

## Band I

### I Grundlagen der Fahrerassistentenentwicklung

1	<b>Menschliche Leistung bei der Fahrzeugführung .....</b>	3
	<i>Bettina Abendroth und Philip Joisten</i>	
1.1	<b>Relevanz der menschlichen Leistung für die Fahrzeugführung .....</b>	5
1.2	<b>Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess .....</b>	6
1.2.1	Informationsaufnahme .....	8
1.2.2	Informationsverarbeitung .....	10
1.2.3	Informationsabgabe .....	11
1.3	<b>Determinanten des menschlichen Leistungsangebotes .....</b>	12
1.3.1	Alter .....	12
1.3.2	Persönlichkeitsmerkmale .....	14
1.3.3	Fahrerfahrung .....	14
1.3.4	Ermüdung .....	15
1.4	<b>Anforderungen an Fahrzeugführende im System Fahrer-Fahrzeug-Umgebung .....</b>	15
1.4.1	Teilaufgaben der Fahrzeugführung .....	16
1.4.2	Anforderungen aus der Fahrzeugführungsaufgabe .....	16
1.5	<b>Bewertung der Anforderungen aus der Fahrzeugführungsaufgabe im Hinblick auf das menschliche Leistungsangebot .....</b>	18
1.5.1	Informationsquellen, Sinnes- und Wahrnehmungsprozesse .....	18
1.5.2	Beurteilungsleistungen .....	20
1.5.3	Entscheidungs- und Denkprozesse .....	21
1.5.4	Fahrzeugbedienung .....	22
	Literatur .....	22
2	<b>Klassifizierung automatisierter Fahrfunktionen .....</b>	25
	<i>Elisabeth Shi und Tom Michael Gasser</i>	
2.1	<b>Einleitung .....</b>	26
2.2	<b>Was wird klassifiziert? .....</b>	27
2.2.1	Unterscheidung zwischen Fahrzeugen, Systemen und Funktionen .....	27
2.2.2	Unterscheidung zwischen Navigation, Stabilisation und Bahnführung .....	27
2.2.3	Geltungsbereich der Klassifikationen .....	28
2.3	<b>Wie wird klassifiziert? .....</b>	28
2.3.1	Wirkweise A: Informierende und warnende Funktionen .....	29
2.3.2	Wirkweise B: Kontinuierlich automatisierende Funktionen .....	30
2.3.3	Wirkweise C: In unfallgeneigten Situationen temporär eingreifende Funktionen .....	32
2.3.4	Zusammenspiel und Konkurrenzverhältnis .....	32
2.4	<b>Für wen wird klassifiziert? .....</b>	33
2.4.1	Ansätze zur nutzergerechten Kommunikation .....	33
	Literatur .....	34

3	<b>Allgemeine rechtliche Rahmenbedingungen für assistierte, automatisierte und autonome Fahrfunktionen in Deutschland</b> .....	37
	<i>Tom Michael Gasser</i>	
3.1	<b>Einleitung und Übersicht</b> .....	38
3.2	<b>Informierende und warnende Funktionen (Wirkweise A)</b> .....	38
3.3	<b>Kontinuierlich automatisierte Funktionen (Wirkweise B)</b> .....	39
3.3.1	Internationales Recht: Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr (1968) – Übersteuerbarkeit durch Fahrende .....	40
3.3.2	Assistierende Funktionen (Level 1 und 2) .....	40
3.3.3	Automatisierende Funktionen (Level 3).....	42
3.3.4	Autonome Funktionen (Level 4) .....	45
3.4	<b>In unfallgeneigten Situationen eingreifende Funktionen (Wirkweise C)</b> .....	50
3.4.1	In abstrakt unfallgeneigten Situationen eingreifende Funktionen .....	50
3.4.2	In konkret unfallgeneigten Situationen eingreifende Funktionen .....	51
	Literatur .....	52
4	<b>Rahmenbedingungen für Fahrerassistenz aus Typgenehmigung und Verbraucherschutz</b> .....	55
	<i>Patrick Seiniger, Andre Seeck und André Wiggerich</i>	
4.1	<b>Einordnung in den Produktentwicklungsprozess</b> .....	56
4.2	<b>Herkunft von Rahmenbedingungen</b> .....	57
4.2.1	Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen .....	57
4.2.2	Marktüberwachung .....	58
4.2.3	Verbraucherschutz mit Euro NCAP .....	59
4.3	<b>Formulierung von Anforderungen</b> .....	60
4.3.1	Implizite Vorgabe von Anforderungen durch präzise Testkriterien.....	61
4.3.2	Explizite Vorgabe von Anforderungen .....	62
4.4	<b>Konkrete Anforderungen aus fahrzeugtechnischen Vorschriften</b> .....	64
4.4.1	UN-Regelungen .....	64
4.4.2	Delegierte Rechtsakte der Europäischen Kommission.....	66
4.5	<b>Konkrete Anforderungen aus dem Verbraucherschutz</b> .....	66
4.5.1	Grading von Komfortassistenz .....	67
4.6	<b>Fazit und Ausblick</b> .....	67
	Literatur .....	68
5	<b>Fahrerassistenzsysteme und automatisierte Fahrfunktionen – Unfallgeschehen und Sicherheitspotenziale</b> .....	71
	<i>Matthias Kühn, Jenö Bende und Lars Hannawald</i>	
5.1	<b>Unfallstatistik</b> .....	72
5.1.1	Unfallgeschehen in Deutschland .....	72
5.1.2	Unfallgeschehen nach Fahrzeugart .....	76
5.2	<b>Einteilung und Abgrenzung moderner Fahrerassistenz- und automatisierter Fahrfunktionen</b> .....	80
5.3	<b>Sicherheitspotenzial von Fahrerassistenzsystemen</b> .....	82
5.3.1	Methoden zur Bewertung des Sicherheitspotenzials von FAS .....	82
5.3.2	Pkw .....	84

5.3.3	Lkw .....	84
5.3.4	Bus .....	85
5.3.5	Motorisiertes Zweirad (MZR).....	85
5.4	<b>Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrfunktionen bei Pkw .....</b>	<b>87</b>
5.5	<b>Ausblick .....</b>	<b>89</b>
	Literatur .....	89
6	<b>Sicherheit von assistierten und automatisierten Systemen .....</b>	<b>91</b>
	<i>Ulf Wilhelm und Susanne Ebel</i>	
6.1	<b>Überblick der existierenden Sicherheitsnormen .....</b>	<b>92</b>
6.2	<b>Funktionale Sicherheit .....</b>	<b>95</b>
6.2.1	Ziele und Aufbau der ISO 26262.....	95
6.2.2	Sicherheitsanforderungen an Fahrerassistenz- und automatisierte Systeme .....	95
6.2.3	Erfüllung der Sicherheitsanforderungen.....	104
6.2.4	Grenzen der ISO 26262.....	110
6.3	<b>Safety of the intended functionality (SOTIF) .....</b>	<b>113</b>
6.3.1	Einführung in ISO 21448.....	113
6.3.2	Überblick SOTIF-Vorgehensmodell .....	115
6.3.3	Funktion ohne SOTIF-relevante Limitierungen [5, 6] .....	116
6.3.4	Iterative Anpassung der Funktionsspezifikation [7, 8, 13] .....	118
6.3.5	Funktion mit akzeptierten funktionalen Unzulänglichkeiten [7, 9–11] .....	120
6.3.6	Massiv datengetriebene Entwicklung.....	124
6.4	<b>UN/ECE im Kontext der Sicherheitsnormen.....</b>	<b>125</b>
6.5	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>125</b>
	Literatur .....	126

## II Virtuelle Entwicklungs- und Testumgebungen für Fahrerassistenzsysteme

7	<b>Virtuelle Integration .....</b>	<b>131</b>
	<i>Michael Kochem und Stephan Hakuli</i>	
7.1	<b>Durchgängiges Testen und Bewerten im virtuellen Fahrversuch .....</b>	<b>132</b>
7.2	<b>Effiziente Zusammenarbeit zwischen Hersteller und Zulieferer mittels einer Integrations- und Testplattform.....</b>	<b>135</b>
7.3	<b>In-the-Loop-Methoden und virtuelle Integration im V-Modell.....</b>	<b>136</b>
7.4	<b>Erweiterung des V-Modells durch alternative Entwicklungsmethoden (Agile/Scrum) .....</b>	<b>141</b>
7.5	<b>Virtuelle Integration im Entwicklungsprozess .....</b>	<b>143</b>
7.5.1	Spezifizieren mithilfe der virtuellen Integration .....	143
7.5.2	Integrieren mithilfe der virtuellen Integration .....	146
7.5.3	Anwendung agiler Methoden & CI/CT/CD-Werkzeuge bei der virtuellen Integration.....	148
7.6	<b>Grenzen der virtuellen Integration .....</b>	<b>149</b>
7.6.1	Validitätsgrenzen.....	149
7.6.2	Praktische Grenzen .....	150
7.7	<b>Fazit.....</b>	<b>150</b>
	Literatur .....	151

8     **Dynamische Fahrsimulatoren**..... 153  
       *Hans-Peter Schöner, Jens Häcker und Katja Nagel*

8.1   **Allgemeiner Überblick über Fahrsimulatoren**..... 157

8.1.1   Einsatz von Fahrsimulatoren..... 157

8.1.2   Beispiele für dynamische Fahrsimulatoren..... 159

8.2   **Aufbau eines dynamischen Fahrsimulators am Beispiel des Mercedes-Benz-Fahrsimulators**..... 162

