

A technical drawing of a car chassis, showing various components like the frame, suspension, and steering system, rendered in a light gray color against a dark background.

Thomas Tille (Hrsg.)

# Automobil-Sensorik 3

Prinzipien, Technologien und Anwendungen

---

## Automobil-Sensorik 3

---

Thomas Tille (Hrsg.)

# Automobil-Sensorik 3

Prinzipien, Technologien und  
Anwendungen

 Springer Vieweg

**Dr.-Ing. Thomas Tille**  
BMW AG  
Knorrstr. 147  
80788 München

Technische Universität München  
Arcisstr. 21  
80333 München

ISBN 978-3-662-61259-0

ISBN 978-3-662-61260-6 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61260-6>

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

# Vorwort

Die Sensorik nimmt im Automobil einen bedeutenden und stark wachsenden Stellenwert ein. Im Zuge der rasanten Entwicklungen auf dem Gebiet der Fahrzeugtechnik, wie Automatisiertes Fahren und Elektro-Mobilität, sind immer präzisere und robustere Sensorinformationen unabdingbar. Diese Informationen werden in komplexen Regelalgorithmen der Fahrzeugelektronik insbesondere zur Objekterkennung, Systemüberwachung, Antriebssteuerung, Fahrstabilität, Sicherheits- und Komforterrhöhung genutzt. Zur Generierung dieser Informationen gewinnen neben der Optimierung etablierter Sensorprinzipien zunehmend auch neue und hybride Sensorkonzepte und -technologien an Bedeutung. Die daraus resultierenden Sensorsysteme unterliegen neben den hohen technischen Anforderungen auch immer höheren Ansprüchen hinsichtlich Kosten, Miniaturisierung, Qualität und Zuverlässigkeit.

In der Buchreihe *Automobil-Sensorik* werden innovative Sensoren unter dem anwendungsbezogenen Fokus der Automobilindustrie diskutiert. Die Buchinhalte spiegeln den Trend aktueller Sensorentwicklungen für zukunftsweisende Fahrzeug-Anwendungsbereiche wider. Der Themenschwerpunkt dieser Ausgabe liegt auf Sensorsystemen, die ihren Einsatz im Bereich Automatisiertes Fahren, Elektro-Mobilität, Innenraumdetektion und Bedien-Erkennung finden.

Einer der Treiber für künftige Sensorik-Entwicklungen im Automobil ist das Automatisierte Fahren. Dahingehend wird eine Szenarien-basierte Validierungsmethode eines hybriden Radarmodells für autonome Fahrzeuge vorgestellt, die physikalische, statistische und datengetriebene Ansätze vereint und dabei parametrierbar bleibt. Ein weiterer Treiber für die Automobil-Sensorik ist die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Fahrzeugen im Rahmen der Elektro-Mobilität. Für den Einsatz in Elektrofahrzeugen werden dahingehend hochintegrierte magnetoresistive Stromsensoren und kernlose magnetische Stromsensoren für Hochleistungs-E-Antriebe behandelt. Um die thermische Spitzenbelastung von Steckverbindern beim Hochleistungs-Laden von Elektrofahrzeugen zu kontrollieren,

wird eine modellgestützte Temperaturüberwachungsmethode für Hoch-Volt-Komponenten vorgestellt. Zur Ladezustandsbestimmung von Lithium-Ionen-Akkus in Elektrofahrzeugen wird ein Verfahren auf Basis der optischen Sensorik betrachtet, das über Lichtleitfasern in der Batteriezelle Informationen für das Batteriemangement liefert. Für Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle wird ein H<sub>2</sub>-Sensorsystem vorgestellt, das auf der Kombination von Metalloxid-Halbleitersensoren und eines Wärmeleitfähigkeitsdetektors basiert. Für die Anwendung im Abgasstrang wird ein Verfahren zur direkten Beladungsüberwachung von Benzinpartikelfiltern mittels Hochfrequenz-Sensorik behandelt. Ebenfalls ein Treiber künftiger Sensorik-Entwicklungen ist die Bedien-Erkennung und Innenraumdetektion im Automobil. Dahingehend werden verschiedene optische 3D-Sensorsysteme vorgestellt, die mittels Time-of-Flight-Kamera und Echtzeit-Bildverarbeitung die Erfassung von relevanten Nutzerbewegungen ermöglichen. Dadurch lassen sich sowohl eine gestengesteuerte Fahrzeugbedienung und ein kontaktloser Fahrzeugzugang, als auch eine präzise Insassen-Positionserkennung für Sicherheitsfunktionen realisieren. Des Weiteren wird ein datenfusionsbasiertes, thermodynamisches Sensormodell zur Fahrzeug-Innentemperaturerfassung vorgestellt, das eine Substitution des zentralen, physischen Innentemperatursensors ermöglicht. Aus dem Gebiet der Positionserkennung werden hochintegrierte Motorpositionssensoren für Bremssysteme und elektrische Antriebe, innovative 3D-Hallsensoren mit intelligenter Energieverwaltung und Streufeldunterdrückung sowie ein Positionserfassungsverfahren mittels Sensor-Array aus Tunnel-Magneto-resistiven Vortex-Dots und lernender Signalverarbeitung vorgestellt.

Das Buch richtet sich an Professionals in Wirtschaft und Wissenschaft, insbesondere im Tätigkeitsfeld der Automobilindustrie, bei Sensorherstellern und Forschungseinrichtungen.

An dieser Stelle gilt mein besonderer Dank allen Autoren, durch deren Beiträge dieses Fachbuch entstehen konnte.

München, im April 2020

Dr. Thomas Tille

# Inhaltsübersicht

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>Kapitel 1</b>	
<b>Szenarienbasierte Validierung eines hybriden Radarmodells für Test und Absicherung automatisierter Fahrfunktionen</b> .....	21
<i>Thomas Eder, Alexander Prinz, Ludwig Brabetz, Erwin Biebl</i>	
<b>Kapitel 2</b>	
<b>Kernlose magnetische Stromsensoren für Hochleistungs-E-Antriebe</b> .....	45
<i>Leo Aichriedler, Gerald Wriessnegger</i>	
<b>Kapitel 3</b>	
<b>Hochintegrierte Stromsensoren für Elektrofahrzeuge</b> .....	85
<i>Thomas Holtij, Rolf Slatter</i>	
<b>Kapitel 4</b>	
<b>Modellgestützte Temperaturüberwachung von HV-Komponenten in Elektrofahrzeugen</b> .....	119
<i>Marco Wolf, Tobias Meissner, Michael Ludwig, Uwe Hauck</i>	
<b>Kapitel 5</b>	
<b>Ansätze der optischen Zustandsbestimmung in Lithium-Ionen-Batterien für die Nutzung in Elektro-Fahrzeugen</b> .....	139
<i>Florian Rittweger, Christian Modrzynski, Valentin Roscher, Karl-Ragmar Riemschneider</i>	

<b>Kapitel 6</b>	
<b>Innovative H<sub>2</sub>-Sensorik für Brennstoffzellen-Fahrzeuge</b> .....	163
<i>Olaf Kiesewetter, Alexander Kraußner, Nils Kiesewetter, Jürgen Müller, Marcus Bose, Stefan Schenk, Matthias May</i>	
<b>Kapitel 7</b>	
<b>Hochfrequenzsensorik zur direkten Beladungserkennung von Benzinpartikelfiltern</b> .....	185
<i>Stefanie Walter, Peter Schwanzer, Gunter Hagen, Gerhard Haft, Markus Dietrich, Hans-Peter Rabl, Ralf Moos</i>	
<b>Kapitel 8</b>	
<b>3D-Sensorik auf Basis einer Time-of-Flight-Kamera zur kontaktlosen Fahrzeugbedienung</b> .....	209
<i>Niko Clemens Schmidt-Fischer, Robert Krannich, Thomas Findeisen</i>	
<b>Kapitel 9</b>	
<b>Miniaturisierte 3D Time-of-Flight-Kamera zur Innenraumüberwachung und Gestensteuerung im Automobil</b> .....	235
<i>Cliff De Locht, Gaetan Koers, Gualtiero Bagnuoli, Kristof Lieben, Andreas Ott, Andreas Menath, Thomas Ewender, Christin Gassner, Robert Brüning, Johanna Awada, Foti Coleca, Niklas Hermes, Ercan Küçükkaraca, Josephine Zillmann</i>	
<b>Kapitel 10</b>	
<b>Intelligente kontaktlose Gestensensoren für zukünftige Fahrzeugzugangssysteme</b> .....	269
<i>Boudewijn Venema, Andreas Gornik, Xi Chen, Steffen Leib, Frederik Hempelmann</i>	
<b>Kapitel 11</b>	
<b>Datenfusionsbasiertes, thermodynamisches Sensormodell zur Innentemperaturerfassung</b> .....	291
<i>Tobias Glohr, José Manuel Briones Ayala, Thomas Tille</i>	
<b>Kapitel 12</b>	
<b>Hochintegrierte Motorpositionssensoren für Bremssysteme und elektrische Antriebe</b> .....	325
<i>Nils Labahn, Fabian Utermöhlen, Harry Weber</i>	



