing.          | Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH       |
| Geduld, Georg                     | vormals Omron Electronics GmbH            |
| Gelau, Christhard, Dr.            | Bundesanstalt für Straßenwesen            |
| Gruber, Steffen, Dipl.-Ing.       | Continental AG                            |
| Hakuli, Stephan, Dipl.-Ing.       | Technische Universität Darmstadt          |
| Hecker, Falk, Dr.                 | Knorr-Bremse                              |
| Hellmann, Wladimir, Dipl.-Ing.    | Continental AG                            |
| Hipp, Eberhard, Dipl.-Ing.        | MAN Nutzfahrzeuge AG                      |
| Hoffmann, Jens, Dr.-Ing.          | Continental AG                            |

## Autorenverzeichnis

|   |   |
|---|---|
| Hopstock, Matthias, Dipl.-Ing.          | BMW Group                                 |
| Huhn, Wolfgang, Dr.                     | Audi AG                                   |
| Isermann, Rolf, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. | Technische Universität Darmstadt          |
| Kammel, Sören, Dr.-Ing.                 | vormals Universität Karlsruhe (TH)        |
| Katzwinkel, Reiner, Dipl.-Ing.          | Volkswagen AG                             |
| Kersken, Ulrich, Dipl.-Ing.             | Robert Bosch Car Multimedia GmbH          |
| Khanh, Tran Quoc, Prof. Dr.-Ing.        | Technische Universität Darmstadt          |
| Klanner, Felix, Dr.-Ing.                | BMW Group                                 |
| Kleine-Besten, Thomas, Dr.-Ing.         | Robert Bosch Car Multimedia GmbH          |
| Knoll, Peter, Prof. Dr.-Ing.            | Universität Karlsruhe (TH)                |
|   | IF+F Ingenieurbüro für                    |
|   | Fahrerassistenz und Fahrerinformation     |
|   | BMW Group                                 |
| Köhn, Philip, Dr.-Ing.                  | Robert Bosch GmbH                         |
| König, Winfried, Dr.-Ing.               | Robert Bosch GmbH                         |
| Kost, Friedrich, Dipl.-Ing.             | vormals Technische Universität Darmstadt  |
| Landau, Kurt, Prof. Dr.-Ing.            | PMD Technologies GmbH                     |
| Lange, Robert, Dr.-Ing.                 | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt |
| Löper, Christian, Dipl.-Ing.            | TRW Automotive                            |
| Mages, Mark, Dr.-Ing.                   | Technische Universität Braunschweig       |
| Maurer, Markus, Prof. Dr.-Ing.          | Robert Bosch GmbH                         |
| Mörbe, Matthias, Dipl.-Ing.             | Robert Bosch GmbH                         |
| Noll, Martin, Dr.                       | Continental AG                            |
| Ocvirk, Norbert, Dipl.-Ing.             | Continental AG                            |
| Piller, Bernd, Dipl.-Ing.               | Robert Bosch Car Multimedia GmbH          |
| Pöchmüller, Werner, Dr.-Ing.            | Robert Bosch GmbH                         |
| Rapps, Peter, Dipl.-Phys.               | Continental AG                            |
| Raste, Thomas, Dr.                      | Technische Universität München            |
| Rausch, Herbert, Dr.-Ing.               | vormals BMW AG                            |
| Reichart, Günter, Dr.-Ing.              | ZF Lenksysteme GmbH                       |
| Reimann, Gerd, Dipl.-Ing. (TH)          | BMW Motorrad                              |
| Reissing, Jörg, Dr.-Ing.                | Continental AG                            |
| Remfrey, James, Dipl.-Ing.              | BMW Group                                 |
| Richter, Thorsten, Dipl.-Ing.           | Continental AG                            |
| Rieth, Peter E., Dr.-Ing.               | PMD Technologies GmbH                     |
| Ringbeck, Thorsten, Dr.-Ing.            | Volkswagen AG                             |
| Rohlf, Michael, Dr.-Ing.                | Robert Bosch Car Multimedia GmbH          |
| Schepers, Heiner, Dipl.-Ing. (BA)       | Technische Universität Darmstadt          |
| Schiele, Bernt, Prof. Dr.               | Continental AG                            |
| Schmitt, Stefan, Dipl.-Ing.             |   |

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| Schmittner, Bernhard, Dipl.-Ing.        | Continental AG                   |
| Schöning, Volkmar, Dipl.-Ing.           | Volkswagen AG                    |
| Schorn, Matthias, Dr.-Ing.              | Continental AG                   |
| Schreiber, Michael, Dipl.-Wirtsch.-Ing. | Technische Universität Darmstadt |
| Schroven, Frank, Dipl.-Ing.             | Volkswagen AG                    |
| Schwertberger, Walter, Dipl.-Ing. (FH)  | MAN Nutzfahrzeuge AG             |
| Schwitters, Frank, Dipl.-Ing.           | Volkswagen AG                    |
| Seeck, Andre, Dipl.-Ing.                | Bundesanstalt für Straßenwesen   |
| Seiniger, Patrick, Dipl.-Ing.           | Technische Universität Darmstadt |
| Spichalsky, Carsten, Dipl.-Ing.         | Volkswagen AG                    |
| Stählin, Ulrich, Dr.-Ing.               | Continental AG                   |
| Steinle, Joachim, Dr.-Ing.              | BMW Group                        |
| Steinmeyer, Simon, Dipl.-Inf.           | Volkswagen AG                    |
| Stiller, Christoph, Prof. Dr.-Ing.      | Universität Karlsruhe (TH)       |
| Thiel, Robert, Dipl.-Ing.               | Continental AG                   |
| van Zanten, Anton, Dr.                  | vormals Robert Bosch GmbH        |
| Völkel, Jürgen, Dipl.-Ing.              | Continental AG                   |
| Walter, Michael, Dr.                    | vormals Continental AG           |
| Winner, Hermann, Prof. Dr. rer. nat.    | Technische Universität Darmstadt |
| Wojek, Christian, Dipl.-Inform.         | Technische Universität Darmstadt |
| Wolf, Gabriele, Dipl.-Wirtsch.-Ing.     | Technische Universität Darmstadt |
| Woyna, Lars, Dipl.-Ing.                 | Technische Universität Darmstadt |
| Wuttke, Ulrich, Dipl.-Ing.              | Volkswagen AG                    |

# Firmen- und Hochschulverzeichnis

## Firmen

|                                |                                    |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Audi AG                        | Dr.-Ing. Thomas Bock               |
|                                | Dr. Wolfgang Huhn                  |
| BMW Group                      | Dr. Jürgen Bielefeld               |
|                                | Dr.-Ing. Edmund Donges (vormals)   |
|                                | Dipl.-Ing. Matthias Hopstock       |
|                                | Dr.-Ing. Felix Klanner             |
|                                | Dr.-Ing. Philip Köhn               |
|                                | Dr.-Ing. Günter Reichart (vormals) |
|                                | Dipl.-Ing. Thorsten Richter        |
|                                | Dr.-Ing. Joachim Steinle           |
| BMW Motorrad                   | Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Bachmann    |
|                                | Dr.-Ing. Jörg Reissing             |
| Bundesanstalt für Straßenwesen | Ass. jur. Tom Michael Gasser       |
|                                | Dr. Christhard Gelau               |
|                                | Dipl.-Ing. Andre Seeck             |
| Continental AG                 | Dr.-Ing. Bernward Bayer            |
|                                | Dr.-Ing. Eva Bender                |
|                                | Dipl.-Ing. Axel Büse               |
|                                | Dr.-Ing. Michael Darms             |
|                                | Dipl.-Ing. Alfred Eckert           |
|                                | Dipl.-Ing. Thomas Fechner          |
|                                | Dipl.-Ing. Steffen Gruber          |
|                                | Dipl.-Ing. Wladimir Hellmann       |
|                                | Dr.-Ing. Jens Hoffmann             |
|                                | Dipl.-Ing. Norbert Ocvirk          |
|                                | Dipl.-Ing. Bernd Piller            |
|                                | Dr. Thomas Raste                   |
|                                | Dipl.-Ing. James Remfrey           |
|                                | Dr.-Ing. Peter E. Rieth            |
|                                | Dipl.-Ing. Stefan Schmitt          |
|                                | Dipl.-Ing. Bernhard Schmittner     |
|                                | Dr.-Ing. Matthias Schorn           |
|                                | Dr.-Ing. Ulrich Stählin            |
|                                | Dipl.-Ing. Robert Thiel            |

## Firmen- und Hochschulverzeichnis

|  |  |
|--|--|
| Continental AG (Fortsetzung)   | Dipl.-Ing. Jürgen Völkel<br>Dr. Michael Walter (vormals)   |
| Daimler AG   | Dr.-Ing. Jörg Breuer<br>Dipl.-Ing. Bernd Danner  |
| Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  | Dr.-Ing. Frank Flemisch<br>Dipl.-Ing. Christian Löper  |
| Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH<br>IF+F Ingenieurbüro für<br>Fahrerassistenz und Fahrerinformation | Dr.-Ing. Jens E. Gayko<br>Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll   |
| Knorr-Bremse   | Dr. Falk Hecker  |
| MAN Nutzfahrzeuge AG   | Dipl.-Ing. Karlheinz Dörner<br>Dipl.-Ing. Eberhard Hipp<br>Dipl.-Ing. (FH) Walter Schwertberger  |
| PMD Technologies GmbH  | Dr. Bernd Buxbaum<br>Dr.-Ing. Robert Lange<br>Dr.-Ing. Thorsten Ringbeck   |
| Omron Electronics GmbH   | Georg Geduld (vormals)   |
| Robert Bosch Car Multimedia GmbH   | Dipl.-Ing. Ulrich Kersken<br>Dr.-Ing. Thomas Kleine-Besten<br>Dr.-Ing. Werner Pöchmüller<br>Dipl.-Ing. (BA) Heiner Schepers  |
| Robert Bosch GmbH  | Dr.-Ing. Winfried König<br>Dipl.-Ing. Friedrich Kost<br>Dipl.-Ing. Matthias Mörbe<br>Dr. Martin Noll<br>Dipl.-Phys. Peter Rapps<br>Dr. Anton van Zanten (vormals)  |
| TRW Automotive   | Dr.-Ing. Mark Mages  |
| Volkswagen AG  | Dr. rer. nat. Richard Auer<br>Dr.-Ing. Arne Bartels<br>Dr.-Ing. Stefan Brosig<br>Dipl.-Ing. Reiner Katzwinkel<br>Dr.-Ing. Michael Rohlf<br>Dipl.-Ing. Volkmar Schöning<br>Dipl.-Ing. Frank Schroven<br>Dipl.-Ing. Frank Schwitters<br>Dipl.-Ing. Carsten Spichalsky<br>Dipl.-Inf. Simon Steinmeyer<br>Dipl.-Ing. Ulrich Wuttke |