8.2.1   Bewegungssystem..... 162

8.2.2   Fahrerumfeld ..... 163

8.2.3   Bildsystem..... 164

8.2.4   Sound- und NVH-System..... 165

8.2.5   Modelle der Fahrdynamik und der Umgebung ..... 165

8.2.6   Abbildung der Bewegung in den beschränkten Bewegungsraum ..... 166

8.2.7   Wahrnehmungskonflikte und Simulatorkrankheit ..... 167

8.2.8   Vorbereitungssimulatoren..... 168

8.3   **Versuchskonzeption**..... 168

8.3.1   Zielstellung von Probandenuntersuchungen ..... 168

8.3.2   Versuchsdesign..... 169

8.3.3   Versuchsvorbereitung ..... 172

8.3.4   Ablenkungen ..... 172

8.3.5   Lerneffekte..... 173

8.3.6   Probandenauswahl..... 173

8.3.7   Auswertung von Probandenversuchen ..... 174

8.4   **Problematik der Übertragbarkeit, der Realitätsnähe und des Gefahrenempfindens**..... 176

8.4.1   Verfahren zur Validierung von Fahrsimulatoren ..... 176

8.4.2   Realitätsnähe und Gefahrenempfinden ..... 177

8.5   **Zusammenfassung und Ausblick**..... 178

       Literatur ..... 179

III    **Testmethoden**

9     **Testverfahren für Verbraucherschutz und Fahrzeugtypgenehmigung ...** 185  
       *Patrick Seiniger, Adrian Hellmann und Andre Seeck*

9.1   **Systematik von Testverfahren**..... 186

9.2   **Testverfahren im Verbraucherschutz am Beispiel von Euro NCAP**..... 187

9.2.1   Konzept..... 187

9.2.2   Randbedingungen von Testverfahren bei Euro NCAP ..... 189

9.2.3   Testverfahren für Fahrerassistenzsysteme ..... 190

9.3   **Testverfahren im Rahmen fahrzeugtechnischer Vorschriften** ..... 195

9.4   **Eigenschaften von Testwerkzeugen** ..... 195

9.4.1   Pkw-repräsentierende Zielobjekte und Bewegungsvorrichtungen..... 196

9.4.2   Menschen repräsentierende Zielobjekte und Bewegungsvorrichtungen..... 197

9.4.3   Fahrräder und Motorräder repräsentierende Zielobjekte und Bewegungsvorrichtungen..... 198

9.5   **Ausblick: Realitätsnähe und Testaufwand** ..... 199

       Literatur ..... 200

10	<b>Menschzentrierte Bewertungsverfahren von assistierten Fahrfunktionen</b> .....	201
	<i>Caroline Schießl</i>	
10.1	<b>Warum benötigen wir menschzentrierte Bewertungsverfahren von assistierten Fahrfunktionen?</b> .....	202
10.1.1	Methoden und Modelle menschzentrierter Fahrerassistenz-, Automations- und Verkehrssysteme .....	202
10.1.2	Erfassung, Analyse, Modellierung und Bewertung .....	202
10.2	<b>Klassische Bewertungsverfahren und deren Grenzen</b> .....	203
10.2.1	Natürliche Fahrstudien .....	204
10.2.2	Simulatorstudien .....	205
10.3	<b>Innovative, neue Verfahren</b> .....	207
10.3.1	Die vernetzte Simulation .....	207
10.3.2	Anwendungs- und Forschungsbeispiele .....	209
10.4	<b>Ausblick/Bedeutung für automatisiertes Fahren</b> .....	211
	Literatur .....	212
11	<b>Wizard-of-Oz-Fahrzeuge</b> .....	215
	<i>Alexander T. Frey und Meike Jipp</i>	
11.1	<b>Einführung und Definitionen</b> .....	216
11.2	<b>Das Wizard-of-Oz-Prinzip als neue psychologische Untersuchungsmethode beim automatisierten Fahren</b> .....	217
11.2.1	Wizard-of-Oz Studien im Kontext methodischer Gütekriterien .....	219
11.2.2	Methodenspezifische Herausforderungen bei der Studienplanung und -durchführung .....	221
11.3	<b>Einsatz von Wizard-of-Oz-Fahrzeugen in der Forschung zur Mensch-Maschine-Interaktion bei kontinuierlicher Fahrzeugautomatisierung</b> .....	222
11.3.1	Einsatz für SAE-Level-3 .....	223
11.3.2	Einsatz für SAE-Level 4 .....	227
11.4	<b>Zusammenfassung und abschließende Diskussion</b> .....	229
	Literatur .....	231
12	<b>EVITA – Das Verfahren zur realistischen Darbietung auffahrkollisionskritischer Situationen im Fahrversuch</b> .....	235
	<i>Norbert Fecher, Jens Hoffmann und Hermann Winner</i>	
12.1	<b>Das Dummy Target EVITA</b> .....	237
12.1.1	Motivation, Ziele und Anforderungen .....	237
12.1.2	Konzept .....	237
12.1.3	Aufbau .....	238
12.1.4	Versuchsablauf .....	239
12.1.5	Gefährdungen von Versuchsteilnehmenden .....	239
12.1.6	Leistungsdaten .....	240
12.2	<b>Bewertungsmethodik für Antikollisionssysteme</b> .....	240
12.2.1	Messkonzept im Versuchsfahrzeug .....	240
12.2.2	Fahrzeugunabhängige Schnellmesseinrichtung .....	240
12.2.3	Wirksamkeit eines Antikollisionssystems .....	240
12.2.4	Probandenversuch .....	241

12.2.5	Bewertungskriterien für warnende Frontkollisionsgegenmaßnahmen .....	242
12.2.6	Vergleiche von Antikollisionssystemen .....	243
12.2.7	Einsatz in weiteren Studien .....	244
12.3	<b>Darbietung von auffahrkollisionskritischen Situationen im Fahrversuch .....</b>	<b>244</b>
12.3.1	Automatische Notbremssysteme für Motorräder .....	244
12.3.2	Übernahmeverhalten bei teilautomatisiertem Fahren (Level 3).....	245
12.4	<b>Ausblick und künftige Anwendung .....</b>	<b>245</b>
	Literatur .....	245
13	<b>Testen mit koordinierten automatisierten Fahrzeugen.....</b>	<b>247</b>
	<i>Hans-Peter Schöner, Pim van der Jagt und Sebastian Werr</i>	
13.1	<b>Motivation für den Einsatz koordinierter automatisierter Fahrzeuge.....</b>	<b>249</b>
13.2	<b>Anforderungen an Präzision und Reproduzierbarkeit .....</b>	<b>251</b>
13.3	<b>Technische Umsetzung .....</b>	<b>251</b>
13.3.1	Im Fahrzeug: Lenkroboter, Pedalroboter, Positionsmessung, Safety-Controller, Notbremseinrichtung .....	251
13.3.2	Im Leitstand: Steuerzentrale, Visualisierung, Koordination, Sicherheit .....	253
13.3.3	Sonstige Systeme: Daten- und Bildübertragung, Datensynchronisation, Luftbilder.....	254
13.4	<b>Planung von Manövern.....</b>	<b>255</b>
13.4.1	Planung einzelner Trajektorien .....	255
13.4.2	Planung und Überprüfung koordinierter Trajektorien .....	255
13.4.3	Genauigkeit und Wiederholbarkeit .....	256
13.4.4	Virtuelle Leitplanken .....	257
13.5	<b>Selbstfahrende Targets .....</b>	<b>257</b>
13.5.1	Soft-Crash-Target.....	258
13.5.2	Überfahrbarer Target-Träger .....	259
13.5.3	Zertifiziertes crashbares Target .....	260
13.5.4	Targets für „Vulnerable Road Users“ (VRU) .....	261
13.6	<b>Beispiele für automatisierte Fahrmanöver.....</b>	<b>262</b>
13.6.1	Automatisierte Manöver einzelner Fahrzeuge .....	262
13.6.2	Koordinierte Manöver mit mehreren automatisierten Fahrzeugen .....	263
13.6.3	Manöver mit fahrzeugführender Person und mit getriggerten bzw. synchronisierten Targets .....	264
13.7	<b>Zukünftige Entwicklungen .....</b>	<b>265</b>
	Literatur .....	266

## IV Sensoren für Fahrerassistenzsysteme

14	<b>Ultraschallsensorik .....</b>	<b>269</b>
	<i>Heinrich Gotzig</i>	
14.1	<b>Einleitung.....</b>	<b>270</b>
14.2	<b>Grundlagen der Ultraschallwandlung .....</b>	<b>270</b>
14.2.1	Piezoelektrischer Effekt .....	270
14.2.2	Piezoelektrische Keramiken .....	270
14.3	<b>Ultraschallwandler.....</b>	<b>271</b>