**Kapitel 13**

**Innovative 3D-Hallsensoren mit intelligenter Energieverwaltung und Streufeldunterdrückung** ..... 345

*Andreas P. Friedrich, Fabian Winkler, Till-Jonas Ostermann, Christophe Lutz*

**Kapitel 14**

**Positionserfassung mittels Sensor-Array aus Tunnel-Magneto-resistiven Vortex-Dots und lernender Signalverarbeitung** ..... 373

*Thorben Schüthe, Oleg Petrak, Klaus Jünemann, Karl-Ragnar Riemschneider*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
<b>Kapitel 1</b>	
<b>Szenarienbasierte Validierung eines hybriden Radarmodells für Test und Absicherung automatisierter Fahrfunktionen</b> .....	<b>21</b>
<i>Thomas Eder, Alexander Prinz, Ludwig Brabetz, Erwin Biebl</i>	
1.1 Einleitung .....	21
1.1.1 Modellierung und Validierung von Radardetektionslisten .....	23
1.1.2 Beitrag zur Sensormodellvalidierung .....	24
1.2 Hybride Radardetektionsmodelle .....	26
1.2.1 Strahlenbasierte Radardetektionsmodellierung .....	26
1.2.1.1 Modellierung radarspezifischer Charakteristiken .....	26
1.2.1.2 Berücksichtigung fahrzeugspezifischer Radarrückstreuzentren .....	27
1.2.1.3 Modellierungsansätze weiterer radarspezifischer Effekte .....	28
1.2.1.4 Der Algorithmus des parametrierbaren Radardetektionsmodells .....	30
1.2.2 Parametrierung des Radardetektionsmodells .....	31
1.2.2.1 Beispielhafte Parameterwahl .....	31
1.2.2.2 Datenbasierte Optimierung .....	32
1.3 Statistische Validierung von Radarmodellen .....	33
1.3.1 Testen von Hypothesen .....	33
1.3.1.1 Zweistichprobenproblem und Kolmogorov-Smirnov-Test .....	34
1.3.1.2 Methodik zur Validierung räumlicher Radardetektionsverteilungen .....	35

1.3.2	Anwendung der hypothesentestbasierten Validierung .....	36
1.3.2.1	Szenarienbasierte Anwendung .....	36
1.3.2.2	Zeitliche und positionsbasierte Anwendung .....	36
1.4	Datenaufzeichnung und Anwendung der Validierung .....	37
1.4.1	Szenarienbeschreibung und Messdatenaufzeichnung .....	38
1.4.2	Datenbasierte Parametrierung .....	38
1.4.3	Validierung des hybriden Sensormodells .....	39
1.5	Zusammenfassung und Ausblick .....	40

## Kapitel 2

### **Kernlose magnetische Stromsensoren für Hochleistungs-E-Antriebe .....** 45

*Leo Aichriedler, Gerald Wriessnegger*

2.1	Einleitung .....	45
2.1.1	Bedeutung der Stromsensorik in der Regelungstechnik .....	45
2.1.1.1	Stromsensorik für elektrische Antriebe .....	46
2.1.2	Implementierungsprinzipien von Hochstrom-Sensoren für elektrische Antriebe .....	49
2.1.2.1	Einbindung der Stromsensoren in die Leistungs-Endstufe .....	49
2.1.3	Messprinzipien für die Strommessung .....	53
2.1.3.1	Strommessung über Leistungswiderstände .....	53
2.1.3.2	Strommessung über magnetische Prinzipien .....	56
2.2	Stromsensorik für moderne Leistungshalbleiter .....	58
2.2.1	Höhere Schaltgeschwindigkeiten für höhere Schaltfrequenzen ...	58
2.2.2	Reduktion von Leitungsverlusten vs. Verringerung der Kurzschlussfestigkeit .....	59
2.2.3	Erhöhung der Sättigungsströme .....	59
2.3	Kernlose magnetische Sensorik .....	60
2.3.1	Immunität gegenüber Streufeldern .....	60
2.3.1.1	Schirmung und Feldkonzentrator .....	61
2.3.1.2	Kernlose Sensoren mit differenziellem Messprinzip .....	62
2.3.2	Intrinsische und extrinsische Streufeld-Robustheit .....	67
2.3.3	Vor- und Nachteile gegenüber kernbasierten Sensorsystemen ...	68
2.3.3.1	Komplexität des Sensor-Elements .....	68
2.3.3.2	Sättigungsverhalten .....	68
2.3.3.3	Linearität .....	69
2.3.3.4	Offset .....	70
2.3.3.5	System-Integration .....	70

Inhaltsverzeichnis	13
2.3.4 Beispiele für System-Implementierungen	71
2.3.4.1 Laterale Implementierung mit Mehrlagen Leistungs-PCB	72
2.3.4.2 Vertikale Implementierung mit massivem Kupferleiter	76
2.4 Zusammenfassung	83

### **Kapitel 3**

## **Hochintegrierte Stromsensoren für Elektrofahrzeuge** **85**

*Thomas Holtij, Rolf Slatter*

3.1 Einleitung	85
3.2 Grundlagen Magneto-resistive (MR) Technologie	89
3.2.1 AMR	89
3.2.2 GMR	91
3.2.3 TMR	91
3.3 MR-Sensorchip	92
3.3.1 Wheatstonebrücke	92
3.3.2 Barberpole-Struktur	93
3.3.3 Closed-loop Prinzip	94
3.3.4 Störfeldunterdrückung	97
3.4 MR-Stromsensoren	98
3.4.1 Aufbau- und Funktionsweise des Sensors	99
3.4.1.1 Feld in x-Richtung (Gradienten-Feld)	100
3.4.1.2 Feld in y-Richtung (Stabilisierungs-Feld)	101
3.4.2 Stromschienen-Design	102
3.4.3 Bandbreite	104
3.4.4 Integrierte Überstromerkennung	105
3.4.5 Kalibrierung	106
3.5 Anwendungsbeispiele im Elektrofahrzeug	106
3.5.1 Phasenstrommessung (1-Phase)	108
3.5.2 DC-Link-Strommessung	109
3.5.3 Phasenstrommessung (3-Phasen)	110
3.5.3.1 Neues Stromschienenkonzept für hohe Ströme	111
3.5.3.2 Funktionsprinzip	112
3.5.3.3 Messergebnisse	114
3.6 Zusammenfassung	116

**Kapitel 4**

<b>Modellgestützte Temperaturüberwachung von HV-Komponenten in Elektrofahrzeugen</b> .....	<b>119</b>
<i>Marco Wolf, Tobias Meissner, Michael Ludwig, Uwe Hauck</i>	
4.1 Einleitung.....	119
4.1.1 Bedeutung des High-Power-Chargings .....	121
4.1.2 Herausforderung des High-Power-Chargings.....	122
4.2 Auslegung elektrischer Komponenten im HV-Pfad .....	123
4.3 Modellgestützte Temperaturüberwachung im HV-Pfad .....	125
4.3.1 Physikalische Modelle und Netzwerksimulation.....	125
4.3.2 Temperatursensor-Technologien .....	128
4.3.3 Sensorkonzept und Integration .....	131
4.3.4 Applikationseinflüsse .....	133
4.3.5 Sicherheitszuwachs .....	136
4.4 Zusammenfassung .....	137