ZF Lenksysteme GmbH

Dipl.-Ing. (FH) Peter Brenner  
Dipl.-Ing. (TH) Hendrik Büring  
Dipl.-Ing. (TH) Gerd Reimann

### **Hochschulen**

Technische Universität Braunschweig

Technische Universität Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer  
Dr.-Ing. Bettina Abendroth  
Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder  
Dr. Muriel Didier  
Dipl.-Ing. Stephan Hakuli  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Rolf Isermann  
Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh  
Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau (vormals)  
Prof. Dr. Bernt Schiele  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Michael Schreiber  
Dipl.-Ing. Patrick Seiniger  
Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner  
Dipl.-Inform. Christian Wojek  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Gabriele Wolf  
Dipl.-Ing. Lars Woyna  
Dr.-Ing. Herbert Rausch  
MSc Alexander Bachmann  
Dipl.-Ing. Christian Duchow  
Dr.-Ing. Sören Kammel (vormals)  
Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll  
Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller

Technische Universität München

Universität Karlsruhe (TH)

# Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| <b>Einleitung</b> .....  | 1  |
| <b>A Grundlagen der Fahrerassistenzsystementwicklung</b> .....   | 3  |
| <b>1 Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung</b> .....   | 4  |
| 1.1 Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess .....  | 4  |
| 1.1.1 Informationsaufnahme .....   | 5  |
| 1.1.2 Informationsverarbeitung .....   | 6  |
| 1.1.3 Informationsabgabe .....   | 8  |
| 1.2 Fahrercharakteristik und die Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit .....   | 8  |
| 1.3 Anforderungen an den Fahrzeugführer im System Fahrer-Fahrzeug-Umgebung .....   | 10 |
| 1.4 Bewertung der Anforderungen aus der Fahrzeugführungsaufgabe im Hinblick auf die menschliche Leistungsfähigkeit ..... | 12 |
| <b>2 Fahrerverhaltensmodelle</b> .....   | 15 |
| 2.1 Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen, 1983 .....                            | 15 |
| 2.2 Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges, 1982 .....   | 16 |
| 2.3 Beispiel eines regelungstechnischen Modellansatzes für die Führungs- und Stabilisierungsebene der Fahraufgabe .....  | 17 |
| 2.4 Zeitkriterien .....  | 19 |
| 2.5 Neuer Ansatz zur Quantifizierung von fertigungs-, regel- und wissensbasiertem Verhalten im Straßenverkehr .....      | 20 |
| 2.6 Folgerungen für Fahrerassistenzsysteme .....   | 22 |
| <b>3 Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit</b> .....  | 24 |
| 3.1 Einleitung .....   | 24 |
| 3.2 Erwartete Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen auf die Verkehrssicherheit .....                                  | 24 |
| 3.3 Bewertung von Fahrerassistenzsystemen vor dem Hintergrund von Ratings und gesetzlichen Vorschriften .....            | 27 |
| 3.3.1 Typzulassungsbestimmungen .....  | 27 |
| 3.3.2 Anforderungen der Verbraucherorganisationen .....  | 27 |
| 3.3.3 Herstellerinterne Anforderungen .....  | 28 |
| 3.3.4 Beyond NCAP – Die zukünftige Euro NCAP-Bewertung .....   | 28 |
| 3.4 Rechtliche Grenzen autonom eingreifender Fahrerassistenzsysteme .....  | 29 |
| <b>4 Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen</b> .....                    | 33 |
| 4.1 Übersicht .....  | 33 |
| 4.2 Fragestellungen bei der Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion (HMI) von FAS .....                              | 33 |
| 4.2.1 Unterstützung durch FAS .....  | 33 |
| 4.2.2 Leistungen und Grenzen der FAS .....   | 33 |
| 4.2.3 Benötigte Kompetenzen und Fachbereiche .....   | 34 |
| 4.2.4 Einflussfaktoren bei der Entwicklung von FAS .....   | 34 |
| 4.2.5 Interaktionskanäle zwischen Fahrer, FAS und Fahrzeug .....   | 34 |
| 4.2.6 Änderung der Beziehung Fahrer-Fahrzeug durch FAS .....   | 35 |
| 4.2.7 Situationsbewusstsein des Fahrers .....  | 36 |
| 4.2.8 Inneres Modell .....   | 36 |
| 4.2.9 Entlastung oder Belastung durch FIS und FAS? .....   | 37 |
| 4.2.10 Verantwortung des Fahrers .....   | 37 |
| 4.2.11 Stärken von Mensch und Maschine .....   | 37 |

## Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.3      | Systematische Entwicklung des HMI von FAS                                   | 37        |
| 4.3.1    | Die Entwicklung des HMI im FAS-Entwicklungsprozess                          | 37        |
| 4.3.2    | Unterstützungsbedarf des Fahrers  | 38        |
| 4.3.3    | Leitlinien zur Entwicklung von FIS und FAS                                  | 38        |
| 4.3.4    | Richtlinien für FIS – „European Statements of Principles on HMI“ (ESoP)     | 39        |
| 4.3.5    | Normen zur Gestaltung von FIS und FAS                                       | 39        |
| 4.3.6    | Entwicklung von Normen  | 40        |
| 4.3.7    | ISO-Normen zu HMI im Kfz  | 40        |
| 4.4      | Bewertung von FAS-Gestaltungen  | 40        |
| 4.5      | Zusammenfassung   | 42        |
| <b>5</b> | <b>Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen</b>                         | <b>43</b> |
| 5.1      | Begriffsklärung „Fahrerassistenzsysteme“                                    | 43        |
| 5.2      | Motivation des Beitrags   | 44        |
| 5.3      | Fahrerassistenzsysteme aus Sicht des Fahrers                                | 44        |
| 5.4      | Systematischer Entwurf von Fahrerassistenzsystemen                          | 45        |
| 5.5      | Systematischer Entwurf einer „Automatischen Notbremse“                      | 47        |
| 5.5.1    | Nutzerorientierte Funktionsdefinition                                       | 47        |
| 5.5.2    | Aspekte der Systemarchitektur   | 50        |
| 5.5.3    | Funktionale Tests von Fahrerassistenzsystemen                               | 51        |
| 5.5.4    | Testfall „berechtigte Auslösung“ – Vehicle-in-the-Loop                      | 51        |
| 5.5.5    | Fehlerwahrscheinlichkeit für „unberechtigte Auslösung“ – trojanische Pferde | 52        |
| 5.6      | Zusammenfassung   | 52        |
| <b>6</b> | <b>Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen</b>                      | <b>55</b> |
| 6.1      | Zielsetzung der nutzerorientierten Bewertung                                | 55        |
| 6.2      | Anforderungen an Bewertungsverfahren  | 55        |
| 6.3      | Eingesetzte Verfahren   | 57        |
| 6.3.1    | Versuche an Fahrsimulatoren   | 57        |
| 6.3.2    | Versuche auf Testgeländen (kontrolliertes Feld)                             | 58        |
| 6.3.3    | Versuche im realen Straßenverkehr (Feldversuche)                            | 58        |
| 6.4      | Exemplarische Anwendungen   | 59        |
| 6.4.1    | Bewertung von Sicherheitssystemen am Fahrsimulator                          | 59        |
| 6.4.2    | Bewertung einer Sicherheitsfunktion in Versuchen auf einem Testgelände      | 63        |
| 6.4.3    | Bewertung von Assistenzfunktion in Versuchen im realen Straßenverkehr       | 65        |
| <b>7</b> | <b>EVITA – Das Prüfverfahren zur Beurteilung von Antikollisionssystemen</b> | <b>69</b> |
| 7.1      | Einleitung  | 69        |
| 7.2      | Bisher bekannte Testverfahren   | 69        |
| 7.3      | Das Dummy Target EVITA  | 70        |
| 7.3.1    | Ziele   | 70        |
| 7.3.2    | Konzept   | 70        |
| 7.3.3    | Aufbau  | 71        |
| 7.3.4    | Versuchsablauf  | 71        |
| 7.3.5    | Leistungsdaten  | 72        |
| 7.4      | Messkonzept im Versuchsfahrzeug   | 72        |
| 7.5      | Gefährdungen von Versuchsteilnehmern  | 72        |
| 7.6      | Bewertungsmethode   | 73        |
| 7.6.1    | Wirksamkeit eines Antikollisionssystems                                     | 73        |
| 7.6.2    | Probandenversuch  | 73        |
| 7.6.3    | Beurteilungszeitraum  | 73        |
| 7.6.4    | Vergleiche von Antikollisionssystemen                                       | 74        |
| 7.7      | Ergebnisse  | 75        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>8</b>  | <b>Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation</b> | <b>76</b>  |
| 8.1       | Motivation  | 76         |
| 8.2       | Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen   | 76         |
| 8.3       | Vehicle in the Loop   | 79         |
| 8.3.1     | Verkehrssimulation und Visualisierung   | 80         |
| 8.3.2     | Positionierung des Versuchsträgers in der Verkehrssimulation                            | 80         |
| 8.3.3     | Einbindung des Fahrers mithilfe von Augmented Reality                                   | 80         |
| 8.3.4     | Sensormodelle   | 81         |
| 8.4       | Gesamtarchitektur des Vehicle in the Loop   | 81         |
| 8.5       | Validierung des Vehicle in the Loop   | 82         |
| 8.6       | Ausblick  | 83         |
| <b>9</b>  | <b>Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Systemarchitektur im Kraftfahrzeug</b> | <b>84</b>  |
| 9.1       | Einleitung  | 84         |
| 9.2       | Systemarchitektur   | 85         |
| 9.3       | Wichtige Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Systemarchitektur                | 86         |
| 9.4       | Ausstattungsvarianz und Vernetzungskomplexität  | 87         |
| 9.5       | Partitionierung von FAS-Funktionen auf Steuergeräte                                     | 88         |
| 9.6       | Vernetzungstechnologien   | 91         |
| 9.7       | Zusammenfassung und Ausblick  | 92         |
| <b>B</b>  | <b>Sensorik für Fahrerassistenzsysteme</b>  | <b>93</b>  |
| <b>10</b> | <b>Fahrdynamik-Sensoren für FAS</b>   | <b>94</b>  |
| 10.1      | Einleitung  | 94         |
| 10.2      | Allgemeine Auswahlkriterien   | 94         |
| 10.2.1    | Anforderungen Technikenebene  | 95         |
| 10.2.2    | Kommerzielle Ebene  | 97         |
| 10.3      | Technische Sensorkennndaten für Fahrerassistenzsysteme                                  | 98         |
| 10.3.1    | Sensoren und Einbauorte   | 98         |
| 10.3.2    | Raddrehzahlsensor DF  | 99         |
| 10.3.3    | Lenkradwinkelsensoren   | 101        |
| 10.3.4    | Drehraten- und Beschleunigungssensoren  | 104        |
| 10.3.5    | Bremsdrucksensoren  | 106        |
| <b>11</b> | <b>Ultraschallsensorik</b>  | <b>110</b> |
| 11.1      | Piezoelektrischer Effekt  | 110        |
| 11.2      | Piezoelektrische Keramiken  | 110        |
| 11.2.1    | Materialien   | 110        |
| 11.2.2    | Herstellung   | 111        |
| 11.2.3    | Hysterese   | 112        |
| 11.2.4    | Piezoelektrische Konstanten   | 112        |
| 11.2.5    | Depolarisation  | 113        |
| 11.3      | Ultraschallwandler  | 113        |
| 11.3.1    | Ersatzschaltbild  | 114        |
| 11.4      | Ultraschallsensoren für das Kfz   | 115        |
| 11.4.1    | Sensorbaugruppen  | 115        |
| 11.5      | Antennen und Strahlgestaltung   | 117        |
| 11.5.1    | Simulation  | 117        |
| 11.6      | Entfernungsmessung  | 119        |
| 11.7      | Halte- und Befestigungskonzepte   | 120        |
| 11.8      | Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit  | 120        |
| 11.9      | Zusammenfassung und Ausblick  | 121        |