14.3.1	Grundbegriffe der Akustik .....	272
14.3.2	Aufbau und Funktionen.....	272
14.3.3	Entfernungsmessung .....	277
14.4	<b>Systemgrenzen des Ultraschallsensors</b> .....	279
14.5	<b>Ultraschallbasierende Umfelderkennung/Fahrerassistenz</b> .....	281
14.5.1	Ultraschallbasierende Applikationen .....	281
14.5.2	Generische Ultraschallsystemarchitektur.....	281
14.5.3	Systemapplikation Ultraschall.....	282
14.5.4	Performance.....	282
14.6	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	283
14.6.1	Zusammenfassung .....	283
14.6.2	Ausblick.....	283
	Literatur .....	286
15	<b>Radarsensorik</b> .....	287
	<i>Hermann Winner und Christian Waldschmidt</i>	
15.1	<b>Einleitung</b> .....	289
15.2	<b>Ausbreitung und Reflektion</b> .....	290
15.3	<b>Grundlagen der Radarsignalverarbeitung</b> .....	295
15.3.1	Grundprinzip Modulation und Demodulation.....	295
15.3.2	Frequenzmodulation (FM) .....	299
15.3.3	Digitale Modulationsverfahren .....	304
15.4	<b>Prinzip der Winkelmessung</b> .....	306
15.4.1	Antennentheoretische Vorbetrachtungen .....	306
15.4.2	Scanning.....	308
15.4.3	Monopuls .....	309
15.4.4	Planare Antennen-Arrays .....	311
15.5	<b>Hauptparameter der Leistungsfähigkeit</b> .....	317
15.5.1	Abstand.....	317
15.5.2	Radialgeschwindigkeit .....	318
15.5.3	Azimutwinkel.....	318
15.5.4	Elevationswinkel.....	318
15.5.5	Leistungsfähigkeit und Mehrzielfähigkeit .....	318
15.5.6	24 GHz vs. 77 GHz .....	320
15.6	<b>Signalverarbeitung und Tracking</b> .....	321
15.7	<b>Einbau und Justage</b> .....	324
15.8	<b>Interferenz</b> .....	326
15.8.1	Auftreten und Auswirkungen .....	326
15.8.2	Gegenmaßnahmen .....	326
15.9	<b>Ausführungsbeispiele</b> .....	328
15.9.1	Bosch Radarsensoren der 4. Generation.....	328
15.9.2	Bosch Radarsensoren der 5. Generation.....	328
15.9.3	Continental Radarsensoren der 5. Generation .....	334
15.9.4	HELLA 24 GHz- und 77 GHz-Corner-Radarsensoren.....	341
15.9.5	Valeo MB79 Radar .....	344
15.9.6	ZF MRGen21 und FRGen21 .....	346
15.10	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	353
	Literatur .....	354

16	<b>LiDAR</b> .....	357
	<i>Thorsten Beuth, Christoph Parl und Heinrich Gotzig</i>	
16.1	<b>Definition und Einordnung</b> .....	359
16.2	<b>Einleitung und Historie</b> .....	359
16.3	<b>Hauptkomponenten eines LiDAR-Systems</b> .....	359
16.3.1	Allgemeiner Aufbau.....	359
16.3.2	Varianten des optischen Pfades.....	361
16.4	<b>Hauptkennwerte</b> .....	363
16.4.1	Systemreichweite.....	363
16.4.2	Punktrate, Messbereich und Auflösung.....	364
16.5	<b>Messmethoden</b> .....	365
16.5.1	Direktes Time-of-Flight (dTOF).....	365
16.5.2	Indirektes Time-of-Flight (iTOF).....	366
16.5.3	Gated Imaging.....	367
16.6	<b>Laserschutz des LiDARs</b> .....	368
16.7	<b>Anwendungsszenarien</b> .....	369
16.7.1	Datenpunktgenerator.....	369
16.7.2	Intelligenter Sensor.....	369
16.7.3	Funktionalitätsunterstützungen.....	371
16.7.4	Zonenmodelle, Anwendungen und Anforderungen.....	372
16.8	<b>Einsatz mehrerer Sensoren</b> .....	373
16.8.1	Erhöhung der Umsicht und der Redundanz.....	373
16.8.2	Laserklasse des Autos.....	373
16.8.3	Extrinsische Kalibrierung.....	373
16.9	<b>Aktuelle Serienbeispiele</b> .....	374
16.10	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	375
	Literatur.....	376
17	<b>Kamerasensorik</b> .....	379
	<i>Martin Punke, Boris Werthessen, Peter Geisler, Christian Mindescu und Andreas Wagner</i>	
17.1	<b>Einsatzgebiete und Beispielanwendungen</b> .....	380
17.1.1	Umfelderfassung.....	380
17.1.2	Fahrzeugführungs- und Innenraumüberwachung.....	383
17.2	<b>Kameras für Fahrerassistenzsysteme</b> .....	385
17.2.1	Kriterien für die Auslegung.....	385
17.3	<b>Kameramodul</b> .....	388
17.3.1	Aufbau eines Kameramoduls.....	388
17.3.2	Optik.....	390
17.3.3	Bildsensor.....	392
17.4	<b>System-Architektur</b> .....	401
17.4.1	Systemübersicht.....	401
17.4.2	Frontview-Kameraarchitektur.....	403
17.4.3	Satelliten-Kamerasystemarchitektur.....	404
17.4.4	Innenraumkamerasystem-Architektur.....	405



17.5	<b>Kalibrierung</b> .....	406
17.5.1	Kalibrierparameter.....	406
17.5.2	Orte der Kalibrierung und Kalibrierverfahren .....	407
17.6	<b>Ausblick</b> .....	408
	Literatur .....	409
18	<b>Maschinelles Sehen</b> .....	411
	<i>Christoph Stiller, Alexander Bachmann und Ole Salscheider</i>	
18.1	<b>Bildentstehung</b> .....	412
18.1.1	Projektive Abbildung .....	412
18.1.2	Bildrepräsentation .....	413
18.2	<b>Bildverarbeitung</b> .....	414
18.2.1	Bildverbesserung und -filterung.....	414
18.2.2	Merkmalsextraktion .....	415
18.3	<b>Deep Learning</b> .....	421
18.4	<b>Rekonstruktion der Szenengeometrie</b> .....	424
18.4.1	Stereoskopie .....	425
18.4.2	Motion-Stereo .....	428
18.4.3	Zeitliche Verfolgung.....	429
18.5	<b>Anwendungsbeispiele</b> .....	432
18.5.1	Panoptische Segmentierung .....	433
18.5.2	Maschinelles Sehen im Mobilitätskonzept „Mobility-as-a-Service“ .....	436
18.6	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	440
	Literatur .....	441
19	<b>Stereosehen</b> .....	445
	<i>Uwe Franke und Stefan Gehrig</i>	
19.1	<b>Lokale und globale Verfahren der Disparitätsschätzung</b> .....	449
19.1.1	Lokale Korrelationsverfahren.....	449
19.1.2	Globale Stereoverfahren .....	452
19.1.3	Stereoverfahren mittels Deep-Learning-Algorithmen .....	454
19.2	<b>Genauigkeit der Stereoanalyse</b> .....	456
19.2.1	Subpixelgenaue Schätzung.....	456
19.2.2	Effekte einer Dekalibrierung .....	458
19.3	<b>6D-Vision</b> .....	460
19.3.1	Das Prinzip .....	460
19.3.2	Dense6D .....	464
19.4	<b>Stixel-Welt</b> .....	466
19.4.1	Optimale Berechnung .....	467
19.4.2	Semantische Stixel .....	469
19.4.3	Instanzen .....	470
19.5	<b>Zusammenfassung</b> .....	471
	Literatur .....	472

# V    Datenfusion und Umweltrepräsentation

20	<b>Repräsentation fusionierter Umfelddaten</b> .....	477
	<i>Klaus Dietmayer, Fabian Gies, Dominik Nuss, Stephan Reuter und Marcel Schreiber</i>	
20.1	<b>Anforderungen an Fahrzeugumgebungsrepräsentationen</b> .....	478
20.2	<b>Objektbasierte Darstellungen</b> .....	480
20.2.1	Sensorspezifische Objektmodelle und Koordinatensysteme .....	480
20.2.2	Zustands- und Existenzunsicherheiten .....	481
20.2.3	Grundlegende Verfahren des Multi-Objekt-Trackings .....	482
20.2.4	Eigenlokalisierung und Einbeziehung digitaler Karten .....	492
20.2.5	Zeitliche Aspekte .....	492
20.3	<b>Rasterbasierte Verfahren</b> .....	493
20.3.1	Konzept der Rasterkarten .....	493
20.3.2	Eigenbewegungsschätzung .....	493
20.3.3	Algorithmen zur Erzeugung von Belegungsrasterkarten .....	495
20.3.4	Dynamische Rasterkarten .....	498
20.4	<b>Fusionierte Umgebungsmodellierung</b> .....	504
20.4.1	Objektextraktion aus dynamischen Belegungsrasterkarten .....	504
20.4.2	Umgebungsmodellierung und Objektfusion .....	506
20.5	<b>Zusammenfassung</b> .....	507
	Literatur .....	508
21	<b>SLAM und kartenbasierte Lokalisierung</b> .....	511
	<i>Marc Sons, Mario Theers und Isabell Hofstetter</i>	
21.1	<b>Einleitung</b> .....	513
21.2	<b>Problemformulierung</b> .....	517
21.3	<b>Komponenten eines SLAM-Systems</b> .....	520
21.4	<b>Sensoren &amp; Merkmalsassoziation</b> .....	523
21.4.1	Kamera .....	524
21.4.2	Lidar .....	528
21.4.3	Semantische Merkmale .....	528
21.4.4	GNSS – Globales Navigationssatellitensystem .....	534
21.4.5	IMU und Raddrehzahlsensor .....	536
21.5	<b>Prädiktion</b> .....	537
21.5.1	Bewegungsmodell .....	537
21.5.2	Ortswiedererkennung .....	538
21.6	<b>Zustandsschätzung</b> .....	540
21.6.1	Bayes-Filter .....	540
21.6.2	Bayes-Filter zur kartenbasierten Lokalisierung .....	541
21.6.3	Graph-SLAM .....	543
21.7	<b>Multi-Session-Kartengenerierung</b> .....	547
21.8	<b>Lokalisierung: Beispielanwendungen</b> .....	556
21.8.1	Lokalisierung mittels kostengünstiger Sensorik auf der Autobahn .....	557
21.8.2	Lokalisierung mithilfe geometrischer Primitive in urbanem Gelände .....	558
21.9	<b>Anhang: Der Begriff der Pose</b> .....	562
	Literatur .....	563