**Kapitel 5**

<b>Ansätze der optischen Zustandsbestimmung in Lithium-Ionen-Batterien für die Nutzung in Elektro-Fahrzeugen</b> .....	<b>139</b>
<i>Florian Rittweger, Christian Modrzynski, Valentin Roscher, Karl-Ragmar Riemschneider</i>	
5.1 Einleitung.....	139
5.2 Videomikroskopische Beobachtung der Elektroden .....	142
5.2.1 Messsystem und Aufbau der Testzelle .....	142
5.2.2 Ladungsbestimmung durch Reflektivitätsmessungen.....	143
5.2.3 Bestimmung von Elektrodenparametern .....	146
5.2.4 Ladezustandsbestimmung mittels Farb-Referenzierung.....	147
5.3 Faseroptische Sensoren .....	149
5.3.1 Messprinzip .....	149
5.3.2 Herstellung der faseroptischen Sensoren.....	151
5.3.3 Einbringen der faseroptischen Sensoren in die Zelle .....	152
5.3.4 Signalerfassung .....	153
5.3.5 Ladungsbestimmung durch Transmissionsmessungen.....	154
5.3.6 Kalibrierung, Quereinflüsse und Referenzierung .....	156
5.3.7 Ausblick auf eine industrielle Fertigung .....	157
5.4 Zusammenfassung und Ausblick.....	159

**Kapitel 6****Innovative H<sub>2</sub>-Sensorik für Brennstoffzellen-Fahrzeuge** ..... **163**

*Olaf Kiesewetter, Alexander Kraußner, Nils Kiesewetter, Jürgen Müller,  
 Marcus Bose, Stefan Schenk, Matthias May*

6.1	Einleitung	163
6.2	Sensoren zur H <sub>2</sub> -Messung	164
6.2.1	Ausgewählte Sensorfunktionsprinzipien	164
6.2.2	H <sub>2</sub> -Sensor auf Basis des Semicon-Prinzips	167
6.2.2.1	Funktionsweise	167
6.2.2.2	MOX-Gassensorelemente in Hybridtechnologie	168
6.3	Sensorsystem	172
6.3.1	Anforderungen	172
6.3.2	Aufbau	176
6.3.3	Messergebnisse	178
6.4	Zusammenfassung	183

**Kapitel 7****Hochfrequenzsensorik zur direkten Beladungserkennung von Benzinpartikelfiltern** ..... **185**

*Stefanie Walter, Peter Schwanzer, Gunter Hagen, Gerhard Haft,  
 Markus Dietrich, Hans-Peter Rabl, Ralf Moos*

7.1	Einleitung	185
7.2	Grundlagen der Rußmassenüberwachung	186
7.2.1	Problematik beim Einsatz von Differenzdrucksensoren	186
7.2.2	Grundlagen des HF-Sensors	187
7.3	Verhalten des HF-Sensors bei Rußbeladung am Motorprüfstand	189
7.4	Querempfindlichkeiten auf das HF-Signal	193
7.4.1	Einfluss der Filtertemperatur	195
7.4.2	Einfluss der Abgasfeuchtigkeit	196
7.5	Einfluss der Rußabbrandkinetik auf die Sensorgenauigkeit	198
7.5.1	Reaktionskinetische Analyse	199
7.5.2	Simulative Betrachtung unvollständiger Regenerationen	201
7.6	Zusammenfassung	205

**Kapitel 8****3D-Sensorik auf Basis einer Time-of-Flight-Kamera zur kontaktlosen Fahrzeugbedienung** . . . . . **209***Niko Clemens Schmidt-Fischer, Robert Krannich, Thomas Findeisen*

8.1	Einleitung	209
8.2	Motivation	210
	8.2.1 Sicherheit	210
	8.2.2 Reduzierung Bedienelemente	210
	8.2.3 Komfort	211
8.3	Sensor-Vergleich	211
	8.3.1 Stereo-Kamera und Triangulationssystem	212
	8.3.2 Kapazitive Sensorik	213
	8.3.3 TOF-System	213
	8.3.4 Gegenüberstellung 3D-Sensoren	214
8.4	Technik	214
	8.4.1 Time-of-Flight	214
	8.4.1.1 Funktionsprinzip	214
	8.4.1.2 Kamera Field-of-View	215
	8.4.1.3 Tiefendarstellung	216
	8.4.1.4 Ausleuchtung	217
	8.4.1.5 Kamerakalibrierung	219
	8.4.2 Hardware	221
	8.4.2.1 TOF-System im Fahrzeug	221
	8.4.2.2 Aufbau kompaktes TOF-System	222
	8.4.2.3 Performance des TOF-Systems	225
	8.4.3 Software Gestensteuerung	225
	8.4.3.1 Handerkennung	225
	8.4.3.2 Algorithmus Merkmalbestimmung	227
	8.4.3.3 Direkte Algorithmusentwicklung	227
	8.4.3.4 Maschinelles Lernen	228
8.5	Validierung	228
	8.5.1 Bedeutung	228
	8.5.2 Validierungsvarianten	229
	8.5.2.1 Funktionale Validierung	229
	8.5.2.2 Feldtest	229
	8.5.2.3 Key-Performance-Index	230
8.6	Anwendungsgebiete	231
8.7	Zusammenfassung und Ausblick	232

**Kapitel 9**

**Miniaturisierte 3D Time-of-Flight-Kamera zur Innenraumüberwachung und Gestensteuerung im Automobil ..... 235**

*Cliff De Locht, Gaetan Koers, Gualtiero Bagnuoli, Kristof Lieben, Andreas Ott, Andreas Menath, Thomas Ewender, Christin Gassner, Robert Brüning, Johanna Awada, Foti Coleca, Niklas Hermes, Ercan Küçükkaraca, Josephine Zillmann*

9.1	Einleitung .....	235
9.2	ToF-Technik .....	236
9.2.1	Direkte ToF (dToF) .....	238
9.2.2	Indirekte ToF (iToF) .....	238
9.2.3	ToF für Exterior Cocooning .....	238
9.2.4	2D- versus 3D-ToF .....	239
9.3	MinTOFKA-Projektziele .....	239
9.4	Simulationen und Messungen .....	241
9.4.1	Optik .....	241
9.4.1.1	Konzept .....	241
9.4.1.2	Optische Performance .....	244
9.4.2	ToF-Kamera .....	246
9.4.2.1	VGA-ToF-Sensor MLX75027 .....	246
9.4.2.2	VGA-ToF-Kamera .....	248
9.4.2.3	Messung der Tiefengenauigkeit .....	249
9.4.3	Erkennungsalgorithmen .....	250
9.4.3.1	Versuchsaufbau .....	250
9.4.3.2	Validierung .....	251
9.4.3.3	Gestenerkennung .....	252
9.4.3.4	Hand-am-Lenkrad-Erkennung .....	253
9.4.3.5	Sitzbelegungserkennung .....	256
9.4.3.6	Synthetische Datengenerierung .....	257
9.4.4	Messungen im Fahrzeuginnenraum .....	258
9.4.4.1	Vorbereitungen und Testaufbau im Fahrzeug .....	258
9.4.4.2	Ablauf der Fahrzeugtests .....	259
9.4.4.3	Anwendungsfall Hand-am-Lenkrad-Erkennung .....	259
9.4.4.4	Anwendungsfall Gestikerkennung .....	262
9.4.4.5	Anwendungsfall Sitzbelegungserkennung .....	264
9.4.5	Demonstrator D2 .....	265
9.5	Zusammenfassung .....	266



**Kapitel 10****Intelligente kontaktlose Gestensensoren für zukünftige****Fahrzeugzugangssysteme** ..... 269*Boudewijn Venema, Andreas Gornik, Xi Chen, Steffen Leib,**Frederik Hempelmann*