|  |     |
|--|-----|
| <b>12 Radarsensorik</b>  | 123 |
| 12.1 Ausbreitung und Reflektion  | 123 |
| 12.2 Abstands- und Geschwindigkeitsmessung                                   | 126 |
| 12.2.1 Grundprinzip Modulation und Demodulation                              | 126 |
| 12.2.2 Doppler-Effekt  | 127 |
| 12.2.3 Mischen von Signalen  | 127 |
| 12.2.4 Pulsmodulation  | 129 |
| 12.2.5 Frequenzmodulation  | 131 |
| 12.3 Winkelmessung   | 140 |
| 12.3.1 Antennen-theoretische Vorbetrachtungen                                | 140 |
| 12.3.2 Scanning  | 141 |
| 12.3.3 Monopuls  | 142 |
| 12.3.4 Mehrstrahler  | 143 |
| 12.3.5 Dual-Sensor-Konzept   | 144 |
| 12.4 Hauptparameter der Leistungsfähigkeit                                   | 145 |
| 12.4.1 Abstand   | 145 |
| 12.4.2 Relativgeschwindigkeit  | 145 |
| 12.4.3 Azimutwinkel  | 146 |
| 12.4.4 Leistungsfähigkeit und Mehrzielfähigkeit                              | 146 |
| 12.4.5 24 GHz vs. 77 GHz   | 147 |
| 12.5 Signalverarbeitung und Tracking   | 148 |
| 12.6 Einbau und Justage  | 150 |
| 12.7 Elektromagnetische Verträglichkeit                                      | 151 |
| 12.8 Ausführungsbeispiele  | 152 |
| 12.8.1 Bosch LRR2  | 152 |
| 12.8.2 Bosch LRR3  | 153 |
| 12.8.3 Continental (A.D.C.) ARS200   | 157 |
| 12.8.4 Continental ARS 300   | 159 |
| 12.8.5 Delphi Forward Looking Radar (3. Generation)                          | 162 |
| 12.8.6 Delphi Electronic Scanning Radar (4. Generation)                      | 162 |
| 12.8.7 Hella 24 GHz-Mid Range Radar  | 166 |
| 12.8.8 TRW AC20  | 168 |
| 12.9 Zusammenfassung und Ausblick  | 169 |
| <b>13 Lidarsensorik</b>  | 172 |
| 13.1 Funktion, Prinzip   | 172 |
| 13.1.1 Begrifflichkeit   | 172 |
| 13.1.2 Messverfahren Distanzsensor   | 172 |
| 13.1.3 Aufbau  | 174 |
| 13.1.4 Transmissions- und Reflexionseigenschaften                            | 177 |
| 13.1.5 Trackingverfahren und Auswahl relevanter Ziele                        | 179 |
| 13.2 Applikation im Fahrzeug   | 181 |
| 13.2.1 Laserschutz   | 181 |
| 13.2.2 Integration für nach vorne gerichtete Sensoren (zum Beispiel für ACC) | 181 |
| 13.3 Zusatzfunktionen  | 182 |
| 13.4 Aktuelle Beispiele  | 183 |
| 13.5 Ausblick  | 185 |
| <b>14 3D-Imaging</b>   | 187 |
| 14.1 Einordnung und Erläuterung des Grundkonzeptes                           | 187 |
| 14.2 Vorteile und Applikationen  | 187 |
| 14.3 Grundsätzliche Lösungen zur 3D-Erfassung                                | 188 |
| 14.3.1 Formerfassung mit optisch inkohärenter Modulationslaufzeitmessung     | 189 |
| 14.3.2 Das PMD-Prinzip   | 191 |
| 14.4 Module eines PMD-Systems  | 192 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| 14.4.1    | PMD-Imager: 2D-Mischer und Integrator                      | 192 |
| 14.4.2    | Beleuchtung  | 194 |
| 14.4.3    | Weiterverarbeitung (Merkmalsextraktion, Objekttracking)    | 194 |
| 14.5      | Leistungsfähigkeit und Leistungsgrenzen des Gesamtsystems  | 196 |
| <b>15</b> | <b>Maschinelles Sehen</b>                                  | 198 |
| 15.1      | Bildsensor   | 198 |
| 15.1.1    | Hardwarekomponenten und Technologie                        | 198 |
| 15.1.2    | Projektive Abbildung                                       | 199 |
| 15.1.3    | Bildrepräsentation   | 201 |
| 15.2      | Bildverarbeitung   | 202 |
| 15.2.1    | Bildvorverarbeitung  | 202 |
| 15.2.2    | Merkmalsextraktion   | 205 |
| 15.3      | 3d-Rekonstruktion der Szenengeometrie                      | 208 |
| 15.3.1    | Stereoskopie   | 208 |
| 15.3.2    | Motion-Stereo  | 210 |
| 15.3.3    | Trifokal-Tensor  | 211 |
| 15.4      | Zeitliche Verfolgung                                       | 212 |
| 15.4.1    | Bayes-Filter   | 213 |
| 15.4.2    | Zeitliche Verfolgung mit dem Kalman-Filter                 | 214 |
| 15.5      | Anwendungsbeispiele  | 214 |
| 15.5.1    | Fahrstreifenerkennung                                      | 214 |
| 15.5.2    | Objektdetektion  | 216 |
| 15.6      | Zusammenfassung und Ausblick                               | 220 |
| <b>16</b> | <b>Kamerabasierte Fußgängerdetektion</b>                   | 223 |
| 16.1      | Anforderungen  | 223 |
| 16.2      | Mögliche Ansätze   | 224 |
| 16.3      | Beschreibung des Funktionsprinzips                         | 225 |
| 16.4      | Beschreibungen der Anforderungen an Hardware und Software  | 233 |
| 16.5      | Ausblick   | 234 |
| <b>17</b> | <b>Fusion umfelderfassender Sensoren</b>                   | 237 |
| 17.1      | Definition Sensordatenfusion                               | 237 |
| 17.1.1    | Ziele der Datenfusion                                      | 238 |
| 17.2      | Hauptkomponenten der Sensordatenverarbeitung               | 239 |
| 17.2.1    | Signalverarbeitung und Merkmalsextraktion                  | 239 |
| 17.2.2    | Datenassoziation   | 240 |
| 17.2.3    | Datenfilterung   | 242 |
| 17.2.4    | Klassifikation   | 242 |
| 17.2.5    | Situationsanalyse  | 243 |
| 17.3      | Architekturmuster zur Sensordatenfusion von Umfeldsensoren | 243 |
| 17.3.1    | Dezentral – Zentral – Hybrid                               | 243 |
| 17.3.2    | Rohdaten-Ebene – Merkmals-Ebene – Entscheidungs-Ebene      | 244 |
| 17.3.3    | Synchronisiert – Unsynchronisiert                          | 245 |
| 17.3.4    | Neue Daten – Datenkonstellation – Externes Ereignis        | 246 |
| 17.3.5    | Originaldaten – Gefilterte Daten – Prädizierte Daten       | 246 |
| 17.3.6    | Parallel – Sequenziell                                     | 246 |
| 17.4      | Abschließende Bemerkung                                    | 247 |
| <b>C</b>  | <b>Aktorik für Fahrerassistenzsysteme</b>                  | 249 |
| <b>18</b> | <b>Hydraulische Pkw-Bremssysteme</b>                       | 250 |
| 18.1      | Standardarchitektur  | 250 |
| 18.2      | Architektur der Elektrohydraulischen Bremse EHB            | 259 |
| 18.3      | Architektur eines Regenerativen Bremssystems (RBS)         | 267 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>19 Elektromechanische Bremssysteme</b> .....                               | 271 |
| 19.1 Elektromechanisches Bremssystem (EMB) .....                              | 271 |
| 19.1.1 Motivation .....   | 271 |
| 19.1.2 Systemarchitektur und Komponenten .....                                | 271 |
| 19.1.3 Betätigungseinrichtung .....   | 273 |
| 19.1.4 Zentralsteuergerät .....   | 275 |
| 19.1.5 Radbremsen-Aktor .....   | 275 |
| 19.1.6 Sensorik .....   | 276 |
| 19.1.7 Regelkonzepte .....  | 276 |
| 19.1.8 Energieversorgung .....  | 276 |
| 19.1.9 Kommunikationssystem (Bus-Struktur) .....                              | 277 |
| 19.2 Hybrid-Bremssystem .....   | 278 |
| 19.2.1 Motivation .....   | 278 |