VI    **Digitale Infrastruktur**

22	<b>Digitale Karten im Navigation Data Standard Format</b> .....	569
	<i>Katharina Jülge, Ralph Behrens und Roland Homeier</i>	
22.1	<b>Ziele der Standardisierung</b> .....	571
22.2	<b>Merkmale des NDS-Standards</b> .....	572
22.3	<b>Struktur der Daten innerhalb einer NDS-Datenbank</b> .....	573
22.4	<b>NDS Building Blocks</b> .....	574
22.4.1	Navigation und Map Display.....	574
22.4.2	Index Structures.....	578
22.4.3	Advanced Visualisation .....	579
22.5	<b>NDS-Datenbankstruktur und Generalisierung</b> .....	580
22.5.1	Datenbankstruktur und Partitionierung .....	580
22.5.2	Generalisierung.....	580
22.6	<b>Aufbau der NDS-Datenbank</b> .....	580
22.6.1	NDS DataScript und RDS .....	581
22.6.2	NDS-Format-Erweiterung.....	582
22.6.3	NDS-Datenbankwerkzeuge .....	582
22.7	<b>Kartenlernen</b> .....	582
22.7.1	SENSORIS als Übertragungsprotokoll.....	582
22.7.2	Aggregation im Sensor vs. Aggregation im Backend .....	583
22.7.3	Beispielattribut (Slopes).....	583
22.8	<b>Zukunft des NDS-Standard</b> .....	583
	Literatur .....	584
23	<b>Vehicle-2-X</b> .....	585
	<i>Frank Hofmann, Hendrik Fuchs, Ignacio Llatser Marti,</i> <i>Christian Zimmermann und Kurt Eckert</i>	
23.1	<b>Grundlagen und Motivation</b> .....	586
23.2	<b>Standardisierung und Gremien</b> .....	587
23.3	<b>V2X Use Cases</b> .....	588
23.3.1	V2X Roadmaps .....	588
23.3.2	Day1-Entwicklungsphase.....	589
23.3.3	Day2-Entwicklungsphase.....	590
23.3.4	Day3+-Entwicklungsphase.....	592
23.4	<b>V2X-Systemkonzept</b> .....	593
23.5	<b>V2X-Datenübertragungstechnologien</b> .....	595
23.5.1	Übersicht über die V2X-Kommunikationstechnologien .....	595
23.5.2	Technische Herausforderungen.....	597
23.5.3	Übertragungskanal und Frequenzzuordnung .....	598
23.5.4	V2X-Nachrichtenformate.....	600
23.6	<b>Datensicherheit und Schutz der Privatheit</b> .....	601
23.6.1	Sicherheitsprobleme.....	601
23.6.2	Aspekte der Privatheit .....	602
23.6.3	Schutzziele und Herausforderungen .....	602

23.6.4 Sicherheitsmaßnahmen ..... 603

23.6.5 Stand der Technik und Umsetzung ..... 605

23.7 V2X-Markteinführung und Ausblick..... 605

    Literatur ..... 606

VII   Aktoren für Fahrerassistenzsysteme

24   **Lenksysteme für Fahrzeuge mit Querführungsassistenzsystemen  
      oder automatisierten Fahrfunktionen** ..... 611

*Thilo Bitzer, Heinz-Dieter Heitzer, Christoph Elbers und Michael Scholand*

24.1   **Bauarten von Lenksystemen für Pkw und Lkw** ..... 613

24.1.1   Blocklenkung ..... 613

24.1.2   Zahnstangenlenkung ..... 615

24.1.3   Steer-by-Wire ..... 615

24.2   **Servolenkungen** ..... 616

24.2.1   Hydraulische und elektrohydraulische Servolenkungen ..... 616

24.2.2   Mechatronische Servolenkungen ..... 618

24.2.3   Kombinierte Hydraulische und Mechatronische Servolenkungen..... 619

24.2.4   Mechatronische Steer-by-Wire-Systeme ..... 619

24.3   **Hinterachslenkungen für Pkw und Lkw** ..... 620

24.4   **Grundlegende Lenkfunktionen für assistiertes und automatisiertes Fahren** ..... 623

24.4.1   Lenkmomentüberlagerung ..... 623

24.4.2   Lenkwinkelüberlagerung ..... 624

24.4.3   Lenkwinkelregelung ..... 625

24.4.4   Kooperative Lenkwinkelregelung..... 625

24.4.5   Hinterachszusatzlenkung..... 626

24.5   **Sicherheitsanforderungen an Lenksysteme und Lenkfunktionen**..... 627

24.5.1   Zulassungsrichtlinien..... 627

24.5.2   Betriebsfestigkeit von mechanischen Komponenten ..... 627

24.5.3   Funktionale Sicherheit elektrischer und elektronischer Systeme ..... 629

24.5.4   ASIL-Einstufung von Lenkfunktionen ..... 629

24.5.5   Cyber-Security ..... 630

24.6   **Sicherheitskonzepte für mechatronische Lenksysteme** ..... 631

24.6.1   Fail-Safe- und Fail-Operational-Konzepte ..... 631

24.6.2   Fehlertoleranz ..... 631

24.6.3   Ausführungsbeispiele..... 633

24.7   **Systemintegration auf Fahrzeugebene** ..... 637

24.7.1   Systemhierarchie/Systemarchitektur..... 638

24.7.2   Lenksystemschnittstellen..... 640

24.8   **Zusammenfassung und Ausblick**..... 641

    Literatur ..... 641

25   **Elektronische Bremssysteme** ..... 643

*Paul Linhoff, Stefan Drumm, Thorsten Ullrich und Bernhard Schmid*

25.1   **Das Pkw-Bremssystem**..... 644

25.1.1   Das Bremssystem als Fahrzeug-Subsystem ..... 644

25.1.2   Das Bremssystem als eine der Wirkungsketten zur Fahrzeugkontrolle..... 644

25.1.3	Elektrifizierung des Fahrzeugantriebs und automatisiertes Fahren .....	645
25.1.4	Sense-Plan-Act-Strukturen .....	645
25.1.5	Die Hauptfunktionen des Bremssystems .....	645
25.1.6	Nebenfunktionen des Bremssystems .....	646
25.1.7	Systemumfang des Bremssystems, Funktionsblöcke, System-Ein- und Ausgänge .....	647
25.2	<b>Entwicklungsstufen der Pkw-Bremssysteme</b> .....	647
25.2.1	Konventionelles Bremssystem mit Vakuumbremskraftverstärker .....	647
25.2.2	Elektro-Booster-basiertes Bremssystem .....	649
25.2.3	Elektrohydraulisches By-Wire-Bremssystem .....	651
25.2.4	Elektromechanisches By-Wire-Bremssystem .....	653
25.3	<b>Der Einfluss der Automatisierung der Fahrzeugführung auf die Entwicklung der Bremssysteme</b> .....	657
25.3.1	Vom Automatisierungsgrad abhängige Anforderungen an Bremssysteme .....	657
25.3.2	Redundanzkonzepte für Bremssysteme .....	665
25.4	<b>Ausblick</b> .....	666
	Literatur .....	667

## Band II

### VIII Mensch-Maschine-Schnittstellen für Fahrerassistenzsysteme

26	<b>Nutzergerechte Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen</b> .....	671
	<i>Klaus Bengler und Lutz Eckstein</i>	
26.1	<b>Einführung und Motivation</b> .....	672
26.2	<b>Nutzer und nutzergerechte Gestaltung</b> .....	673
26.3	<b>MMI für Fahrerassistenzsysteme im Vergleich zu Informations- und Kommunikationssystemen</b> .....	677
26.4	<b>MMI für Informations- und Warnfunktionen</b> .....	679
26.4.1	Definition und Klassifikation .....	679
26.4.2	Gestaltungsregeln .....	681
26.4.3	Ausführungsbeispiele .....	682
26.5	<b>MMI für Funktionen zur Längs- und Querführung</b> .....	684
26.6	<b>Ausblick und Weiterentwicklungen</b> .....	685
	Literatur .....	686
27	<b>Bedienelemente für Fahrerassistenzsysteme</b> .....	689
	<i>Matthias Pfromm und Klaus Bengler</i>	
27.1	<b>Gestaltung von Bedienelementen</b> .....	690
27.1.1	Systemspezifische Anforderungen .....	690
27.1.2	Festlegung der Bedienteilart .....	691
27.1.3	Räumliche Anordnung und geometrische Integration .....	692
27.1.4	Rückmeldung, Bedienrichtung, Haptik und Kennzeichnung .....	693