10.1	Einleitung.....	269
10.2	Stromsparendes kapazitives Messsystem für den Einsatz in Elektrofahrzeugen.....	271
10.2.1	Grundlagen.....	271
10.2.2	Maßnahmen zur Optimierung der Stromaufnahme.....	273
10.2.3	EMV und Störrobustheit.....	276
10.3	Gestengesteuertes Heckklappenöffnungssystem auf LiDAR-Basis.....	277
10.3.1	Allgemeines.....	277
10.3.2	Funktionsprinzip.....	278
10.3.3	Auswahl der Beleuchtung.....	280
10.3.4	Systemübersicht.....	281
10.3.5	Software-Algorithmus.....	283
	10.3.5.1 Smoothing.....	284
	10.3.5.2 Background-Suppression.....	284
	10.3.5.3 Segmentation.....	285
	10.3.5.4 Tracking und Klassifikation.....	285
10.3.6	Validierung und Ergebnisse.....	286
	10.3.6.1 2D-/3D-Messungen.....	286
	10.3.6.2 Freifeldstudien.....	286
10.4	Zusammenfassung und Ausblick.....	289

**Kapitel 11****Datenfusionsbasiertes, thermodynamisches Sensormodell zur****Innentemperaturerfassung** ..... 291*Tobias Glohr, José Manuel Briones Ayala, Thomas Tille*

11.1	Einleitung.....	291
11.2	Stand der Technik.....	293
11.2.1	Verfahren zur Erfassung der Innenraumtemperatur.....	293
	11.2.1.1 Infrarotstrahlung.....	293
	11.2.1.2 Zwangsbelüfteter Ansatz.....	293
	11.2.1.3 Unbelüfteter Ansatz.....	294
	11.2.1.4 Modellbasierter Ansatz.....	295
11.2.2	Funktionsweise von Klimageräten.....	295
11.2.3	Relevante thermische Grundlagen.....	296
	11.2.3.1 Energieerhaltung und Wärmemenge.....	296
	11.2.3.2 Arten der Wärmeübertragung.....	297

Inhaltsverzeichnis	19
11.3 Thermodynamische Modellierung	298
11.3.1 Grundlagenmodell	298
11.3.2 Modell zur Integration im HVAC-System	300
11.3.3 Modell zur Integration der Starttemperatur	302
11.3.4 Modell zur Integration der Umschließungsflächen	307
11.3.5 Modell zur Integration der Insassen	313
11.3.6 Modell zur Integration der Störgrößen	314
11.4 Optimierung des thermodynamischen Modells	316
11.5 Evaluation des thermodynamischen Modells	317
11.6 Zusammenfassung	322
<b>Kapitel 12</b>	
<b>Hochintegrierte Motorpositionssensoren für Bremssysteme und elektrische Antriebe</b>	<b>325</b>
<i>Nils Labahn, Fabian Utermöhlen, Harry Weber</i>	
12.1 Einleitung	325
12.2 CIPOS	326
12.2.1 Funktionsprinzip MPS	326
12.2.2 Aufbau und Integrationsmöglichkeiten	330
12.3 Anwendungen	331
12.3.1 Bremssysteme	332
12.3.2 Elektrische Antriebe	335
12.4 Zusammenfassung	343
<b>Kapitel 13</b>	
<b>Innovative 3D-Hallsensoren mit intelligenter Energieverwaltung und Streufeldunterdrückung</b>	<b>345</b>
<i>Andreas P. Friedrich, Fabian Winkler, Till-Jonas Ostermann, Christophe Lutz</i>	
13.1 Einleitung	345
13.2 3D-Hallsensoren	347
13.3 Power-Modi	350
13.4 Interrupt Pin	351
13.5 Anwendungsmöglichkeiten	351
13.5.1 Bedienelement-Joystick	351
13.5.2 Linearbewegungsdetektion	356
13.5.2.1 Single-Ended-Messung	357
13.5.2.2 Einfluss von Streufeldern	360
13.5.2.3 Differentielle Messung	361

13.6	Sensorsysteme im Vergleich. ....	367
13.6.1	ALS31313 versus A3131x Single-Ended .....	367
13.6.2	ALS31313 versus A3131x Differentiell .....	368
13.6.3	ALS31313 versus A3131x Rauschen Single-Ended .....	369
13.7	Zusammenfassung und Ausblick .....	370

## **Kapitel 14**

### **Positionserfassung mittels Sensor-Array aus Tunnel-Magneto-resistiven**

#### **Vortex-Dots und lernender Signalverarbeitung .....** **373**

*Thorben Schütte, Oleg Petrak, Klaus Jünemann, Karl-Ragnar Riemschneider*

14.1	Einleitung .....	373
14.2	Tunnel-Magneto-resistive Sensoren .....	374
14.2.1	Aufbau und Funktion von TMR-Sensoren .....	374
14.2.2	Automatisierter Messplatz .....	376
14.2.3	Charakterisierung durch zweidimensionale Kennfelder .....	377
14.2.4	TMR-Sensor mit Vorzugsrichtung .....	378
14.2.5	TMR-Sensor mit Vortex-Struktur .....	379
14.3	Magneto-resistive Sensor-Arrays .....	381
14.3.1	Signalverarbeitung für Sensor-Arrays .....	381
14.3.2	Aufbau und Simulationsmodell .....	382
14.3.3	Störunterdrückung im Ortsfrequenzbereich .....	384
14.3.4	Störunterdrückung mit Filtermasken .....	386
14.3.5	Modellbasierte Signalverarbeitung .....	387
14.3.6	Modellfreie Signalverarbeitung .....	390
14.4	Zusammenfassung und Ausblick .....	394

# Kapitel 1

## Szenarienbasierte Validierung eines hybriden Radarmodells für Test und Absicherung automatisierter Fahrfunktionen

Thomas Eder<sup>1,2,\*</sup>, Alexander Prinz<sup>1,3,\*</sup>, Ludwig Brabetz<sup>2</sup>, Erwin Biebl<sup>3</sup>

**Kurzfassung** Virtuelle Testmethoden im Bereich der Absicherung automatisierter Fahrfunktionen benötigen Modelle für die Umfeldsensorik. Gängige Modellierungsansätze konnten bisher nicht validiert werden, da keine ausreichenden Kriterien bekannt sind. In diesem Kapitel wird daher eine statistische Validierungsmethodik für die Positionsverteilung von Radardetektionen vorgestellt. Herausforderungen und Anwendungsmöglichkeiten der Methodik werden mit Hilfe realer und simulierter Radardaten diskutiert.

### 1.1 Einleitung

Die Entwicklung und Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen stellt die Automobilindustrie derzeit vor große Herausforderungen. Gängige Entwicklungs- und Absicherungsmethoden erfordern einen immer umfangreicheren Testaufwand und sind folglich sowohl kosten- als auch zeitintensiv. Virtuelle Testmethoden, die zusätzlich die frühzeitige Identifikation von Problemen während des Entwicklungszyklus erlauben, sind dabei vielversprechend, um neuartige Technologien zur Serienreife zu bringen. Dabei muss sowohl das Fahrzeugumfeld, als auch die Sensorik simuliert werden. Im Gegensatz zur Umfeldsimulation, bei der beispielsweise Fahrzeuge und deren Dynamik simuliert werden, ist es bei der Sensorsimulation das Ziel, die spezifische Wahrnehmung zu simulieren. Diese besteht unter anderem aus Koordinatentransformationen, Messabweichungen und Zielerkennungsausfällen. Die Daten werden anschließend einer Fahrfunktion bereitgestellt (vgl. Bild 1).

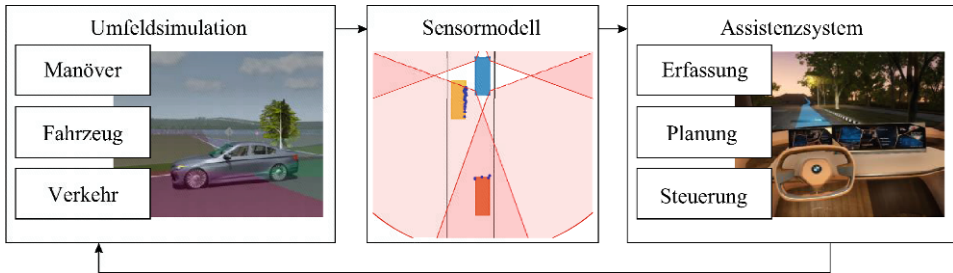
---

<sup>1</sup> BMW AG.