| 19.2.2 Systemarchitektur und Komponenten .....                                | 278 |
| 19.2.3 Regelfunktionen .....  | 279 |
| 19.2.4 Hinterachs-Aktor .....   | 280 |
| 19.3 Elektrische Parkbremse (EPB) .....                                       | 280 |
| 19.3.1 Motivation .....   | 280 |
| 19.3.2 Systemarchitektur und Komponenten .....                                | 280 |
| 19.3.3 Schnittstellen des elektronischen Steuergeräts .....                   | 284 |
| 19.3.4 Funktionen der EPB .....   | 284 |
| <b>20 Lenkstellensysteme</b> .....  | 287 |
| 20.1 Allgemeine Anforderungen an Lenksysteme .....                            | 287 |
| 20.2 Basislösungen der Lenkunterstützung .....                                | 287 |
| 20.2.1 Die hydraulische Hilfskraftlenkung (HPS) .....                         | 287 |
| 20.2.2 Die parametrierbare hydraulische Hilfskraftlenkung .....               | 288 |
| 20.2.3 Die elektrohydraulische Hilfskraftlenkung (EHPS) .....                 | 289 |
| 20.2.4 Die elektromechanische Hilfskraftlenkung (EPS) .....                   | 290 |
| 20.2.5 Elektrische Komponenten .....  | 294 |
| 20.3 Lösungen zur Überlagerung von Momenten .....                             | 295 |
| 20.3.1 Zusatzaktor für hydraulische Lenksysteme .....                         | 296 |
| 20.3.2 Elektrische Lenksysteme .....  | 297 |
| 20.4 Lösungen zur Überlagerung von Winkeln .....                              | 299 |
| 20.4.1 Einleitung .....   | 299 |
| 20.4.2 Funktionalität .....   | 300 |
| 20.4.3 Stellervarianten .....   | 300 |
| 20.4.4 Einsatzbeispiel BMW E60 – ZFLS-Aktor am Lenkgetriebe .....             | 302 |
| 20.4.5 Einsatzbeispiel Audi A4 – ZFLS-Aktor in der Lenksäule .....            | 304 |
| 20.4.6 Einsatzbeispiel Lexus – koaxialer Lenksäulenaktor lenkwellenfest ..... | 307 |
| 20.5 Steer-by-Wire-Lenksystem und Einzelradlenkung .....                      | 309 |
| 20.5.1 Systemkonzept und Bauteile .....                                       | 310 |
| 20.5.2 Technik, Vorteile und Chancen .....                                    | 311 |
| <b>D Mensch-Maschine-Schnittstelle für Fahrerassistenzsysteme</b> .....       | 313 |
| 21 Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen .....                        | 314 |
| 21.1 Ein Arbeitsmodell von Mensch-Maschine-Schnittstellen .....               | 314 |
| 21.2 Grundeinteilung der Schnittstellen .....                                 | 315 |
| 21.2.1 Bedienelemente .....   | 315 |
| 21.2.2 Anzeige .....  | 316 |
| 21.3 Gestaltungsleitsätze und -prinzipien .....                               | 317 |
| 21.3.1 Gestaltungsleitsätze .....   | 317 |
| 21.3.2 Gestaltungsprinzipien .....  | 319 |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 21.4      | Gestaltungsprozess   | 320        |
| 21.5      | Praxis und Gestaltungsprozess                                      | 323        |
| <b>22</b> | <b>Bedienelemente</b>  | <b>325</b> |
| 22.1      | Anforderungen an Bedienelemente                                    | 325        |
| 22.2      | Bestimmung des Handlungsorgans, der Körperhaltung und der Greifart | 326        |
| 22.3      | Festlegung der Bedienteilart                                       | 326        |
| 22.4      | Vermeiden von unbefugtem und unbeabsichtigtem Stellen              | 326        |
| 22.5      | Festlegung der räumlichen Anordnung                                | 327        |
| 22.6      | Festlegung von Bedienrichtung, -weg und -widerstand                | 328        |
| 22.7      | Festlegung von Form, Abmessungen, Material und Oberfläche          | 328        |
| 22.8      | Kennzeichnung der Stellteile                                       | 329        |
| 22.9      | Alternative Bedienkonzepte   | 329        |
| <b>23</b> | <b>Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme</b>                         | <b>330</b> |
| 23.1      | Anforderungen an Displays im Kraftfahrzeug                         | 330        |
| 23.1.1    | Interaktionskanäle   | 330        |
| 23.1.2    | „Code of Practice“   | 330        |
| 23.2      | Heutige Displaykonzepte im Kraftfahrzeug                           | 331        |
| 23.2.1    | Kommunikationsbereiche im Fahrzeug                                 | 331        |
| 23.2.2    | Displays für das Kombiinstrument                                   | 332        |
| 23.2.3    | Head-up-Display (HUD)  | 334        |
| 23.2.4    | Zentrale Anzeige- und Bedieneinheit in der Mittelkonsole           | 335        |
| 23.2.5    | Displays für Nachtsichtsysteme                                     | 335        |
| 23.2.6    | Zusatzdisplays   | 336        |
| 23.3      | Anzeigen für das Kraftfahrzeug                                     | 336        |
| 23.3.1    | Elektromechanische Messwerke                                       | 337        |
| 23.3.2    | Aktive und passive Segmentdisplays                                 | 338        |
| 23.3.3    | Graphikanzeigen für Kombiinstrument und Mittelkonsole              | 340        |
| 23.4      | Zukünftige Displaykonzepte im Kraftfahrzeug                        | 341        |
| 23.4.1    | Kontaktanaloges Head-up-Display                                    | 341        |
| 23.4.2    | Laserprojektion  | 342        |
| <b>24</b> | <b>Fahrerwarnelemente</b>  | <b>343</b> |
| 24.1      | Einleitung   | 343        |
| 24.2      | Menschliche Informationsverarbeitung                               | 343        |
| 24.3      | Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine                        | 344        |
| 24.4      | Anforderungen an Warnelemente                                      | 345        |
| 24.5      | Beispiele für Warnelemente   | 345        |
| 24.5.1    | Warnelemente für die Längsführung                                  | 346        |
| 24.5.2    | Warnelemente der Querführung                                       | 347        |
| 24.6      | Voreinteilung von Warnelementen                                    | 348        |
| 24.7      | Bewertungskriterien für warnende Frontalkollisionsgegenmaßnahmen   | 350        |
| 24.8      | Ergebnisse für Frontalkollisionswarnungen                          | 352        |
| <b>E</b>  | <b>Fahrerassistenz auf Stabilisierungsebene</b>                    | <b>355</b> |
| <b>25</b> | <b>Bremsenbasierte Assistenzfunktionen</b>                         | <b>356</b> |
| 25.1      | Einleitung   | 356        |
| 25.2      | Grundlagen der Fahrdynamik   | 356        |
| 25.2.1    | Stationäres und instationäres Reifen- und Fahrverhalten            | 356        |
| 25.2.2    | Kenngrößen der Fahrdynamik   | 359        |
| 25.3      | ABS, ASR und MSR   | 360        |
| 25.3.1    | Regelkonzepte  | 360        |