27.2	<b>Umsetzung von Bedienelementen</b> .....	695
27.2.1	Gebräuchliche Lösungen .....	695
27.2.2	Zukunftsorientierte Konzepte .....	697
27.3	<b>Fazit</b> .....	698
	Literatur .....	698
28	<b>Insassenzustandserkennung</b> .....	701
	<i>Stephan Cieler, Fabian Faller, Moritz Groh und Manfred Wilck</i>	
28.1	<b>Warum Insassenzustandserkennung?</b> .....	703
28.2	<b>Insassenzustandserkennung in der Praxis – sieben Anwendungsfelder</b> .....	704
28.2.1	Regulation der Wachheit.....	704
28.2.2	Aufmerksamkeitsregulation und Ablenkungsvermeidung.....	705
28.2.3	Regulation affektiver Zustände.....	705
28.2.4	Erkennen von Nutzerabsichten.....	706
28.2.5	Beanspruchungsmanagement und Gesundheitsanwendungen.....	707
28.2.6	Anwesenheitserkennung und -klassifizierung.....	707
28.2.7	Transitionen zwischen Automatisierungsstufen .....	708
28.3	<b>Vom Nutzer zum Nutzermodell</b> .....	708
28.3.1	Operationalisierung von Nutzerzuständen .....	708
28.3.2	Nutzermodelle als Abstraktion der Realität.....	709
28.4	<b>Sensorik und Messgrößen</b> .....	710
28.4.1	Kontaktlose Sensorsysteme und Referenzmesstechnik.....	710
28.4.2	Kamerasysteme.....	711
28.4.3	Radarsysteme .....	711
28.4.4	Auswahl des Sensorsystems.....	712
28.5	<b>Insassenzustandsmodellierung</b> .....	713
28.5.1	Grundwahrheit.....	713
28.5.2	Wissensbasierte Modelle.....	713
28.5.3	Lernende, datengetriebene Modelle .....	714
28.6	<b>Anwendungsbeispiel: Anwesenheitserkennung von Kindern</b> .....	716
	Literatur .....	718
29	<b>Menschliches Verhalten als Grundlage für die Situations- und Risikobewertung</b> .....	723
	<i>Sascha Knake-Langhorst, Mandy Dotzauer, Kay Gimm, Marek Junghans, Hagen Saul, Caroline Schießl und Meng Zhang</i>	
29.1	<b>Einführung</b> .....	725
29.1.1	Sicherheit und Effizienz in komplexen verkehrlichen Räumen.....	725
29.1.2	Vom Fahrenden zum Verkehrsteilnehmenden.....	725
29.2	<b>Methoden zur messtechnischen Erfassung verkehrlichen Verhaltens</b> .....	726
29.2.1	Beobachtungsformen des Verkehrsablaufes .....	726
29.2.2	Anforderungen an messtechnische Erfassung verkehrlichen Verhaltens.....	728
29.2.3	Anwendung von Sensortechnologien im Spiegel der Anforderungen .....	729
29.2.4	Reflexion bekannter Systemansätze zur Verkehrsbeobachtung .....	732
29.3	<b>Methoden für die Bewertung verkehrlicher Situationen</b> .....	734
29.3.1	Risikohemmende und -begünstigende Faktoren .....	734
29.3.2	Bekannte Ansätze aus der Verkehrskonflikttechnik .....	736

29.4	<b>Verkehr verstehen, beschreiben und Risiken bestimmen</b> .....	739
29.4.1	Verkehr verstehen und beschreiben .....	739
29.4.2	Prädiktion von Trajektorien von Verkehrsteilnehmenden.....	743
29.4.3	Ableitung von Risikopotenzialen .....	745
29.5	<b>Nutzung im Bereich Assistenz und Automation</b> .....	748
29.5.1	Konzepte zur Erhöhung der Sicherheit und Effizienz im Verkehr.....	748
29.5.2	Architekturkonzepte für das automatisierte und vernetzte Fahren in komplexen urbanen Räumen .....	750
29.6	<b>Zusammenfassung &amp; Ausblick</b> .....	751
	Literatur .....	752

## IX Fahrerassistenzsysteme auf Bahnführungs- und Navigationsebene

30	<b>Sichtverbesserungssysteme und Signaleinrichtungen</b> .....	761
	<i>Tran Quoc Khanh, Jonas Kobbert und Timo Singer</i>	
30.1	<b>Einleitung</b> .....	763
30.2	<b>Grundlagen</b> .....	764
30.2.1	Lichtverhältnisse .....	764
30.2.2	Kontraste und Kontrastwahrnehmung .....	765
30.2.3	Blendung .....	766
30.3	<b>Funktionsweise von Lichtquellen</b> .....	768
30.3.1	Halogenglühlampen .....	768
30.3.2	Xenon-Lampen .....	769
30.3.3	Halbleiter-LED-Lichtquellen .....	769
30.3.4	Halbleiterlaser .....	770
30.3.5	OLED .....	771
30.4	<b>Lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme</b> .....	773
30.4.1	Abbiegeleucht/statisches Kurvenlicht .....	773
30.4.2	Dynamisches Kurvenlicht.....	774
30.4.3	Fernlichtassistent .....	775
30.4.4	Adaptive Lichtverteilungen.....	775
30.4.5	Matrix-Beam/blendfreies Fernlicht .....	776
30.4.6	Markierungslicht .....	779
30.4.7	Hochauflösende Scheinwerfer und Fahrbahnprojektionen.....	779
30.5	<b>Scheinwerferbewertungssysteme</b> .....	781
30.6	<b>Aktuelle Problemstellungen der Lichttechnik</b> .....	784
30.6.1	Scheinwerfereinstellung.....	784
30.6.2	Scheinwerferreinigung .....	785
30.7	<b>Lichtsignale als Bestandteil einer neuartigen Mensch-Maschine-Schnittstelle für hochautomatisierte Fahrzeuge</b> .....	786
30.7.1	Neuartige Lichtsignalkonzepte für hochautomatisierte Fahrzeuge .....	786
30.7.2	Zusätzliche Signalleuchten oder Lichtstreifen .....	788
30.7.3	Display-basierte Signaleinrichtungen .....	788
30.7.4	Fahrbahnprojektionen .....	789
30.7.5	Zusammenfassung und Diskussion.....	789
30.8	<b>Ausblick</b> .....	790
	Literatur .....	790

31	<b>Niedergeschwindigkeitsassistentz</b> .....	793
	<i>Ahmed Benmimoun und Sebastian Klaudt</i>	
31.1	<b>Einleitung</b> .....	794
31.2	<b>Klassifizierung der Assistenz- und Automatisierungssysteme für den Niedergeschwindigkeitsbereich</b> .....	794
31.3	<b>Historische Entwicklung der Fahrerassistenz für den Niedergeschwindigkeitsbereich</b> .....	796
31.4	<b>Technische Realisierung</b> .....	797
31.4.1	Parkanwendungen .....	797
31.4.2	Rückwärtsfahren und Rangieren .....	805
31.4.3	Fahren mit Anhänger .....	808
31.4.4	Umfeldwahrnehmung/Umfeldmodellierung .....	809
31.4.5	Trajektorienplanung.....	812
31.4.6	Ausführung.....	815
31.5	<b>Ausblick</b> .....	817
	Literatur .....	819
32	<b>Längsregelung</b> .....	821
	<i>Hermann Winner und Jens Desens</i>	
32.1	<b>Einleitung</b> .....	823
32.2	<b>Funktionsdefinition von ACC und funktionale Anforderungen</b> .....	823
32.2.1	Referenz zur ISO-Norm zu ACC.....	823
32.2.2	Definitionen .....	824
32.2.3	Funktionsanforderungen für FSR-ACC nach ISO 15622 .....	825
32.3	<b>Systemstruktur</b> .....	827
32.3.1	Beispiel MercedesBenz DISTRONIC .....	828
32.3.2	Funktionsabstufungen .....	829
32.4	<b>ACC-Zustandsmanagement und Mensch-Maschine-Schnittstelle</b> .....	829
32.4.1	Systemzustände und Zustandsübergänge.....	829
32.4.2	Bedienelemente mit Ausführungsbeispielen .....	832
32.4.3	Anzeigeelemente mit Ausführungsbeispielen.....	833
32.5	<b>Zielobjekterkennung für ACC</b> .....	835
32.5.1	Anforderungen an die Umfellsensorik.....	835
32.5.2	Messbereiche und zugehörige Anforderungen.....	835
32.6	<b>Zielauswahl</b> .....	838
32.6.1	Bestimmung der Kurskrümmung .....	839
32.6.2	Kursprädiktion .....	840
32.6.3	Fahrkorridor .....	841
32.6.4	Weitere Kriterien für die Zielauswahl.....	843
32.6.5	Grenzen der Zielauswahl.....	843
32.7	<b>Folgeregelung</b> .....	844
32.8	<b>Regleranpassungen</b> .....	846
32.8.1	Zielverluststrategien und Kurvenregelung .....	846
32.8.2	Annäherungsstrategien .....	847
32.8.3	Überholunterstützung .....	848
32.8.4	Reaktion auf stehende Ziele.....	848