<sup>2</sup> Technische Universität München.

<sup>3</sup> Universität Kassel.

\* Gleicher Beitrag beider Autoren.



**Bild 1:** Darstellung der Simulationswirkkette. Dabei übergibt die Umfeldsimulation eine objektbasierte Abstraktion der Szene an das Sensormodell. Dieses bildet die sensorspezifische Erfassung nach und stellt die Sensordaten der Fahrfunktion zu Verfügung.

Insbesondere hat sich die Radarsensorik aufgrund zahlreicher Effekte, wie beispielsweise das stetig schwankende Signal-Rausch-Verhältnis, die Mehrwegeausbreitung oder die Interferenz, als eine besonders herausfordernde Aufgabe herausgestellt [1]. Eine exakte physikalische Modellierung mit Hilfe der Maxwell-Gleichungen ist wegen des Kosten- und Rechenaufwands nicht möglich. Darüber hinaus kommt erschwerend hinzu, dass aktuelle Umfeldsimulationen eine derart detailgetreue Modellierung schlichtweg unmöglich machen.

Die Umfeldsimulation ist eine vereinfachte Darstellung der Realität. Dabei werden Fahrzeuge, Verkehrsteilnehmer und Gebäude durch geometrische Flächen angenähert. Zum einen ist die Beschreibung der virtuellen Szene nicht einheitlich und damit abhängig vom Simulationshersteller. Zum anderen bieten diese Hersteller meist nur eingeschränkte Möglichkeiten (z. B. OptiX), grafische Elemente für die Sensorsimulation zu verwenden. Aus diesem Grund hat sich unter den Automobilherstellern ein Modellierungsstandard für automatisierte Fahrfunktionen, Fahrsimulationen und Sensormodelle etabliert [2].

Die Standardisierung führt jedoch, gegenüber der grafischen Visualisierung, zu einer starken Vereinfachung. Infolgedessen werden Objekte durch einhüllende Quader, sogenannte *Bounding-Boxes*, dargestellt. Eine einzelne Szene besteht somit aus einer Menge an, für einen Sensor erfassbaren, Objekten  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , die sowohl Position als auch deren Kinetik beinhaltet. Das Sensormodell kann nun als mathematische Abbildung

$$M: X \rightarrow Y \quad (1)$$

aufgefasst werden [3]. Die Menge  $Y$  ist dabei abhängig von der festgelegten sensorspezifischen Ausgangsgröße, in dem hier relevanten Fall sogenannte Radardetektionen.

Zur Generierung der Detektionen werten automobiler Radarsensoren Reflexionspunkte aus. Jeder Detektion kann eine Position  $(x, y) \in \mathbb{R}^2$  und eine radiale Geschwindigkeit  $v_r \in \mathbb{R}$  zugeordnet werden. Darüber hinaus werden weitere radarspezifische Informationen (für eine detaillierte Betrachtung der Radarsignalverarbeitung siehe [4], [5]) ermittelt.

Man unterscheidet für die oben genannten Abbildungen, die einen Radarsensor auf Detektionsebene repräsentieren, verschiedene Modellierungstiefen. Die einfachsten Mo-

delle ordnen allen Objekten ein oder mehrere Detektionen zu und werden als *idealisierte Modelle* bezeichnet. Dabei ist es möglich, geometrisch verdeckte Objekte in der Liste der Detektionen zu berücksichtigen, indem diese aus der Detektionsliste entfernt werden. Die Erweiterung der idealisierten Modelle um zusätzliche sensorspezifische Messcharakteristiken, beispielsweise Messabweichungen, Zielausfälle oder Geisterziele, wird als *phänomenologisches Sensormodell* bezeichnet. Dabei ist eine Berücksichtigung physikalischer Gesetzmäßigkeiten mittels einfacher Gleichungen möglich. Ebenso ist eine statistische, oftmals auf Daten basierte, Modellierung denkbar. Die letzte Ebene bilden *physikalische Sensormodelle*, die das Ausbreitungsverhalten elektromagnetischer Wellen simulieren und nur zusammen mit einer Signalverarbeitung ein Detektionsmodell bilden. Der aktuelle Detailgrad des Standardisierungslevels erlaubt keine hinreichend genaue physikalische Modellierung in diesem Sinne. Modelle, wie beispielsweise von Holder [6] und Berthold [7], die einen hohen Anteil physikalischer Gesetzmäßigkeiten beinhalten, werden deshalb im Folgenden ebenso zu den phänomenologischen Sensormodellen gezählt.

### ***1.1.1 Modellierung und Validierung von Radardetektionslisten***

Um eine einfache, verständliche Übersicht gängiger Modellierungsansätze zu geben, wird im Folgenden die Wirkweise einzelner Modelle mit deren Prinzipdarstellungen erklärt. Erste Radardetektionsmodelle zur Anwendung in der Automobilindustrie gehen auf Bühren und Yang [8] zurück. Beobachtungen realer Radardetektionen rechtfertigten die Definition charakteristischer Rückstreuzentren für PKWs und wurden durch Simulationen von Buddendick [9] bestätigt. Das Bühren-Modell bildet dabei Detektionen in Abhängigkeit der radialen Entfernung auf den vordefinierten Reflexionsflächen sowie den bereits genannten Rückstreuzentren.

Ein weiterer Ansatz, der in kommerzieller Software zur Simulation von Radardetektionen verwendet wird, basiert auf dem im Datenblatt angegebenen Auflösungsvermögen eines Radarsensors [10]. Das Sensorsichtfeld (FoV: Field of View) wird dazu in Auflösungszellen unterteilt, die sich aus Strahlen und konzentrischen Kreisen zusammensetzen. Die Schnittpunkte einzelner Objekte mit den Strahlen sowie den konzentrischen Kreisen bilden die Grundlage einer Detektion. Liegen diese nahe an den von den Strahlen und konzentrischen Kreisen gebildeten Gitterpunkten, so führt dies zu einer Radardetektion (vgl. Bild 2).

Ein umfangreiches Modell, das auf einer Diskretisierung des Sensorerfassungsbereichs in Polarkoordinaten beruht, wurde von Berthold et al. vorgestellt [7]. Diese Diskretisierung ähnelt dem Prinzip der oben genannten Auflösungszellen, basiert jedoch auf einer Modellierung des Energieflusses, der sich aus Transmission, Reflexion und Absorption zusammensetzt. Überschreitet die für den Radarsensor relevante reflektierte Leistung einer Zelle einen adaptiven Schwellwert, so wird eine Radardetektion zurückgegeben. Der Schwellwert berechnet sich aus den umliegenden Entfernungszellen. Die Messabweichungen werden gesondert modelliert.



**Bild 2:** Darstellung zweier phänomenologischer Modellansätze. Im linken Schaubild werden Radardetektionen aufgrund sichtbarer charakteristischer Rückstreuern gebildet. Das Auflösungsmodell in der rechten Darstellung erzeugt Radardetektion (kariert) sofern Schnittpunkte (weiß) nahe an diskreten Auflösungsgridpunkten liegen.

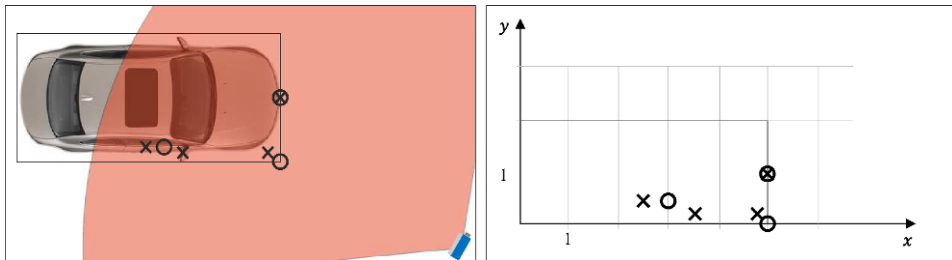
Die zuvor angesprochenen physikalisch motivierten Ansätze haben das Ziel, die zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten nachzubilden, ohne jedoch auf einen expliziten Sensor einzugehen. Dahingegen versuchen rein datenbasierte Modelle auf Basis aufgezeichneter Sensormessdaten, die beobachtete Charakteristik nachzubilden [11]. Diese sind weder anpassbar, noch betrachten sie physikalische Zusammenhänge. Darüber hinaus hat die Methode zur Datengenerierung in der Praxis erhebliche Schwierigkeiten. Der im Folgenden vorgestellte hybride Modellierungsansatz versucht, die Vorteile beider Ansätze zu kombinieren.