## Inhaltsverzeichnis

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 25.4      | ESP  | 363        |
| 25.4.1    | Anforderungen  | 363        |
| 25.4.2    | Eingesetzte Sensoren   | 364        |
| 25.4.3    | Regelkonzept des ESP   | 366        |
| 25.4.4    | Sollwertbildung und Schätzung fahrdynamischer Größen                     | 374        |
| 25.4.5    | Sicherheitskonzept   | 379        |
| 25.5      | Mehrwertfunktionen   | 381        |
| 25.5.1    | Special Stability Support  | 381        |
| 25.5.2    | Special Torque Control   | 385        |
| 25.5.3    | Brake & Boost Assist   | 386        |
| 25.5.4    | Standstill & Speed Control   | 390        |
| 25.5.5    | Advanced Driver Assistance System Support                                | 392        |
| 25.5.6    | Monitoring & Information   | 393        |
| 25.6      | Unterschiede zu EHB-basierten Bremsregelsystemen                         | 393        |
| 25.7      | Ausblick   | 394        |
| <b>26</b> | <b>Fahrerassistenz auf der Stabilisierungsebene</b>                      | <b>395</b> |
| 26.1      | Fahrdynamikregelung mit Brems- und Lenkeingriff                          | 395        |
| 26.1.1    | Systemkontext und Benutzeranforderungen                                  | 396        |
| 26.1.2    | Konzept und Wirkprinzip der Brems- und Lenkregelung                      | 396        |
| 26.1.3    | Funktionsmodule zum Lenkwinkelangriff                                    | 398        |
| 26.1.4    | Funktionsmodule zur Fahrerlenkempfehlung                                 | 399        |
| 26.1.5    | Zukünftige Entwicklungen   | 401        |
| <b>27</b> | <b>Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder</b>                            | <b>404</b> |
| 27.1      | Fahrstabilität   | 404        |
| 27.2      | Bremsstabilität  | 407        |
| 27.3      | Für Fahrdynamikregelungen relevantes Unfallgeschehen von Motorrädern     | 410        |
| 27.4      | Stand der Technik der Bremsregelsysteme                                  | 410        |
| 27.4.1    | Hydraulische ABS-Bremsanlagen  | 411        |
| 27.4.2    | Elektrohydraulische Integralbremsanlagen                                 | 412        |
| 27.5      | Stand der Technik der Antriebsschlupfregelungssysteme                    | 415        |
| 27.6      | Zukünftige Fahrdynamikregelungen   | 417        |
| <b>28</b> | <b>Stabilisierungsassistentenfunktionen im Nutzfahrzeug</b>              | <b>422</b> |
| 28.1      | Einleitung   | 422        |
| 28.2      | Spezifika von ABS, ASR und MSR für Nutzfahrzeuge im Vergleich zum Pkw    | 422        |
| 28.2.1    | Nkw-spezifische Besonderheiten   | 422        |
| 28.2.2    | Regelungsziele und -prioritäten  | 424        |
| 28.2.3    | Systemaufbau, Steller  | 427        |
| 28.2.4    | Sonderfunktionen für Nkw   | 430        |
| 28.3      | Spezifika der Fahrdynamikregelung für Nutzfahrzeuge im Vergleich zum Pkw | 430        |
| 28.3.1    | Nkw-spezifische Besonderheiten   | 430        |
| 28.3.2    | Regelungsziele und -prioritäten  | 431        |
| 28.3.3    | Systemarchitektur  | 434        |
| 28.3.4    | Sonderfunktionen für Nkw   | 435        |
| 28.4      | Ausblick   | 435        |
| 28.4.1    | Fahrdynamikregelung für Gliederzüge                                      | 436        |
| 28.4.2    | Nutzung weiterer Steller   | 436        |
| <b>29</b> | <b>Lenkassistentenfunktionen</b>   | <b>438</b> |
| 29.1      | Lenkübersetzung  | 438        |
| 29.2      | Lenkmomentunterstützung  | 438        |
| 29.3      | Lenkwinkelunterstützung  | 441        |
| 29.3.1    | Ergonomie  | 442        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 29.3.2    | Lenkverhalten .....  | 442        |
| 29.4      | Fahrerunabhängige Lenkeingriffe .....  | 445        |
| 29.4.1    | Fahrverhalten und Fahrstabilität .....   | 445        |
| 29.4.2    | Assistenzfunktionen zur Bahnführung .....  | 445        |
| 29.5      | Fahrerakzeptanz .....  | 446        |
| 29.6      | Ausblick .....   | 446        |
| <b>F</b>  | <b>Fahrerassistenz auf Bahnführungs- und Navigationsebene .....</b>                      | <b>447</b> |
| <b>30</b> | <b>Sichtverbesserungssysteme .....</b>   | <b>448</b> |
| 30.1      | Häufigkeit von Verkehrsunfällen bei Nacht oder ungünstigen Witterungsverhältnissen ..... | 448        |
| 30.2      | Lichttechnische und fahrzeugtechnische Konsequenzen für Sichtverbesserungssysteme .....  | 452        |
| 30.3      | Derzeitige und zukünftige Scheinwerfersysteme zur Sichtverbesserung .....                | 455        |
| 30.3.1    | Sichtverbesserungssysteme auf der Basis der Lichtquellenentwicklung .....                | 455        |
| 30.3.2    | Sichtverbesserungssysteme auf Basis der adaptiven Lichtverteilung .....                  | 456        |
| 30.3.3    | Sichtverbesserungssysteme auf Basis der assistierenden Lichtverteilung .....             | 462        |
| 30.4      | Nachtsichtsysteme .....  | 465        |
| 30.4.1    | Sensorik für Nachtsichtsysteme im Kraftfahrzeug .....                                    | 465        |
| 30.4.2    | Anzeigen für Nachtsichtsysteme im Kraftfahrzeug .....                                    | 468        |
| 30.4.3    | Bildverarbeitung .....   | 469        |
| 30.4.4    | Vergleich der Systemansätze .....  | 469        |
| <b>31</b> | <b>Einparkassistenz .....</b>  | <b>471</b> |
| 31.1      | Abstufungen der Einparkassistenz .....   | 471        |
| 31.2      | Anforderungen an Einparkassistenzsysteme .....   | 471        |
| 31.3      | Technische Realisierungen .....  | 472        |
| 31.3.1    | Informierende Einparkassistenzsysteme .....  | 472        |
| 31.3.2    | Geführte Einparkassistenz .....  | 473        |
| 31.3.3    | Semiautomatisches Einparken .....  | 475        |
| 31.4      | Ausblick .....   | 476        |
| <b>32</b> | <b>Adaptive Cruise Control .....</b>   | <b>478</b> |
| 32.1      | Einleitung .....   | 478        |
| 32.2      | Rückblick auf die Entwicklung von ACC .....  | 479        |
| 32.3      | Anforderungen .....  | 480        |
| 32.3.1    | Funktionsanforderungen für Standard-ACC nach ISO 15622 .....                             | 480        |
| 32.3.2    | Zusätzliche Funktionsanforderungen für FSR-ACC nach ISO 22179 .....                      | 481        |
| 32.4      | Systemstruktur .....   | 482        |
| 32.4.1    | Beispiel Mercedes-Benz Distronic .....   | 482        |
| 32.4.2    | Beispiel BMW FSR-ACC-System .....  | 483        |
| 32.4.3    | Funktionsabstufungen .....   | 483        |
| 32.5      | ACC-Zustandsmanagement und Mensch-Maschine-Schnittstelle .....                           | 485        |
| 32.5.1    | Systemzustände und Zustandsübergänge .....   | 485        |
| 32.5.2    | Bedienelemente mit Ausführungsbeispielen .....   | 487        |
| 32.5.3    | Anzeigeelemente mit Ausführungsbeispielen .....  | 488        |
| 32.6      | Zielobjekterkennung für ACC .....  | 491        |
| 32.6.1    | Anforderungen an die Umfeldsensorik .....  | 491        |
| 32.6.2    | Messbereiche und Messgenauigkeit .....   | 491        |
| 32.7      | Zielauswahl .....  | 496        |
| 32.7.1    | Bestimmung der Kurskrümmung .....  | 497        |
| 32.7.2    | Kursprädiktion .....   | 498        |
| 32.7.3    | Fahrschlauch .....   | 498        |
| 32.7.4    | Weitere Kriterien für die Zielauswahl .....  | 500        |
| 32.7.5    | Grenzen der Zielauswahl .....  | 501        |

## Inhaltsverzeichnis

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 32.8      | Folgeregelung                                     | 502        |
| 32.8.1    | Grundsätzliche Betrachtungen zur Folgeregelung    | 502        |
| 32.8.2    | Fuzzy-Folgeregler                                 | 506        |
| 32.9      | Zielverluststrategien und Kurvenregelung          | 506        |
| 32.9.1    | Annäherungsstrategien                             | 509        |
| 32.9.2    | Überholunterstützung                              | 509        |
| 32.9.3    | Reaktion auf stehende Ziele                       | 510        |
| 32.9.4    | Anhalteregelung, Spezifika der Low-Speed-Regelung | 510        |
| 32.10     | Längsregelung und Aktorik                         | 510        |
| 32.10.1   | Grundstruktur und Koordination Aktorik            | 510        |
| 32.10.2   | Bremse  | 511        |
| 32.10.3   | Antrieb   | 513        |
| 32.11     | Nutzungs- und Sicherheitsphilosophie              | 515        |
| 32.11.1   | Nachvollziehbarkeit der Funktion                  | 515        |
| 32.11.2   | Systemgrenzen                                     | 515        |
| 32.12     | Sicherheitskonzept                                | 516        |
| 32.13     | Nutzer- und Akzeptanzstudien                      | 517        |
| 32.13.1   | Akzeptanz   | 517        |
| 32.13.2   | Nutzung   | 517        |
| 32.13.3   | Kompensationsverhalten                            | 518        |
| 32.13.4   | Habituationseffekte                               | 519        |
| 32.13.5   | Übernahmesituationen                              | 519        |
| 32.13.6   | Komfortbeurteilung                                | 520        |
| 32.14     | Ausblick  | 520        |
| 32.14.1   | Aktuelle Entwicklungen                            | 520        |
| 32.14.2   | Funktionserweiterungen                            | 520        |
| <b>33</b> | <b>Frontalkollisionsschutzsysteme</b>             | <b>522</b> |
| 33.1      | Problemstellung                                   | 522        |
| 33.2      | Frontalunfallschutz durch präventive Assistenz    | 523        |
| 33.3      | Reaktionsunterstützung                            | 523        |
| 33.4      | Notmanöver  | 524        |
| 33.5      | Bremsassistentz                                   | 524        |
| 33.5.1    | Basisfunktion                                     | 524        |
| 33.5.2    | Weiterentwicklungen                               | 527        |
| 33.6      | Warn- und Eingriffszeitpunkte                     | 528        |
| 33.6.1    | Fahrdynamische Betrachtungen                      | 528        |
| 33.6.2    | Frontalkollisionsgegenmaßnahmen                   | 535        |
| 33.6.3    | Nutzenpotenzial für Kollisionsgegenmaßnahmen      | 537        |
| 33.6.4    | Anforderungen an die Umfelderkennung              | 539        |
| 33.7      | Ausblick  | 540        |
| <b>34</b> | <b>Lane Departure Warning</b>                     | <b>543</b> |
| 34.1      | Fahrstreifenerkennungssysteme und ihre Anwendung  | 543        |
| 34.2      | Ein Blick auf die Unfalldaten                     | 543        |
| 34.3      | Fahrstreifenerkennungssysteme                     | 545        |
| 34.3.1    | Umwelteinflüsse und begrenzen Faktoren            | 546        |
| 34.3.2    | Länderspezifische Unterschiede                    | 547        |
| 34.4      | Funktionsausprägungen                             | 548        |
| 34.4.1    | Lane Departure Warning-System (LDW)               | 548        |
| 34.4.2    | Advanced Lane Departure Warning-System (ALDW)     | 549        |
| 34.4.3    | Lane Keeping Support (LKS)                        | 550        |
| 34.4.4    | Lane Departure Prevention (LDP)                   | 551        |
| 34.5      | Erwartung für den Markt                           | 551        |