32.8.5	Anhaltereregung, Spezifika der Low-Speed-Regelung .....	849
32.9	<b>Beschleunigungsregelung und Aktorik</b> .....	849
32.9.1	Grundstruktur und Koordination der Aktorik .....	849
32.9.2	Bremse .....	850
32.9.3	Antrieb .....	853
32.10	<b>Funktionale Erweiterungen</b> .....	855
32.10.1	Berücksichtigung des Verbots des Rechtsüberholens .....	855
32.10.2	Anpassung der Wunschgeschwindigkeit an die zulässige Höchstgeschwindigkeit .....	855
32.10.3	Geschwindigkeitsanpassung an den Streckenverlauf .....	855
32.11	<b>Nutzungs- und Sicherheitsphilosophie</b> .....	856
32.12	<b>Besonderheiten für kombinierte Längs- und Querregelung</b> .....	857
32.13	<b>Ausblick</b> .....	857
	Literatur .....	857
33	<b>Querführungsassistentz</b> .....	859
	<i>Dirk Wisselmann, Arne Bartels, Felix Fahrenkrog und Gregor Nitz</i>	
33.1	<b>Motivation</b> .....	860
33.2	<b>Anforderungen</b> .....	860
33.3	<b>Klassifikation</b> .....	861
33.4	<b>Vorschriften, Normen und Prüfungen</b> .....	863
33.5	<b>Systemkomponenten</b> .....	864
33.5.1	Umfeldsensorik .....	865
33.5.2	Signalverarbeitung .....	866
33.5.3	Funktionsmodul LDW/LKA .....	867
33.5.4	Fahrerinformation .....	870
33.5.5	Aktoren .....	873
33.5.6	Statusanzeige und Bedienelemente .....	874
33.6	<b>Beispielhafte Umsetzungen</b> .....	874
33.6.1	BMW „Driving Assistant Professional“ .....	876
33.6.2	Volkswagen „Lane Assist“ .....	877
33.7	<b>Sicherheitsgewinn</b> .....	878
33.8	<b>Systembeurteilung durch Fachpresse und Verbraucherschutz</b> .....	879
33.9	<b>Ausblick</b> .....	879
	Literatur .....	880
34	<b>Integrierte Quer- und Längsregelung</b> .....	883
	<i>Christian Rathgeber, Dirk Odenthal und Norbert Nitzsche</i>	
34.1	<b>Einleitung</b> .....	885
34.2	<b>Drei-Ebenen-Modell des kooperativen und autonomen Fahrens</b> .....	889
34.3	<b>Fahrzeugmodelle</b> .....	892
34.3.1	Lenkung .....	892
34.3.2	Einspurmodell .....	893
34.3.3	Längsdynamik .....	894
34.3.4	Kinematik .....	896
34.4	<b>Bahnführungsebene</b> .....	896
34.4.1	Trajektorienplanung .....	896

34.4.2	Trajektorienfolgeregelung .....	897
34.5	<b>Fahrzeugführungsebene längs/quer</b> .....	900
34.5.1	Störgrößenbeobachter (disturbance observer) – Grundstruktur .....	900
34.5.2	Einstellbare stationäre Genauigkeit .....	902
34.5.3	Selektive Kompensation von Störungen .....	903
34.5.4	Krümmungs-Störgrößenbeobachter .....	904
34.5.5	Längsbeschleunigungs-Störgrößenbeobachter .....	905
34.5.6	Kooperativer Lenkwinkelregler mit Störgrößenbeobachter .....	905
34.5.7	Ansteuerung Antrieb und Bremse .....	907
34.6	<b>Applikation und experimentelle Validierung</b> .....	907
34.6.1	Funktionsausprägung .....	907
34.6.2	Folge- und Störunterdrückungsverhalten .....	908
34.6.3	Kooperativität und Übergangsverhalten .....	910
34.7	<b>Fazit und Ausblick</b> .....	911
	Literatur .....	912
35	<b>Motorrad-Fahrassistenzsysteme</b> .....	915
	<i>Raphael Pleß, Andreas Georgi, Jonas Lichtenthäler,</i> <i>Gerald Matschl und Sebastian Will</i>	
35.1	<b>Einleitung</b> .....	917
35.2	<b>Grundlagen Motorraddynamik</b> .....	918
35.2.1	Stabilisierung und Gleichgewichtslagen .....	918
35.2.2	Manövrierbarkeit und Handling .....	921
35.2.3	Dynamische Instabilitäten .....	923
35.2.4	Besondere Anforderungen an Motorrad-Fahrassistenzsysteme .....	923
35.3	<b>Stabilisierungsassistentz</b> .....	924
35.3.1	Antiblockiersystem .....	925
35.3.2	Antriebssschlupfregelung/Traktionskontrolle .....	927
35.3.3	Systemerweiterungen der Radregelsysteme .....	928
35.3.4	Sensorik und Regelung kurventauglicher Radregelsysteme .....	930
35.3.5	Rad-Abhebeerkennung .....	932
35.3.6	Verringerung seitlichen Rutschens .....	933
35.4	<b>Assistenzsysteme auf Bahnführungsebene</b> .....	934
35.4.1	Adaptive Cruise Control (ACC) .....	934
35.4.2	Autonomous Emergency Brake (AEB) .....	937
35.4.3	Side View Assist (SVA) .....	939
35.4.4	Ausblick Bahnführungsassistentz längs und quer .....	940
35.5	<b>Human Machine Interface (HMI)</b> .....	941
35.6	<b>Konnektivität</b> .....	942
35.6.1	Lokalisation .....	942
35.6.2	Antennen .....	943
35.7	<b>Entwicklungs- und Absicherungsmethoden</b> .....	943
35.7.1	Erweiterung der ISO26262 für Motorräder .....	944
35.7.2	Motorrad-Fahrsimulatoren .....	945
35.8	<b>Fazit &amp; Ausblick</b> .....	949
	Literatur .....	949

36	<b>Fahrerassistenzsysteme im Nutzfahrzeug .....</b>	951
	<i>Christian Ballarin, Felix Manuel Reisgys, Ingo Scherhauser und Christoph Tresp</i>	
36.1	<b>Überblick.....</b>	955
36.1.1	Motivation .....	955
36.1.2	Historie.....	956
36.1.3	Gesetzgebung.....	959
36.2	<b>Unterschiede zwischen Lkw und Pkw .....</b>	960
36.2.1	Fahrende und Nutzungszeit.....	960
36.2.2	Fahrdynamik und Use Cases .....	960
36.2.3	Sichtfeld und Sensorik.....	961
36.3	<b>System- und Sicherheitskonzepte .....</b>	962
36.3.1	Auslegung von Fahrerassistenzsystemen für Nutzfahrzeuge.....	962
36.3.2	Systemarchitektur .....	963
36.4	<b>Fahrerassistenzsysteme im Serieneinsatz .....</b>	966
36.4.1	Informierende und warnende Funktionen .....	966
36.4.2	In unfallgeneigten Situationen temporär eingreifende Funktionen.....	969
36.4.3	Kontinuierlich automatisierende Funktionen.....	973
36.5	<b>Testverfahren.....</b>	975
36.5.1	Test- und Freigabeprozesse.....	975
36.5.2	Testziele und Testumgebungen.....	976
36.5.3	Besonderheiten bei Nutzfahrzeugen.....	976
36.6	<b>Zukünftige Entwicklungen .....</b>	977
36.6.1	Vision Zero .....	977
36.6.2	Sensoren und Anwendungen.....	977
36.6.3	Fahrerloses Fahren .....	983
	Literatur .....	984
37	<b>Unterstützung von Fahrfunktionen durch die digitale Karte .....</b>	987
	<i>Roland Homeier, Roland Jentsch, Katharina Jölge, Benjamin Lippelt und Werner Pöchtmüller</i>	
37.1	<b>Einführung.....</b>	989
37.1.1	Karte in der Navigation .....	989
37.1.2	Karte in Fahrerassistenz- und hochautomatisierten Systemen.....	989
37.1.3	Schichtenmodell der Karte.....	990
37.2	<b>Navigation .....</b>	991
37.2.1	Funktionen der Navigation.....	991
37.3	<b>Cloud-Services.....</b>	993
37.3.1	Eigenschaften eines Cloud Backends .....	993
37.3.2	Technische Realisierung eines Cloud Backends.....	995
37.3.3	Virtualisierung & Container .....	995
37.3.4	Technische Besonderheiten von Cloud-Services.....	997
37.3.5	Internet der Dinge .....	999
37.3.6	Edge Computing .....	1000
37.3.7	Cloud-Services in der Praxis .....	1001
37.4	<b>Unterstützung durch Smartphone-Anbindung im Automobil .....</b>	1002
37.4.1	Motivation der Smartphone-Integration im Automobil.....	1002
37.4.2	Möglichkeiten der Smartphone-Integration.....	1003