### 1.1.2 Beitrag zur Sensormodellvalidierung

Zunächst ist jeder Modellierungsansatz legitim, jedoch muss dessen Anwendbarkeit im Einzelnen geprüft werden. Für eine anwendungsspezifische Prüfung müssen Gütekriterien festgelegt werden. Da das Modell einen Sensor jedoch niemals vollumfänglich nachbilden kann, bleibt es bezüglich weiterer Kriterien stets falsifizierbar.

Zur Bewertung und zum Vergleich einzelner Sensormodelle hat sich in der Praxis die Aufzeichnung und anschließende Re-Simulation unter Verwendung des Sensormodells etabliert [12–14]. Aufgrund ihrer Relevanz für eine nachgelagerte Sensorfusion, ist die Bewertung der räumlichen Verteilung [15] der Radardetektionen oftmals ein wesentliches Kriterium. Die dabei entstehenden Schwierigkeiten in der Anwendung sollen durch das nachfolgende einfache Beispiel verdeutlicht werden.

**Beispiel.** In der Realität werden vier Radardetektionen, die im Koordinatensystem des Zielfahrzeugs durch  $Y_{real} = \{(2,5; 0,5), (3,5; 0,25), (4,75; 0,25), (5; 1)\}$  gegeben sind (vgl. Bild 3), beobachtet. Nun wird die gleiche Szene in der Simulation wiederholt. Dabei werden jedoch nur drei Detektionen  $Y_{sim} = \{(3; 0,5), (5; 0), (5; 1)\}$  generiert.



**Bild 3:** Darstellung der realen (Kreuz) und simulierten Daten (Kreis) aus dem Beispiel von Abschnitt 1.1.2. Links eine denkbare Szene aus der sich die Beispieldaten ergeben. Im rechten Bild sind die Detektionen jener Szene in einem Koordinatensystem des Zielfahrzeugs dargestellt.

Aufgrund der unterschiedlichen Detektionszahl ist eine direkte Berechnung der Messabweichung nicht möglich. Assoziiert man jedoch die Detektionen mit Hilfe eines Nächste-Nachbarn-Verfahrens  $f_{NN}$ , das einer simulierten Detektion die nächstliegende Detektion im Realdatensatz zuordnet, so kann der Fehler im quadratischen Mittel durch

$$E_{RMS}(Y_{sim}, Y_{real}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\| \begin{pmatrix} x_{sim}^{(i)} \\ y_{sim}^{(i)} \end{pmatrix} - f_{NN} \left( \begin{pmatrix} x_{sim}^{(i)} \\ y_{sim}^{(i)} \end{pmatrix} \right) \right\|_2^2} \quad (2)$$

berechnet werden. Im vorliegenden Fall gilt daher  $E_{RMS} = 0,533$ .

Für das genannte Beispiel muss nun ein Schwellwert festgelegt werden, der definiert, ab wann ein Modell als valide bezüglich der Positionsverteilung einzustufen ist. Ein solcher Schwellwert ist jedoch rein subjektiver Natur und nur schwer interpretierbar. Ein Maß für die Validität eines Modells sollte daher im mathematischen Sinne durch eine Abbildung

$$V: Y_{real} \times Y_{sim} \rightarrow [0; 1] \quad (3)$$

gegeben sein. Im Falle eines perfekten Modells sollte  $V(Y_{real}, Y_{sim}) = 1$  gelten. In den beiden Sonderfällen, in denen die zu validierenden Datensätze nur aus Real- oder Simulationsdaten bestehen, sollte zusätzlich

$$V(Y_{real}^{(1)}, Y_{real}^{(2)}) = 1 \quad \text{und} \quad V(Y_{sim}^{(1)}, Y_{sim}^{(2)}) = 1 \quad (4)$$

gelten. Die Forderung aus Gleichung (4) wird als Konsistenzkriterium bezeichnet. Dieses Kapitel stellt eine im Bereich der Radarmodellierung neuartige Validierungsmethodik vor. Ferner wird die Methodik unter Anwendung eines hybriden Radarmodells erprobt.



## 1.2 Hybride Radardetektionsmodelle

Hybride Radardetektionsmodelle vereinen zunächst einfach nur mehrere Modellierungsansätze. Die Kombination physikalisch motivierter Ansätze mit einer messdatenbasierten Optimierung soll die Nachbildung eines expliziten Sensors ermöglichen. Im Gegensatz zu rein datenbasierten Modellen ist dieser Ansatz für Entwickler besser interpretierbar. Darüber hinaus ergeben sich in allen Phasen der Entwicklung Möglichkeiten zur Anwendung. Im Folgenden wird ein Radardetektionsmodell auf Basis ausgesendeter Strahlen vorgestellt und um eine datenbasierte Optimierung erweitert.

### 1.2.1 Strahlenbasierte Radardetektionsmodellierung

Strahlenbasierte Radardetektionsmodelle orientieren sich am Modell eines Lidars [16]. Im dreidimensionalen Raum kann dieser Ansatz als strahlenoptische Hochfrequenzapproximation der Maxwell-Gleichungen betrachtet werden [17]. Der zu modellierende Radarsensor lässt sich nicht ausschließlich, aber insbesondere durch seinen maximalen Entfernungsbereich und Winkelbereich charakterisieren. Innerhalb des Sensorsichtfeldes werden  $n \in \mathbb{N}$  Strahlen im Abstand von  $\Delta\varphi = \varphi_{FoV}/(n-1)^\circ$  ausgesendet. Trifft einer der Strahlen ein Objekt, dargestellt durch seinen einhüllenden Quader, so wird eine Radardetektion generiert.

#### 1.2.1.1 Modellierung radarspezifischer Charakteristiken

Das einfache Modell muss um radarspezifische Charakteristiken erweitert werden. Dabei ist eine entfernungs- und winkelabhängige Existenzwahrscheinlichkeit  $p$  der strahlenbasierten Detektionen wichtig. Fällt ein Strahl beispielsweise in einem hohen Einfallswinkel auf ein Objekt ein, so ist eine Reflexion und daher auch eine Detektion eher unwahrscheinlich. Um dies bei der Modellierung zu berücksichtigen, wird für jeden Strahl eine Zufallszahl  $\theta \sim \mathcal{U}(0, 1)$  gezogen. Die strahlenbasierte Detektion im Punkt  $(x, y) \in \mathbb{R}^2$  erscheint nur dann in der Liste der Detektionen, wenn für den Einfallswinkel  $\vartheta$  und die Distanz  $d = \sqrt{x^2 + y^2}$  die Bedingung  $\theta \leq p(d, \vartheta)$  erfüllt ist.

Zusätzlich dazu müssen Abweichungen in der Positionsmessung miteinbezogen werden. Im einfachsten Fall geschieht dies durch Addition eines normalverteilten Fehlers. Trifft ein Strahl das Zielfahrzeug im Punkt  $(x, y)$  so wird zunächst die Existenzbedingung überprüft. Ist Letztere erfüllt, so gilt

$$(x_{neu}, y_{neu}) = (x, y) + (x_\varepsilon, y_\varepsilon), \quad (5)$$

mit der zufälligen Messabweichung  $x_\varepsilon, y_\varepsilon \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ . Der Algorithmus (1) fasst dies nochmal zusammen.