|   |     |
|---|-----|
| <b>35 Lane Keeping Support</b> .....                          | 554 |
| 35.1 Funktionsübersicht .....                                 | 554 |
| 35.2 Lösungsansätze und technische Realisierung .....         | 556 |
| 35.2.1 Fahrstreifenerkennung .....                            | 556 |
| 35.2.2 Regelstrategie .....                                   | 557 |
| 35.2.3 Mensch-Maschine-Schnittstelle .....                    | 558 |
| 35.2.4 Aktoren .....  | 558 |
| 35.3 Grenzen des Systems .....                                | 559 |
| 35.4 Ausblick .....   | 559 |
| <b>36 Fahrstreifenwechselassistentz</b> .....                 | 562 |
| 36.1 Motivation .....   | 562 |
| 36.2 Anforderungen .....                                      | 562 |
| 36.3 Klassifikation der Systemfunktionalität .....            | 563 |
| 36.3.1 Klassifikation nach Leistung der Umfelderkennung ..... | 564 |
| 36.3.2 Systemzustandsdiagramm .....                           | 564 |
| 36.4 Lösungen und beispielhafte Umsetzungen .....             | 565 |
| 36.4.1 „Blind Spot Information System“ (BLIS) von Volvo ..... | 566 |
| 36.4.2 „Toter Winkel Detektor“ von Peugeot .....              | 566 |
| 36.4.3 „Totwinkel-Assistent“ von Mercedes-Benz .....          | 566 |
| 36.4.4 „Audi Side Assist“/„Side Assist“ von VW .....          | 568 |
| 36.4.5 Zusammenfassung .....                                  | 569 |
| 36.5 Erreichte Leistungsfähigkeit .....                       | 570 |
| 36.6 Weiterentwicklungen .....                                | 571 |
| <b>37 Kreuzungsassistentz</b> .....                           | 572 |
| 37.1 Unfallgeschehen an Kreuzungen .....                      | 572 |
| 37.2 Kreuzungsassistentzsysteme .....                         | 572 |
| 37.2.1 STOP-Schild-Assistentz .....                           | 573 |
| 37.2.2 Ampelassistentz .....                                  | 574 |
| 37.2.3 Einbiege-/Kreuzenassistentz .....                      | 575 |
| 37.2.4 Linksabbiegeassistentz .....                           | 576 |
| 37.3 Situationsbewertung .....                                | 578 |
| 37.4 Geeignete Warn- und Eingriffsstrategien .....            | 578 |
| 37.5 Herausforderungen bei der Umsetzung .....                | 579 |
| <b>38 Bahnführungsassistentz für Nutzfahrzeuge</b> .....      | 582 |
| 38.1 Anforderungen an die Fahrer von Nutzfahrzeugen .....     | 582 |
| 38.2 Wesentliche Unterschiede zwischen Lkw und Pkw .....      | 584 |
| 38.3 Unfallszenarien .....                                    | 586 |
| 38.4 Adaptive Cruise Control (ACC) für Nutzfahrzeuge .....    | 588 |
| 38.5 Spurverlassenswarner für Nutzfahrzeuge .....             | 592 |
| 38.6 Notbremssysteme .....                                    | 595 |
| 38.7 Entwicklung für die Zukunft .....                        | 596 |
| <b>39 Navigation und Telematik</b> .....                      | 599 |
| 39.1 Historie .....   | 599 |
| 39.2 Navigation im Fahrzeug .....                             | 600 |
| 39.2.1 Ortung .....   | 601 |
| 39.2.2 Zieleingabe .....                                      | 604 |
| 39.2.3 Routensuche .....                                      | 605 |
| 39.2.4 Zielführung .....                                      | 606 |
| 39.2.5 Kartendarstellung .....                                | 607 |
| 39.2.6 Dynamisierung .....                                    | 608 |
| 39.2.7 Korridor und Datenabstraktion (Datenträger) .....      | 608 |

## Inhaltsverzeichnis

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 39.3      | Offboard-Navigation  | 609        |
| 39.4      | Hybrid-Navigation  | 609        |
| 39.4.1    | Kartendaten – aktuell und individuell  | 611        |
| 39.5      | Assistenzfunktionen  | 612        |
| 39.6      | Verkehrstelematik  | 612        |
| 39.6.1    | Rundfunkbasierte Technologien  | 613        |
| 39.6.2    | Mobilfunkbasierte Technologien   | 614        |
| 39.6.3    | Telematik Basisdienste   | 616        |
| 39.6.4    | Car-to-Car-Kommunikation, Car-to-Infrastructure-Kommunikation                                | 617        |
| 39.6.5    | Mautsysteme  | 618        |
| 39.6.6    | Moderne Verkehrssteuerung  | 618        |
| 39.6.7    | Zukünftige Entwicklung von Telematikdiensten   | 619        |
| 39.7      | Herausforderungen für Navigation und Telematik   | 620        |
| 39.7.1    | Consumer-Elektronik (CE) versus Automobil-Elektronik (AE)                                    | 620        |
| 39.7.2    | Aufbau   | 622        |
| 39.7.3    | Entwicklungsprozess  | 622        |
| <b>G</b>  | <b>Zukunft der Fahrerassistenzsysteme</b>  | <b>625</b> |
| <b>40</b> | <b>Das mechatronische Fahrwerk der Zukunft</b>   | <b>626</b> |
| 40.1      | Das vernetzte Chassis  | 626        |
| 40.2      | Motivationen für Brake-by-Wire-Systeme   | 629        |
| 40.3      | Ausblick   | 629        |
| <b>41</b> | <b>Antikollisionssystem PRORETA – Integrierte Lösung für ein unfallvermeidendes Fahrzeug</b> | <b>632</b> |
| 41.1      | Einleitung   | 632        |
| 41.2      | Ausstattung des Versuchsfahrzeugs  | 632        |
| 41.3      | Umfeldererkennung durch Sensordatenfusion  | 634        |
| 41.4      | Eingriffsentscheidung für ein Notmanöver   | 634        |
| 41.5      | Algorithmen zur Fahrzeugregelung   | 636        |
| 41.6      | Zusammenspiel zwischen Fahrer und Fahrerassistenzsystem                                      | 637        |
| 41.6.1    | Ziel der Untersuchung  | 637        |
| 41.6.2    | Versuchskonzept  | 638        |
| 41.6.3    | Ergebnisse   | 639        |
| 41.6.4    | Fazit aus den Probandenversuchen   | 641        |
| 41.7      | Erprobung des Fahrerassistenzsystems in Fahrversuchen  | 642        |
| 41.7.1    | Umfelderfassung mit Laserscanner und Videosensor   | 642        |
| 41.7.2    | Blockierte Spur  | 643        |
| 41.7.3    | Einscherendes Fahrzeug   | 645        |
| 41.8      | Schlussbemerkung   | 645        |
| <b>42</b> | <b>Kooperative Automation</b>  | <b>647</b> |
| 42.1      | Einleitung und Motivation  | 647        |
| 42.2      | Aspekte der kooperativen Automation  | 648        |
| 42.2.1    | Parallel-simultane Assistenz   | 648        |
| 42.2.2    | Parallel-sequenzielle Assistenz  | 649        |
| 42.2.3    | Seriell-simultane Assistenz  | 649        |
| 42.2.4    | Seriell-sequenzielle Assistenz   | 649        |
| 42.2.5    | Weitere ergonomische Aspekte einer kooperativen Fahrzeugführung                              | 650        |
| 42.3      | Umsetzungen  | 651        |
| 42.3.1    | Conduct-by-Wire  | 651        |
| 42.3.2    | H-Mode – die Umsetzung der Horse-Metapher  | 653        |
| 42.4      | Fazit und Ausblick   | 655        |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>43</b> | <b>Autonomes Fahren</b>                               | 657 |
| 43.1      | Urban Challenge 2007                                  | 657 |
| 43.1.1    | Systemaufbau  | 658 |
| 43.1.2    | Software-Architektur                                  | 659 |
| 43.1.3    | Informationsverarbeitungskette                        | 660 |
| 43.1.4    | Erfassung der Umgebung                                | 661 |
| 43.1.5    | Dynamische Objekte                                    | 661 |
| 43.1.6    | Fahrstreifenerkennung                                 | 661 |
| 43.1.7    | Missions- und Manöverplanung                          | 661 |
| 43.1.8    | Regelung  | 663 |
| 43.2      | Zusammenfassung                                       | 663 |
| <b>44</b> | <b>Quo vadis, FAS?</b>                                | 664 |
| 44.1      | Integrierte Bedienkonzepte für Fahrerassistenzsysteme | 664 |
| 44.2      | Verbesserung der Umweltbilanz durch FAS               | 664 |
| 44.3      | Mobilitätssteigerung durch FAS                        | 665 |
| 44.4      | Aktive Kollisionsvermeidung                           | 666 |
| 44.5      | Autonomes Fahren                                      | 667 |
| 44.5.1    | Problemfeld Zulassung                                 | 668 |
| 44.5.2    | Ausweg aus dem Testdilemma                            | 669 |
| 44.5.3    | Möglicher Weg zu einer Metrik                         | 671 |
| 44.6      | Evolution der Fahrerassistenzsysteme                  | 672 |
| <b>H</b>  | <b>Glossar</b>  | 674 |
|           | <b>Sachwortverzeichnis</b>                            | 682 |