37.4.3 Zukunft der Smartphone-Anbindung..... 1004

37.5 **Safety/funktionale Sicherheit**..... 1005

37.5.1 Absicherung der Kartenfunktion..... 1005

37.5.2 Sicherheitsrelevante Attribute und Profile ..... 1006

37.6 **Elektronischer Horizont** ..... 1006

37.6.1 Definition ..... 1006

37.6.2 Elektronischer Horizont für Fahrerassistenzsysteme..... 1007

37.6.3 Elektronischer Horizont für automatisiertes Fahren..... 1009

37.6.4 Relevante Karteninhalte ..... 1012

37.6.5 Repräsentation in ADASIS Version 3..... 1013

37.6.6 Einbindung der Navigationsroute in den Horizont ..... 1013

37.6.7 Kartenbereitstellung im Fahrzeug ..... 1014

37.7 **Steuergeräte für Navigation und Horizont**..... 1015

37.7.1 E/E-Architekturen in Fahrzeugen ..... 1015

37.7.2 Steuergeräte zum Tragen der Horizont-Funktion ..... 1016

37.7.3 Zusammenfassung ..... 1018

        Literatur ..... 1018

**X      Automatisiertes Fahren**

38 **Human Factors: Level 3+** ..... 1021

*Klaus Bengler, Johanna Josten und Claus Marberger*

38.1 **Einführung**..... 1022

38.2 **Kontrollübergaben als sicherheitsrelevanter Aspekt von Level-3-Funktionen**..... 1022

38.3 **Vertrauen und Level-3-Automation**..... 1024

38.4 **Innenraumgestaltung**..... 1026

38.5 **Aspekte von Komfort und Diskomfort bei L3+-Automatisierung**..... 1026

38.5.1 Somatosensorische Auswirkungen der Fahrzeugbewegung..... 1027

38.5.2 Reisefortschritt..... 1027

38.5.3 Sicherheitsgefühl ..... 1028

38.6 **Kontrollverlust**..... 1028

38.7 **Sozialer Einfluss**..... 1029

38.8 **Einfluss fahrfremder Tätigkeiten**..... 1029

38.9 **Reisekrankheit** ..... 1029

38.10 **Nutzerakzeptanz von Automationsfunktionen (L1-L3) bis hin zu Akzeptanz neuer Mobilitätsangebote (L4)** ..... 1031

38.11 **Zusammenfassung und Ausblick**..... 1031

        Literatur ..... 1032

39 **Architektursichten für Fahrzeugautomatisierungssysteme**..... 1035

*Marcus Nolte und Markus Maurer*

39.1 **Einleitung**..... 1037

39.2 **Motivation: Interdisziplinäre Herausforderungen für die Sicherheit automatisierter Fahrzeugsysteme** ..... 1039

39.3 **Terminologie**..... 1042

<b>39.4</b>	<b>Blickwinkel automatisiertes Fahren: Ausgewählte Beispiele zu Mehrsichtenarchitekturen.....</b>	<b>1047</b>
39.4.1	Ursprünge verschiedener Systemsichten auf automatisierte Fahrzeuge.....	1047
39.4.2	Ausgewählte Ansätze zur Formulierung von Systemsichten auf automatisierte Fahrzeuge.....	1049
39.4.3	Zwischenfazit.....	1053
<b>39.5</b>	<b>Blickwinkel Systems Engineering: Ausgewählte Beispiele zu Architektur-Frameworks aus dem (MB)SE .....</b>	<b>1054</b>
39.5.1	Generische Architektur-Frameworks .....	1054
39.5.2	MBSE-motivierte Architektur-Frameworks mit Bezug zur Fahrzeugtechnik.....	1057
39.5.3	Zusammenfassung bestehender MBSE-basierten Architektur-Frameworks mit fahrzeugtechnischem Bezug.....	1059
39.5.4	Zusammenfassung.....	1061
<b>39.6</b>	<b>Beispielszenario und -vorgehen im Kontext automatisierter Fahrzeugsysteme .....</b>	<b>1061</b>
39.6.1	Beispielszenario .....	1062
39.6.2	Relevante Interessengruppen oder Stakeholder.....	1063
39.6.3	Motivation eines Architektur-Frameworks für autonome Fahrzeuge.....	1063
39.6.4	Beispielsichten .....	1066
39.6.5	Zusammenfassung.....	1072
<b>39.7</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>1073</b>
	Literatur .....	1073
<b>40</b>	<b>Sicherheit und Risiko – ein Beitrag zur Bedeutung grundlegender Begriffe .....</b>	<b>1077</b>
	<i>Nayel Fabian Salem, Sophie Le Page, Jason Millar, Philipp Junietz, Marcus Nolte, Robert Graubohm und Markus Maurer</i>	
<b>40.1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1079</b>
<b>40.2</b>	<b>Die vielen Bedeutungen und Verwendungen des Begriffs „Sicherheit“ .....</b>	<b>1082</b>
40.2.1	Die Verwendung des Begriffs „Sicherheit“ in Rahmenwerken zur Absicherung automatisierter Fahrzeuge.....	1083
40.2.2	Die Verwendung des Begriffs „Sicherheit“ durch weitere Stakeholder .....	1098
40.2.3	Schlussfolgerungen zu den Bedeutungen und Verwendungen des Begriffs „Sicherheit“ .....	1103
<b>40.3</b>	<b>Fragen über mit dem Begriff „Sicherheit“ assoziierte Risiken .....</b>	<b>1105</b>
<b>40.4</b>	<b>Grenzen und Empfehlungen der Analyse.....</b>	<b>1107</b>
<b>40.5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>1108</b>
	Literatur .....	1110
<b>41</b>	<b>Taktische Sicherheit für autonome Fahrzeuge auf Autobahnen .....</b>	<b>1115</b>
	<i>Hans-Peter Schöner und Jacobo Antona-Makoshi</i>	
<b>41.1</b>	<b>Das Konzept der „Taktischen Sicherheit“ .....</b>	<b>1116</b>
<b>41.2</b>	<b>Gefahrenvermeidung kompensiert Lücken des akuten Kollisionsschutzes.....</b>	<b>1116</b>
<b>41.3</b>	<b>Situationsparameter mit hohem Risikobeitrag .....</b>	<b>1120</b>
<b>41.4</b>	<b>Risikobewertung von Folgefahrten auf Autobahnen.....</b>	<b>1122</b>
<b>41.5</b>	<b>Schlussfolgerungen für Autobahntestszenarien autonomer Fahrzeuge .....</b>	<b>1128</b>

41.6	<b>Verlässliche Einbeziehung der Verkehrslage</b> .....	1129
41.7	<b>Herausfordernde Autobahnsszenarien</b> .....	1133
41.7.1	Schwierige alltägliche Verkehrssituationen .....	1135
41.7.2	Außergewöhnliche, gefährliche Verkehrssituationen .....	1137
41.7.3	Gefahrvolle vorhersehbare Risikosituationen .....	1138
41.7.4	Weite Vorausschau in unübersichtlichem Verkehr .....	1140
41.8	<b>„Taktische Sicherheit“ ergänzt die Konzepte der „Passiven und Aktiven Sicherheit“</b> .....	1142
	Literatur .....	1143
42	<b>Verhaltensentscheidung für automatisches Fahren</b> .....	1145
	<i>Piotr Spieker, Johannes Fischer und Christoph Stiller</i>	
42.1	<b>Einführung</b> .....	1146
42.2	<b>Verfahren zur Verhaltensentscheidung</b> .....	1146
42.2.1	Regelbasierte Verfahren .....	1146
42.2.2	Graphensuchverfahren .....	1154
42.2.3	Verfahren mit probabilistischen Zustands- und Beobachtungsmodellen .....	1159
42.2.4	Lernende Verfahren .....	1166
42.3	<b>Architekturen für Verhaltensentscheidungen</b> .....	1168
42.4	<b>Anwendungsbeispiel Arbitratorkonzept</b> .....	1170
42.4.1	Teststrecke .....	1171
42.4.2	Umweltmodell .....	1172
42.4.3	Manöverrepräsentation .....	1172
42.4.4	Verhaltensbausteine .....	1172
42.4.5	Kosten-Arbitrator .....	1174
42.4.6	Vollständiger Arbitrationsgraph .....	1175
42.4.7	Ergebnisse .....	1175
42.4.8	Fazit .....	1176
42.5	<b>Zusammenfassung</b> .....	1177
	Literatur .....	1178
43	<b>Optimale Trajektorien</b> .....	1183
	<i>Moritz Werling</i>	
43.1	<b>Einleitung</b> .....	1184
43.2	<b>Dynamische Optimierung</b> .....	1185
43.2.1	Optimalsteuerungsproblem .....	1185
43.2.2	Problemformulierung für Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren .....	1185
43.3	<b>Lösen des Optimalsteuerungsproblems</b> .....	1186
43.3.1	Ansatz I: Variationsrechnung .....	1186
43.3.2	Ansatz II: Direkte Optimierungstechniken .....	1190
43.3.3	Ansatz III: Dynamische Programmierung .....	1194
43.4	<b>Vergleich der Vorgehensweisen</b> .....	1199
43.5	<b>Optimierung auf dynamischem Horizont</b> .....	1200
43.6	<b>Fazit</b> .....	1201
	Literatur .....	1202