---

**Algorithmus (1)** Einfaches strahlenbasiertes Radarmodell

---

**Input:** Position des Zielfahrzeuges zum Zeitpunkt  $t$  in Sensorkoordinaten  $X_t$

**Output:** Modellierte Radardetektionsliste  $Z_t$

```

1: Erzeugen der Strahlen  $\{r_i\}_{i=1,2,\dots,n}$  im Winkel  $\varphi_i = \varphi_{FOV}/2 - (i-1)/(n-1) \varphi_{FOV}$ 
2: while  $i \leq n$  do
3:   if  $r_i$  trifft das Zielfahrzeug  $X_t$  then
4:      $(x, y) \leftarrow$  Auftreffposition
5:      $d \leftarrow$  Strahlenlänge
6:      $\vartheta \leftarrow$  Einfallswinkel
7:      $\theta \leftarrow$  Zufallszahl aus  $\mathcal{U}(0, 1)$ 
8:     if  $\theta \leq p(d, \vartheta)$  then
9:        $x_\varepsilon, y_\varepsilon \leftarrow$  normalverteilte Messabweichung aus  $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ 
10:       $Z_t \leftarrow (x, y) + (x_\varepsilon, y_\varepsilon)$ 
11:     end if
12:   end if
13: end while
14: return  $Z_t = \{(x_i, y_i)\}_{i=1,2,\dots,n_t}$ 

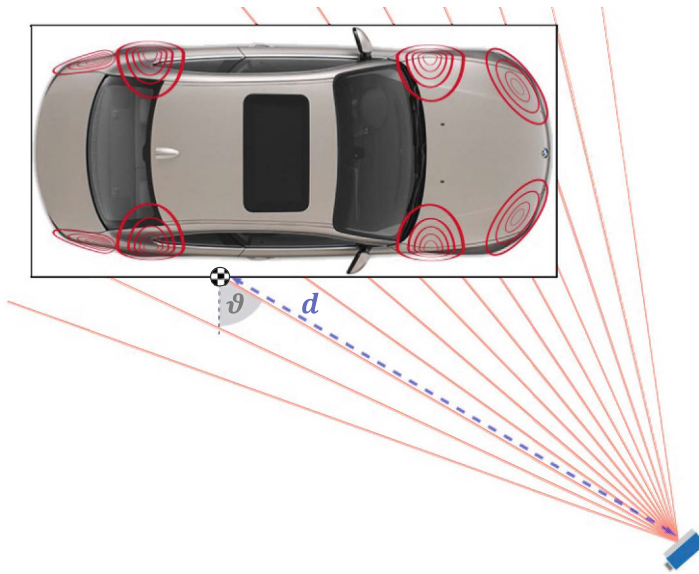
```

---

### 1.2.1.2 Berücksichtigung fahrzeugspezifischer Radarrückstreuzentren

Die Darstellung in Bild 4 verdeutlicht, dass der Einfallswinkel  $\vartheta$  des Strahls gegenüber der einhüllenden Box nur eine grobe Näherung zum tatsächlichen Einfallswinkel darstellt. Zusätzlich kann in Messungen beobachtet werden, dass in gewissen Bereichen häufiger Radardetektionen auftreten. Dies ist vor allem auf die stärker reflektierenden geometrischen Strukturen zurückzuführen. Als Beispiel hierfür können Scheinwerfer und Radkästen genannt werden. Eine rein distanz- und winkelabhängige Existenzwahrscheinlichkeit ist daher nicht ausreichend. Eine zusätzliche Berücksichtigung charakteristischer Rückstreuzentren, wie bereits im Bühren-Modell angewendet, ist deshalb naheliegend.

Im Falle eines Treffers muss das Modell prüfen, ob dieser nahe an einem Rückstreuzentrum liegt. Anschließend können unterschiedliche Existenzkriterien angewendet werden. Ist die Existenzwahrscheinlichkeit in der Nähe eines charakteristischen Rückstreuzentrums größer, so kann eine Detektionshäufung in Simulationsdaten nachgebildet werden. Die Wahrscheinlichkeit für charakteristische Treffer wird im Folgenden mit  $p_{char}$  bezeichnet. Alle anderen Existenzwahrscheinlichkeiten werden mit  $p_{ord}$  (engl. ordinary) bezeichnet.

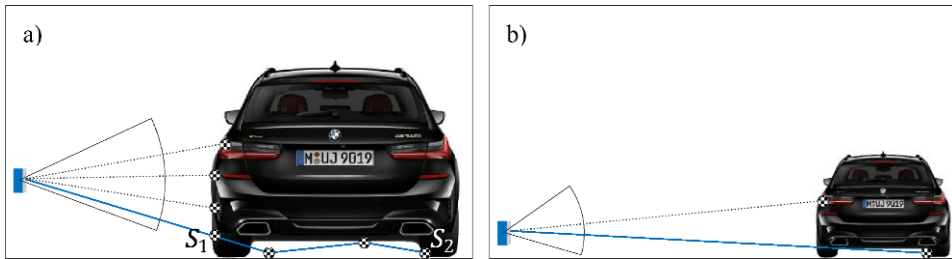


**Bild 4:** Darstellung eines strahlenbasierten Radardetektionsmodells. Unter Berücksichtigung des Einfallswinkels  $\vartheta$  und der Distanz  $d$  werden Detektionen gebildet. Detektionen nahe charakteristischer Rückstreuzentren treten dabei häufiger auf und werden durch elliptische Bereiche beschrieben. Deren Verteilungen sind oftmals asymmetrisch (Crystal-Ball-Funktion).

### 1.2.1.3 Modellierungsansätze weiterer radarspezifischer Effekte

Ein wesentliches Merkmal von Radarsensoren ist die Detektion scheinbar verdeckter Objekte aufgrund von Bodenreflexionen. So konnten beispielsweise Berthold et al. [7] in ihren Messaufzeichnungen beobachten, dass Radardetektionen nicht nur an den Kanten und charakteristischen Rückstreuzentren der Fahrzeuge auftreten, sondern auch die gegenüberliegenden Räder detektiert werden. In den meisten Fällen, beispielsweise wenn sich das Zielfahrzeug mit einem Gierwinkel von ca.  $45^\circ$  vor dem Radar befindet, können beide Hinterräder auf dem direkten, strahlenoptischen Wege detektiert werden. In seltenen Fällen ist eine Detektion aufgrund von Unterbodenreflexionen ebenfalls möglich (vgl. Bild 5).

Rein geometrisch lassen sich für fast jeden Strahl (außer im Falle eines Treffers der Ecken) zwei Schnittpunkte  $S_1$ ,  $S_2$  mit der einhüllenden Box des Zielfahrzeugs berechnen. Dabei sei  $S_1$  der direkt beobachtbare Schnittpunkt und  $S_2$  der Schnittpunkt, an dem der Strahl aus der Box austritt. Liegt  $S_2$  nahe an einem Rad, so kann nach Berücksichtigung der Strahlenlänge, Bodenfreiheit und Sensorverbauposition eine weitere Detektion auftreten. Zur Anwendung in dem vorgestellten Modellierungsansatz muss eine weitere Existenzwahrscheinlichkeit  $p_{add}$  (engl. additional) festgelegt werden.



**Bild 5:** Entstehung von Detektionen innerhalb der einhüllenden Box, bzw. an nicht direkt sichtbaren Kanten. Im Schaubild a) entstehen derartige Detektionen aufgrund von Mehrfachreflektionen. Darüber hinaus können, wie in Bild b) dargestellt, gegenüberliegende Räder bei hinreichend großer Distanz auch direkt detektiert werden.

Ein weiterer Radareffekt, der von Kellner et al. [18] beobachtet wurde und oftmals *Micro-Doppler* genannt wird, ist die Abweichung der Geschwindigkeiten von Radardetektionen auf Rad und Karosserie. Die radiale Geschwindigkeit  $v_r$  kann durch

$$v_r = v \cos \alpha \quad (6)$$

berechnet werden und so in einem strahlenbasierten Radarmodell berücksichtigt werden. Dabei bezeichnet  $\alpha$  den Gierwinkel in Sensorkoordinaten und  $v$  die relative Geschwindigkeit des Zielfahrzeugs. Die auf dem Rad auftretenden Detektionen weisen nun Geschwindigkeiten im Intervall  $[0, 2v \cos \alpha]$  auf. Jeder horizontale Bereich eines Rades deckt dabei nur einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich ab. Die idealisierten Geschwindigkeiten folgen daher der Verteilung

$$v \sim c_\alpha \sqrt{1 - \left(\frac{x}{v \cos \alpha} - 1\right)^2} \quad \text{für } x \in [0; 2v \cos \alpha], \quad (7)$$

mit einer Integrationskonstante  $c_\alpha > 0$ . Bei einem Gierwinkel von  $25^\circ$  liegt die Wahrscheinlichkeit für eine Geschwindigkeit im Intervall  $[1,7v_r; 2v_r]$  näherungsweise bei 9,4%. Durch ziehen aus der Verteilung kann der Effekt so berücksichtigt werden.