# Einleitung

---

Das Thema Fahrerassistenzsysteme ist bei Automobilherstellern, Zulieferern und in der universitären Forschung seit geraumer Zeit aktuell und hat in den vergangenen Jahren auch das Interesse der Öffentlichkeit geweckt. Die Zahl der am Markt verfügbaren Systeme und ihr Funktionsumfang zur Unterstützung des Fahrers bei der Ausführung der Fahraufgabe nehmen stetig zu. Bedingt durch die jüngsten Entwicklungen wird der Begriff Fahrerassistenzsysteme (in unserer abgekürzten Welt kurz mit FAS bezeichnet) heute zumeist mit Systemen der Aktiven Sicherheit, d. h. Systemen, die das Eintreten eines Unfalls verhindern, in Verbindung gebracht. Tatsächlich kann dieser Begriff jedoch sehr viel breiter gefasst werden, denn schon mit der Erfindung des elektrischen Starters, der die manuelle Kurbel ablöste, war ein erstes Fahrerassistenzsystem geboren, das das Fahren erleichterte. Auch Dinge wie die automatische Blinkerhebelrückstellung oder das synchronisierte Handschaltgetriebe werden heute als Selbstverständlichkeiten angesehen, sind im eigentlichen Sinne jedoch als Fahrerassistenzsysteme zu verstehen.

Eine Einteilung der Fahrerassistenzsysteme kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen. In diesem Buch sind die Themen anhand des 3-Ebenen-Modells von Donges aus dem Jahr 1982 kategorisiert (ausführlich erläutert wird dieses Modell in Kapitel 2). Bei dieser Einteilung wird unterschieden, auf welcher der drei Ebenen der Fahraufgabe – Stabilisierung, Bahnführung, Navigation – das Fahrerassistenzsystem agiert. ABS und ESP sind z. B. Systeme, die den Fahrer auf der Stabilisierungsebene unterstützen und ihm so helfen, die Gewalt über sein Fahrzeug zu behalten. ACC, präventive Kollisionsschutz-, aber auch Sichtverbesserungssysteme wirken auf der Bahnführungsebene, indem sie dem Fahrer bei der Trajektorienwahl und -haltung Hilfestellungen bieten. Die Aufgaben auf Navigationsebene schließlich werden heutzutage durch hochentwickelte Navigations- und Verkehrstelematiksysteme unterstützt, die ihre Wirkung nicht auf das einzelne Fahrzeug beschränken, sondern in ganzen Teilbereichen des Netzes die Verkehrsströme beeinflussen.

Allen Fahrerassistenzsystemen ist gemein, dass ihr Assistenzziel in der Deckung eines Assistenzbedarfs beim Fahrer liegt. Dieser Assistenzbedarf kann darin bestehen, in gefährlichen Situationen unter-

stützt zu werden, oder darin, die Leistungsgrenzen der menschlichen Wahrnehmung zu überwinden, wie es z. B. bei den Sichtverbesserungssystemen der Fall ist. Die Erreichung dieses Assistenzziels erfolgt mittels einer Assistenzfunktion, deren Umsetzung eine entsprechende Sensorik und Aktorik erfordert. Dabei kann eine Assistenzfunktion je nach Konzept mit unterschiedlicher Sensorik und Aktorik realisiert werden; als Beispiel seien Kollisionswarnsysteme genannt, bei denen je nach Hersteller Lidar-, Radar- und/oder Videosensorik zum Einsatz kommt. Assistenzbedarf (der Fahrer hat nur eine begrenzte Reaktionsfähigkeit und ist u. U. unaufmerksam) und Assistenzziel (rechtzeitige Warnung vor einer drohenden Kollision) sowie Funktionsziel (Erkennung von Hindernissen, bei denen die Gefahr einer Kollision besteht) sind dabei gleich und unabhängig vom gewählten Sensorkonzept.

Das vorliegende Handbuch Fahrerassistenzsysteme liefert eine umfassende Darstellung sowohl der Sensorik und Aktorik, die in heutigen Systemen verwendet werden, als auch der Funktionen, die mit diesen Systemen umgesetzt werden. Alle wesentlichen zum Zeitpunkt des Verfassens der Beiträge auf dem Markt erhältlichen Systeme sind in diesem Buch vertreten, ebenso wie einige Weiterentwicklungen, die sich noch im Forschungs- bzw. Entwicklungsstadium befinden. Sehr einfache Fahrerassistenzsysteme wie z. B. die automatische Scheibenwischersteuerung oder Lichtautomatik wurden aus Umfangsgründen nicht berücksichtigt, ebenso wie Komfortfunktionen, die keinen direkten Bezug zur Fahraufgabe haben, wie beispielsweise die automatische Klimaregelung.

Ausgangspunkt und Zentrum der Betrachtungen ist der Fahrer, der durch die Assistenzsysteme unterstützt werden soll. In **Teil A: Grundlagen der Fahrerassistenzsystem-Entwicklung** wird daher die Leistungsfähigkeit des Menschen und sein Verhalten bei der Fahrzeugführung beschrieben und dargelegt, welche Auswirkungen auf die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen sich daraus ergeben. Weitere Grundlagen, die im ersten Teil behandelt werden, sind Entwurf, Test und Bewertung der Systeme sowie ihre Einbindung in die Gesamtfahrzeugarchitektur.

**Teil B** und **C** des Buches behandeln **Sensorik und Aktorik für Fahrerassistenzsysteme**. Teil B beinhaltet dabei auch die Fusion der Daten

## Einleitung

umfelderfassender Sensoren und die Herausforderungen, die sich auf dem Gebiet des maschinellen Sehens stellen.

Aufbauend auf Teil A beschäftigt sich **Teil D: Mensch-Maschine-Schnittstelle für Fahrerassistenzsysteme** mit den Anforderungen an eine nutzergerechte Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie der Anzeigetechnologien, die dabei zum Einsatz kommen.

Die **Teile E und F: Fahrerassistenz auf Stabilisierungsebene bzw. Fahrerassistenz auf Bahnführungs- und Navigationsebene** enthalten detaillierte Darstellung von Systemen, wie sie derzeit im Pkw- und Lkw-Bereich sowie bei Motorrädern zum Einsatz kommen. Diese beiden Teile bilden damit das Kernstück des vorliegenden Handbuchs.

Der **Teil G: Zukunft der Fahrerassistenzsysteme** schildert aktuelle Herausforderungen, denen sich Forschung und Entwicklung im Bereich Fahrerassistenzsysteme stellen müssen und wagt mit einem abschließenden „Quo vadis, FAS?“ einen Blick auf die zukünftigen Entwicklungen.

Wir wünschen allen Lesern viel Freude mit diesem Handbuch und hoffen, dass es sich für all jene als nützlich erweisen wird, die es als Nachschlagewerk nutzen oder sich mit seiner Hilfe in das spannende Thema der Fahrerassistenzsysteme einarbeiten wollen. Anregungen, Verbesserungsvorschläge und konstruktive Kritik im Allgemeinen zu dieser ersten Auflage sind uns sehr willkommen und erreichen uns unter der E-Mail-Adresse: [fas-buch@fzd.tu-darmstadt.de](mailto:fas-buch@fzd.tu-darmstadt.de).

Darmstadt, im Mai 2009

Prof. Dr. rer. nat. *Hermann Winner*  
Dipl.-Ing. *Stephan Hakuli*  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. *Gabriele Wolf*

# Grundlagen

## der Fahrerassistenzsystementwicklung

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung</b>                            | <b>4</b>  |
| <b>2 Fahrerverhaltensmodelle</b>  | <b>15</b> |
| <b>3 Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit</b>   | <b>24</b> |
| <b>4 Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen</b> | <b>33</b> |
| <b>5 Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen</b>   | <b>43</b> |
| <b>6 Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen</b>  | <b>55</b> |
| <b>7 EVITA – Das Prüfverfahren zur Beurteilung von Antikollisionssystemen</b>                   | <b>69</b> |
| <b>8 Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation</b>       | <b>76</b> |
| <b>9 Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Systemarchitektur im Kraftfahrzeug</b>       | <b>84</b> |

## 1 Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung

Bettina Abendroth, Ralph Bruder

Die Arbeitsaufgabe Kraftfahrzeugführen zählt zu den vorwiegend informatorischen Tätigkeiten mit dem Arbeitsinhalt, Informationen in Reaktionen umzusetzen. Der Fahrer führt hierbei in der Regel eine Steuerungstätigkeit mit kontinuierlicher Informationsverarbeitung aus.