44	<b>KI für automatisiertes Fahren .....</b>	1205
	<i>Eike Rehder und Marius Cordts</i>	
44.1	<b>Einführung in maschinelles Lernen .....</b>	1206
44.1.1	Lernen als Optimierungsproblem .....	1206
44.1.2	Übersicht über Lernverfahren .....	1207
44.1.3	Historie maschineller Lernverfahren im Fahrzeug .....	1209
44.2	<b>Der Entwicklungszyklus .....</b>	1210
44.2.1	Datensammlung .....	1211
44.2.2	Annotation .....	1212
44.2.3	Training .....	1213
44.2.4	Testen .....	1213
44.3	<b>Anwendungen im Fahrzeug .....</b>	1214
44.3.1	Semantische Segmentierung .....	1214
44.3.2	Objektdetektion .....	1216
44.3.3	Prädiktion .....	1218
44.3.4	Verhaltensgenerierung .....	1219
44.4	<b>Umgang mit Unbekanntem .....</b>	1220
44.4.1	Unsicherheitsschätzung .....	1220
44.4.2	Erkennung von Unbekanntem .....	1222
44.5	<b>Ausblick .....</b>	1224
	Literatur .....	1224
45	<b>Besondere Anforderungen des automatisierten Fahrens an den Entwurf .....</b>	1229
	<i>Robert Graubohm und Markus Maurer</i>	
45.1	<b>Einleitung .....</b>	1230
45.2	<b>Entwurf mechatronischer Systeme .....</b>	1231
45.3	<b>Herausforderungen bei Konzeptspezifikationen im Themenfeld des automatisierten Fahrens .....</b>	1232
45.3.1	Unsicherheiten während der Anforderungsdefinition .....	1234
45.3.2	Konzeptphase als Grundlage der Produktsicherheitsargumentation .....	1236
45.4	<b>Referenzentwicklungsprozess für automatisierte Fahrzeuge .....</b>	1237
45.4.1	V-Modell als domänenübergreifendes Prozessmodell .....	1238
45.4.2	Anforderungen an einen domänenspezifischen Referenzprozess .....	1239
45.4.3	Systematischer Entwurf automatisierter Fahrfunktionen und Fahrzeuge .....	1241
45.5	<b>Anwendungsfall aFAS .....</b>	1246
45.6	<b>Zusammenfassung .....</b>	1248
	Literatur .....	1249
46	<b>Testkonzepte für die Absicherung von automatisiertem Fahren .....</b>	1253
	<i>Lutz Eckstein und Hermann Winner</i>	
46.1	<b>Einleitung und Abgrenzung .....</b>	1254
46.2	<b>Potenzial und Grenzen der Fahrerprobung .....</b>	1255
46.2.1	Rolle der Fahrerprobung bei der Absicherung von Kraftfahrzeugen .....	1255
46.2.2	Sicherheitsnachweis der automatischen Fahrzeugführung über Fahrerprobung .....	1257
46.2.3	Silent Testing .....	1260

46.3	<b>Konzept des szenarienbasierten Testens</b> .....	1262
46.3.1	Idee und Genese von Verkehrsszenarien .....	1262
46.3.2	Systematische Sammlung und Nutzung von Verkehrsszenarien .....	1263
46.3.3	Grundzüge des Projektes PEGASUS .....	1266
46.3.4	Beschreibung und Relevanz von Szenarien .....	1268
46.3.5	Vergleichsmaßstab Mensch als Referenz .....	1271
46.3.6	Umsetzungsherausforderungen .....	1275
46.3.7	Lösungsansätze zu den Umsetzungsherausforderungen.....	1280
46.4	<b>Fazit</b> .....	1283
46.5	<b>Ausblick</b> .....	1284
	Literatur .....	1285
47	<b>Wartbarkeit und Updatebarkeit von ADAS Software</b> .....	1289
	<i>Mischa Möstl, Johannes Schlatow, Kai-Björn Gemlau und Rolf Ernst</i>	
47.1	<b>Einleitung</b> .....	1290
47.2	<b>Stand der Technik</b> .....	1292
47.2.1	Updates.....	1292
47.2.2	Monitoring.....	1293
47.3	<b>Integration und Verifikation nicht-funktionaler Anforderungen</b> .....	1295
47.3.1	Entkopplung von Daten und Zeit .....	1297
47.3.2	Runtime-Monitoring als Absicherungsmechanismus .....	1304
47.4	<b>Fazit</b> .....	1307
	Literatur .....	1307
48	<b>ODD Güterverkehr</b> .....	1309
	<i>Axel Gern, Michael Haag, Jens Kotte,</i>	
	<i>Kai Furmans und Peter Vaughan Schmidt</i>	
48.1	<b>Bedeutung des Straßengüterverkehrs</b> .....	1310
48.2	<b>Wie funktioniert Güterverkehr?</b> .....	1310
48.3	<b>Motivation für die Automatisierung des Güterverkehrs</b> .....	1313
48.3.1	Ökonomische Faktoren .....	1313
48.3.2	Faktor Verkehrssicherheit.....	1316
48.3.3	Ökologische Faktoren.....	1318
48.4	<b>Grundsätzliche Herausforderungen</b> .....	1318
48.5	<b>Der Aufbau eines hochautomatisierten Lkw</b> .....	1320
48.5.1	Systemarchitektur .....	1320
48.5.2	Herausforderungen bei der Automatisierung eines Lkws .....	1323
48.6	<b>Fallstudie „Middle Mile“</b> .....	1324
48.6.1	Einführung in das Hub-to-Hub-Konzept .....	1325
48.6.2	Erweiterung um Platooning.....	1325
48.6.3	Wahl der Region und des Erstmarktes.....	1327
48.7	<b>Fallstudie Nach- und Vorlauf „Last Mile Delivery“</b> .....	1329
48.7.1	Beispiel autoCargo.....	1330
48.7.2	Beispiel efeu-Campus .....	1331
48.8	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	1332
	Literatur .....	1332



49	<b>Fahrerlose Shuttles als Ergänzung des öffentlichen Personennahverkehrs</b> .....	1335
	<i>Timo Woopen und Lutz Eckstein</i>	
49.1	<b>Einführung</b> .....	1336
49.2	<b>Stand der Technik</b> .....	1337
49.2.1	Verfügbare Shuttle-Konzepte.....	1338
49.2.2	Pilotprojekte.....	1339
49.2.3	Forschungsaktivitäten.....	1340
49.3	<b>Einordnung der Operational Design Domain</b> .....	1341
49.3.1	Gesellschaftliche Ebene.....	1344
49.3.2	Regulatorische Ebene.....	1345
49.3.3	Ökonomische Ebene.....	1346
49.3.4	Ergonomische Ebene.....	1347
49.3.5	Technische Ebene.....	1349
49.4	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	1353
	Literatur.....	1354
50	<b>ODD Taxi</b> .....	1357
	<i>Frank Diermeyer, Dominik Raudszus und Marc Wimmershoff</i>	
50.1	<b>Einleitung</b> .....	1359
50.2	<b>Verkehrsarten und Begriffsdefinitionen</b> .....	1360
50.3	<b>Marktübersicht</b> .....	1360
50.4	<b>Taxi-spezifische Anforderungen</b> .....	1363
50.4.1	Unbegrenzte Menge an Szenarien macht Freigabe aufwändiger.....	1363
50.4.2	Potenziale und Grenzen von Road Side Units.....	1363
50.4.3	Aktuelle und umfassende Karte.....	1364
50.4.4	Umgang mit Baustellen.....	1364
50.4.5	Passagierinteraktionen.....	1365
50.4.6	Flottensteuerung.....	1366
50.4.7	Manöverplaner.....	1367
50.5	<b>Technische Lösungsansätze</b> .....	1367
50.5.1	Passenger-App.....	1367
50.5.2	Bildschirme im Fahrzeug und im Exterieur/HMI.....	1369
50.5.3	Leitwarte/Vehicle Telematics.....	1369
50.5.4	Flottensteuerung: Bedarfsprädiktion.....	1372
50.6	<b>Auswirkungen des hochautomatisierten Taxi</b> .....	1373
50.6.1	Gesellschaftliche Ebene.....	1373
50.6.2	Rechtliche Ebene.....	1373
50.6.3	Wirtschaftliche Ebene.....	1374
50.6.4	Nutzerebene.....	1375
50.6.5	Technische Ebene.....	1376
50.7	<b>Ausblick</b> .....	1377
	Literatur.....	1377

51	<b>Fahrerzustandsbeobachtung beim automatisierten Fahren .....</b>	1381
	<i>Claus Marberger und Dietrich Manstetten</i>	
51.1	<b>Die Fahrerrolle beim automatisierten Fahren .....</b>	1382
51.2	<b>Bekannte Herausforderungen .....</b>	1383
51.2.1	Daueraufmerksamkeit.....	1383
51.2.2	Müdigkeit.....	1383
51.2.3	Begrenztes Zeitfenster für Kontrollübernahmen .....	1384
51.2.4	Auswirkungen inadäquater mentaler Modelle .....	1384
51.3	<b>Lösungsansätze .....</b>	1385
51.3.1	Strategien für das teilautomatisierte Fahren (SAE L2) .....	1385
51.3.2	Strategien für das hochautomatisierte Fahren (SAE L3) .....	1387
51.4	<b>Zur Bewertung der „Fahrerbereitschaft“ .....</b>	1387
51.4.1	Anforderungen von Übernahmesituationen .....	1389
51.4.2	Indikatoren zur Schätzung der Fahrerbereitschaft .....	1389
51.4.3	Komponenten der Fahrerbereitschaft.....	1390
51.5	<b>Zur Auslegung der Fahrerzustandsbeobachtung.....</b>	1393
51.6	<b>Technologien zur Erfassung von Fahrerzustandsindikatoren .....</b>	1394
51.7	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	1397
	Literatur .....	1397
	 <b>Serviceteil</b>	
	Stichwortverzeichnis .....	1403