Für die folgende Ausarbeitung werden die beiden oben genannten Effekte jedoch nicht berücksichtigt, zumal die Geschwindigkeit nicht Teil der positionsbasierten Validierungsmethodik ist und die Realdaten des Fahrmanövers (vgl. Abschnitt 1.4) keinerlei Detektionen an gegenüberliegenden Rädern erkennen lassen.

### 1.2.1.4 Der Algorithmus des parametrierbaren Radardetektionsmodells

Die Herleitung des strahlenbasierten Radarmodells in Kombination mit charakteristischen Rückstreuzentren ist im Wesentlichen in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben worden. In Algorithmus (2) werden acht charakteristische Rückstreuzentren  $c_k = (x_{c_k}, y_{c_k})$  für  $k = 1, 2, \dots, 8$  unterschieden. Für jeden der Punkte  $c_k$  kann prinzipiell eine andere Existenzwahrscheinlichkeit  $p_{char}^{(k)}$  und Messabweichung  $\mathcal{F}_{char}^{(k)}$  definiert werden. In ähnlicher Weise werden auch die Existenzwahrscheinlichkeiten und Messabweichungen aller anderen Detektionen beschrieben. Dabei wird zwischen verschiedenen Seiten  $l \in \{\text{'vorne', 'hinten', 'links', 'rechts'}\}$  unterschieden. Dies erlaubt eine Berücksichtigung der Abweichung von einhüllender Box und Fahrzeugaußenkontur.

Die Aussendung der Strahlen in stets gleichbleibenden Winkelschritten führt in statischen Fällen zu Detektionsanhäufungen außerhalb charakteristischer Rückstreuzentren. Um eine stark multimodale Detektionsverteilung zu vermeiden, kann der Strahlenwinkel  $\varphi_i$  variiert werden. Die Variation  $\varphi_{noise}$  kann dabei im Bereich  $[-\Delta\varphi/2; \Delta\varphi/2]$  liegen. Dabei bezeichnet  $\Delta\varphi$  den Winkelabstand der einzelnen Strahlen. Reduziert man das Intervall um  $2\delta$ , so kann ein Mindestabstandswinkel  $\delta$  einzelner Detektionen berücksichtigt werden.

---

#### Algorithmus (2) Hybrides Radarmodell

---

**Input:** Position und Typ des Zielfahrzeuges zum Zeitpunkt  $t$  in Sensorkoordinaten  $X_t$

**Output:** Modellierte Radardetektionsliste  $Z_t$

```

1: Erzeugen der Strahlen  $\{r_i\}_{i=1,2,\dots,n}$  im Winkel  $\varphi_i = \varphi_{FOV}/2 - (i-1)/(n-1)\varphi_{FOV} + \varphi_{noise}$  mit Winkelrauschen  $\varphi_{noise} \sim \mathcal{U}(-\Delta\varphi/2 + \delta, \Delta\varphi/2 - \delta)$  und  $0 \leq \delta \leq \Delta\varphi/2$ 
2: while  $i \leq n$  do
3:   if  $r_i$  trifft das Zielfahrzeug  $X_t$  then
4:      $(x, y) \leftarrow$  Auftreffposition
5:      $l \leftarrow$  Auftreffort {vorne, hinten, rechts, links}
6:      $d \leftarrow$  Strahlenlänge
7:      $\vartheta \leftarrow$  Einfallswinkel
8:      $\theta \leftarrow$  Zufallszahl aus  $\mathcal{U}(0, 1)$ 
9:     if Auftreffpunkt nahe an einem der charakteristischen Rückstreuzentrum  $c_k$  and  $\theta \leq p_{char}^{(k)}(d, \vartheta, \varphi_i)$  {Wahrscheinlichkeit für eine Detektion ist erreicht} then
10:        $x_\varepsilon, y_\varepsilon \leftarrow$  zufällige Messabweichung aus  $\mathcal{F}_{char}^{(k)}$ 
11:        $Z_t \leftarrow (x_{c_k}, y_{c_k}) + (x_\varepsilon, y_\varepsilon)$ 
12:     else if  $\theta \leq p_{ord}^{(l)}(d, \vartheta, \varphi_i)$  then
13:        $x_\varepsilon, y_\varepsilon \leftarrow$  zufällige Messabweichung aus  $\mathcal{F}_{ord}^{(l)}$ 
14:        $Z_t \leftarrow (x, y) + (x_\varepsilon, y_\varepsilon)$ 
15:     end if
16:   end if
17: end while
18: return  $Z_t = \{(x_i, y_i)\}_{i=1,2,\dots,n_t}$ 

```

---

## 1.2.2 Parametrierung des Radardetektionsmodells

Die Parameter des strahlenbasierten Modells können in zwei Gruppen unterteilt werden. Man unterscheidet zwischen *fahrzeugspezifischen* und *modellspezifischen* Parametern. Beispielsweise ist die Wahl der charakteristischen Rückstreuzentren ein fahrzeugspezifischer Parameter, wohingegen die Strahlendichte modellspezifischer Natur ist.

Das nachfolgende Beispiel nutzt Informationen auf Basis exemplarischer Produktanforderungen und leitet daraus die Existenzwahrscheinlichkeiten ab. Zusätzlich dazu werden die verwendeten Messabweichungen vorgestellt. Der darauffolgende Abschnitt erläutert eine Parametrierung mit Hilfe synthetischer Messdaten.

### 1.2.2.1 Beispielhafte Parameterwahl

Die Parametrierung der distanz- und winkelabhängigen Existenzwahrscheinlichkeit einzelner Radardetektionen ist einer der wichtigsten Parameter des Modells. Dieser ist stark an die Anzahl der Strahlen und deren Dichte  $\rho$  gekoppelt. Für die Anzahl der Strahlen, die auf ein meterlanges Kreisbogensegment mit dem Radius  $r$  eintreffen, gilt

$$\rho(r) = \frac{n-1}{\pi r \frac{\varphi_{FoV}}{180^\circ}} \sim \frac{1}{r}. \quad (8)$$

Ein Radar mit einem Sichtfeld von 150 Grad wird mit 76 Strahlen modelliert. Bei einem mittleren Strahlenabstand von zwei Grad beträgt die Strahlendichte  $\rho(30 \text{ m}) = 0,968$  Strahlen pro Meter. Folglich wird ein Fahrzeug mit einer Breite von 2 Metern in 30 Metern Entfernung im Mittel von 1,936 Strahlen getroffen. Wird von dem Sensor die Detektion eines solchen Objekts in 99% der Fällen gefordert, so muss für die Existenzwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Distanz

$$p_D(30) = \frac{0,99}{2\rho(30 \text{ m})} = 0,51 \quad (9)$$

gelten. Legt man zusätzlich die maximale Anzahl an Detektionen im Nahbereich fest, so kann man die distanzabhängige Existenzwahrscheinlichkeit bestimmen. Dies erfolgt unter der empirischen Annahme eines exponentiellen Abfalls der Detektionszahlen. Die winkelabhängige Existenzwahrscheinlichkeit kann beispielsweise durch die rechte Hälfte einer adaptierten Kosinus-Fensterfunktion gemäß Gleichung (10) beschrieben werden.

$$p_W(x) = \begin{cases} 0,5 \left( 1 - \cos\left(\pi \frac{x+b}{b}\right) \right) & , \text{für } x \leq b \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases} \quad \text{mit } b \in [0^\circ; 90^\circ] \quad (10)$$