Dementsprechend sind für die Fahrzeugführung vor allem der Prozess der Informationsverarbeitung sowie mit diesem in Wechselwirkung stehende Faktoren der individuellen Charakteristik des Fahrers von Bedeutung.

Zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umgebung dient das im Folgenden dargestellte einfache Systemmodell (vgl. [1]). Dieses besteht aus den Elementen Fahrer und Fahrzeug. Die Eingangsgröße Fahrzeugführungsaufgabe, die auch von den Umgebungsfaktoren beeinflusst wird, wirkt auf diese zwei Systemelemente. Darüber hinaus können Störgrößen wie z. B. Ablenkungen durch den Beifahrer auftreten. Die

Ausgangsgröße aus diesem System kann durch die Systemleistungen Mobilität, Sicherheit und Komfort beschrieben werden.

### 1.1 Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess

Zur Erklärung der menschlichen Informationsverarbeitung gibt es eine Vielzahl von Modellen, diese spezifizieren die allgemeine Annahme, dass das in einem Rezeptor eintreffende Signal (Stimulus) in eine kognitive Repräsentation und in eine Reaktion des Menschen (Response) umgesetzt wird. Zu den bekanntesten Modellen im Ingenieurbereich zählen die sequenziellen sowie die Ressourcenmodelle. Sequenzielle Modelle unterstellen, dass die Transformation von Stimulus in Response streng sequenziell abläuft, d. h. die nächste Stufe kann erst durch-

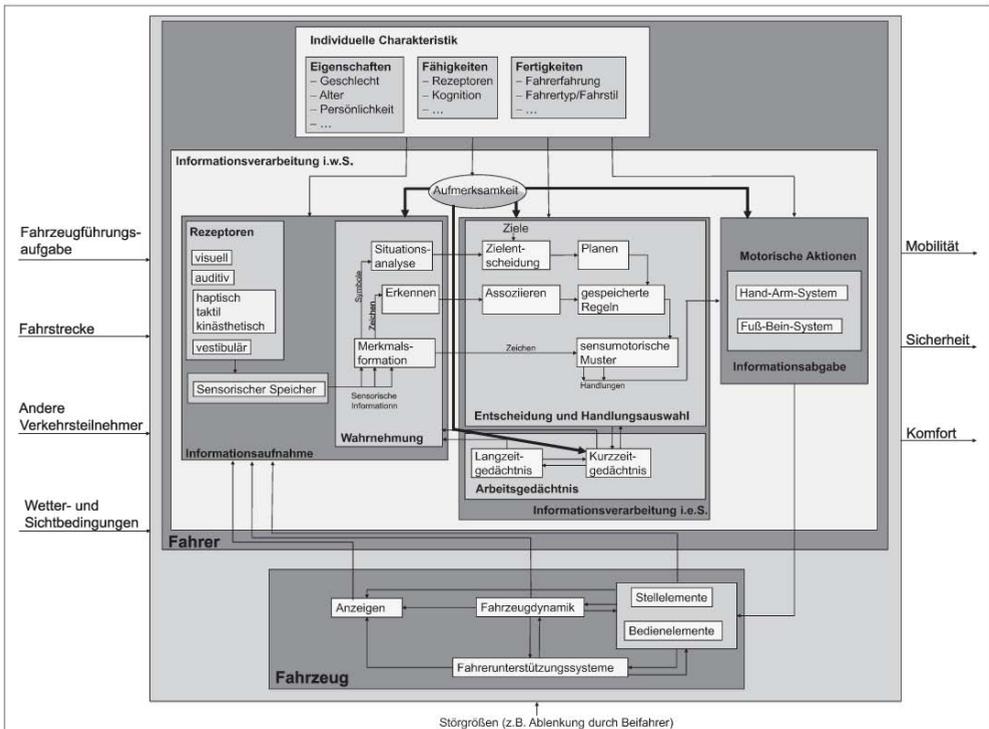


Bild 1-1: Systemmodell Fahrer-Fahrzeug-Umgebung (vgl. [1])

laufen werden, wenn die vorige abgeschlossen ist. Ressourcenmodelle stützen sich auf die Annahme, dass die Kapazität, die für verschiedene Aktivitäten zur Verfügung steht, beschränkt ist und zwischen allen gleichzeitig ausgeführten Aufgaben aufgeteilt werden muss. Die Theorie der multiplen Ressourcen erweitert diese Sichtweise; gemäß dieser hängt das Ausmaß an Interferenz zweier Aufgaben davon ab, ob diese die gleichen Ressourcen beanspruchen [2]. Frei von Interferenz wäre demnach die gleichzeitige Verarbeitung visueller, räumlicher Bildinformationen (z. B. Zielführungsanzeige) und auditiver, verbaler Informationen (Telefongespräch, Nachrichten im Radio), da diese unterschiedliche Sinneskanäle und unterschiedliche Bereiche im Arbeitsgedächtnis nutzen. Experimentelle Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass diese Freiheit von Interferenz nicht uneingeschränkt gilt.

Die menschliche Informationsverarbeitung wird hier anhand eines kombinierten Stufen- und Ressourcenmodells erklärt (siehe **Bild 1-1**). Dieses basiert auf den Verarbeitungsstufen Informationsaufnahme (Perzeption), Informationsverarbeitung i. e. S. (Kognition) und Informationsabgabe (Motorik) [3]. Darüber hinaus wird berücksichtigt, dass die zur Verfügung stehende Ressourcenkapazität beschränkt ist.

Die Effizienz der drei Verarbeitungsstufen des Informationsverarbeitungsprozesses wird durch die zur Verfügung stehenden Verarbeitungsressourcen beeinflusst und benötigt die Zuwendung von Aufmerksamkeit. Diese bewirkt die gezielte Selektion von Informationen, die zu Inhalten der bewussten Verarbeitung werden sollen. Denn das ständige Überangebot an Informationen übersteigt die menschliche Verarbeitungskapazität, sodass der Mensch bei Weitem nicht alles bewusst wahrnehmen kann, was ihn auf der Ebene der Sinnesrezeptoren erreicht.

Der Mensch kann seine gesamte Aufmerksamkeit unterschiedlich auf die drei Stufen des Informationsverarbeitungsprozesses verteilen, um relevante Informationsquellen auszuwählen und diese Informationen weiterzuverarbeiten. Für jede Arbeitstätigkeit kann eine günstige Aufmerksamkeitsverteilung vom Menschen erlernt werden, im Extremfall kann eine schlechte Aufmerksamkeitsverteilung menschliche Fehlhandlungen verursachen.

Auf theoretischer Ebene können verschiedene Formen der Aufmerksamkeit in den Dimensionen Selektivität und Intensität unterschieden werden. Mit der selektiven Aufmerksamkeitszuwendung wird die Tatsache beschrieben, dass der Mensch sich zwischen verschiedenen, miteinander konkurrierenden Informationsquellen entscheiden muss.

Im Rahmen der geteilten Aufmerksamkeit muss der Mensch verschiedene Reize simultan wahrnehmen, während er sich bei einem Aufmerksamkeitswechsel von einem Reiz abwendet, um sich anschließend einem anderen zuzuwenden. Die Intensität der Aufmerksamkeit betrifft das Aktivierungsniveau, hierbei sind die herabgesetzte Vigilanz (niedriger Anteil relevanter Stimuli) und die Daueraufmerksamkeit (hoher Anteil relevanter Stimuli) von Bedeutung.

### 1.1.1 Informationsaufnahme

Der Informationsaufnahme werden alle Prozesse zugeordnet, die das Entdecken und Erkennen von Informationen betreffen. Dabei wird der Vorgang der internen Repräsentation der Umwelt als Wahrnehmung bezeichnet. Dieses innere Abbild der Umwelt wird beeinflusst von der aktuellen Situation, in der sich der Mensch befindet, und den Erfahrungen, über die dieser verfügt. Die Informationsaufnahme erfolgt über die Sinnesorgane. Der Mensch kann eine Vielzahl gleichzeitig übermittelter Informationen parallel über alle Sinneskanäle aufnehmen, allerdings kann die gleichzeitige Verarbeitung verschiedener Informationen die Leistung verschlechtern. Die spezifischen Leistungsbereiche der Sinnesorgane beeinflussen Quantität und Qualität der aufgenommenen Informationen und somit auch alle folgenden Informationsverarbeitungsschritte. Dem menschlichen Wahrnehmungssystem werden neun sensorische Modalitäten zugeordnet. Für die Fahrzeugführung sind jedoch vor allem visuelle, akustische, haptische und vestibuläre Wahrnehmungen von Bedeutung. Darüber hinaus verfügt der Mensch über Rezeptoren zur Wahrnehmung von Geruch, Geschmack, Temperatur und Schmerz. Zusätzlich wird der sensorische Speicher (auch Ultrakurzzeitgedächtnis genannt) dem Bereich der Informationsaufnahme zugeordnet. Im sensorischen Speicher werden ausschließlich physikalisch kodierte Informationen gespeichert. Visuelle Informationen werden im ikonischen, akustische im echoischen Speicher für einen Zeitraum zwischen 0,25 und 2 Sekunden abgelegt [3].

Bei der visuellen Informationsaufnahme hat das Auge folgende drei Grundaufgaben: Adaptation (Anpassung der Empfindlichkeit des Auges an die jeweils herrschende Leuchtdichte), Akkomodation (Einstellung unterschiedlicher Sehentfernungen) und Fixation (Ausrichtung der Augen auf den Sehgegenstand, sodass die beiden Sehachsen konvergent sind). Das Auge dient der Farb-, Objekt- und Bewegungswahrnehmung sowie der Wahrnehmung von räumlicher Tiefe und Größe.