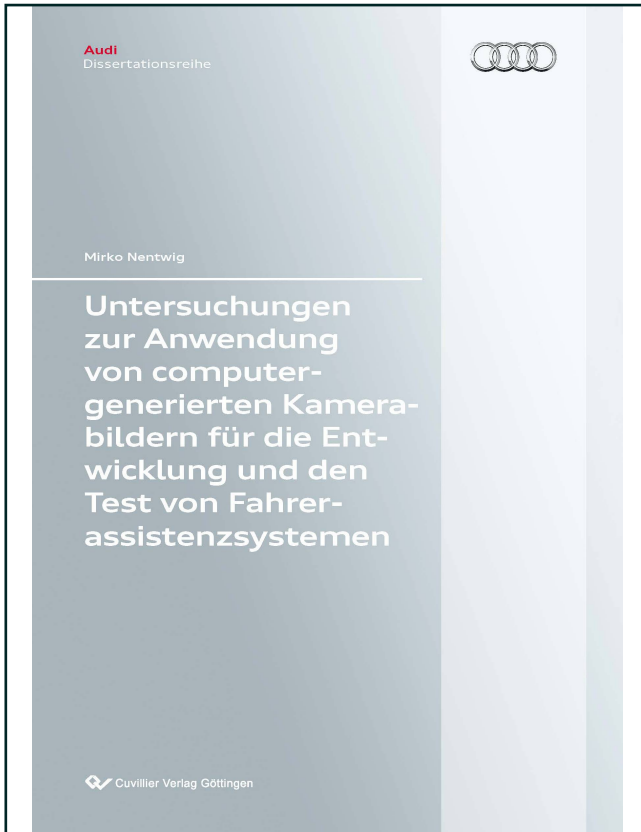




Mirko Nentwig (Autor)

**Untersuchungen zur Anwendung von  
computergenerierten Kamerabildern für die  
Entwicklung und den Test von  
Fahrerassistenzsystemen**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6588>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Zielsetzung . . . . .	4
1.3. Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2. Fahrerassistenz- und aktive Sicherheitssysteme</b>	<b>7</b>
2.1. Aktuelle Fahrerassistenzsysteme und aktive Sicherheitssysteme . . . . .	7
2.1.1. Adaptive Cruise Control . . . . .	8
2.1.2. Spurverlassenswarnung/Spurhalteunterstützung . . . . .	9
2.1.3. Lichtassistenzsysteme . . . . .	10
2.1.4. Verkehrszeichenerkennung . . . . .	11
2.1.5. Kollisionsminderung/-vermeidung . . . . .	12
2.2. Sensorik zur Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds . . . . .	12
2.2.1. Sensorfusion . . . . .	13
2.2.2. Radar . . . . .	13
2.2.3. Ultraschallsensor . . . . .	14
2.2.4. Navigationssystem/prädiktive Streckendaten . . . . .	14
2.2.5. Kamera . . . . .	14
2.3. Bildverarbeitung im Fahrzeug . . . . .	24
2.3.1. Signalverarbeitung in der Bildverarbeitung . . . . .	24
2.3.2. Spurerkennung . . . . .	25
2.3.3. Fahrzeugdetektion . . . . .	27
2.3.4. Verkehrszeichenerkennung . . . . .	30
2.3.5. Herausforderungen . . . . .	31
2.3.6. Zusammenfassung . . . . .	31
<b>3. Entwicklungsmethoden für Fahrzeugelektronik</b>	<b>33</b>
3.1. Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie . . . . .	33
3.2. Erprobung von Fahrerassistenzsystemen . . . . .	34
3.3. Simulationsumgebungen für Fahrerassistenz- und aktive Sicherheitssysteme . . . . .	37
3.3.1. Wissenschaftliche Simulationen . . . . .	37
3.3.2. Kommerzielle Simulationen . . . . .	40
3.3.3. Vergleich der Simulationsumgebungen und Zusammenfassung . . . . .	44
<b>4. Evaluierung von Konzepten der Computergrafik</b>	<b>49</b>

4.1.	Anforderungsanalyse . . . . .	49
4.1.1.	Stimulation der Signalverarbeitung . . . . .	50
4.1.2.	Stimulation der Bildverarbeitung . . . . .	50
4.1.3.	Anforderungen an die Qualität der Simulation . . . . .	51
4.2.	Beschreibung der Simulationsumgebung . . . . .	53
4.2.1.	Virtual Test Drive-Framework . . . . .	53
4.2.2.	Architektur der Simulationsumgebung der Kamera . . . . .	54
4.2.3.	OpenSceneGraph basierte Grafik-Engine . . . . .	55
4.3.	Simulation der Beleuchtung . . . . .	57
4.3.1.	Beleuchtungsmodelle in der Computergrafik . . . . .	57
4.3.2.	Schattenberechnung . . . . .	58
4.3.3.	Atmosphärische Simulation . . . . .	62
4.3.4.	Zusammenfassung . . . . .	75
4.4.	Geometrie und Oberflächeneigenschaften von Objekten . . . . .	76
4.4.1.	Oberflächenmodelle . . . . .	76
4.4.2.	Fahrzeuge . . . . .	77
4.4.3.	Straße . . . . .	88
4.4.4.	Verkehrsschilder . . . . .	107
4.4.5.	Zusammenfassung . . . . .	109
4.5.	Synthese von Kamerabildern . . . . .	113
4.5.1.	Bildsyntheseprozess der Computergrafik . . . . .	113
4.5.2.	Steigerung der Realitätsnahe eines synthetischen Bilds . . . . .	115
4.5.3.	Anti-Aliasing-Filter . . . . .	116
4.5.4.	Modell des Strahlungsaufnehmers . . . . .	118
4.5.5.	Rauschen . . . . .	123
4.5.6.	Tiefenschärfe . . . . .	125
4.5.7.	Verzeichnung . . . . .	129
4.5.8.	Zusammenfassung . . . . .	131
4.6.	Aufbau von Szenen und Szenarien . . . . .	132
4.6.1.	Prozess zur Rekonstruktion von Testfahrten . . . . .	132
4.6.2.	Extraktion von Daten aus der realen Testfahrt . . . . .	133
4.6.3.	Verfahren zur Generierung von Straßenverläufen . . . . .	136
4.6.4.	Gestaltung der Szene . . . . .	141
4.6.5.	Zusammenfassung . . . . .	142
4.7.	Zusammenfassung . . . . .	143
<b>5.</b>	<b>Entwicklung eines generischen Verfahrens zur Validierung und Kalibrierung der Simulation</b>	<b>145</b>
5.1.	Stand der Technik . . . . .	145
5.2.	Metrik zum Vergleich der Bildinhalte . . . . .	149
5.2.1.	Anforderungen . . . . .	149
5.2.2.	Struktur der Metrik . . . . .	150
5.2.3.	Strategien zum Vergleich der Bildinhalte . . . . .	150

5.2.4.	Merkmale für den Vergleich der Bildinhalte . . . . .	153
5.2.5.	Untersuchung der Vergleichsstrategien und der Merkmale für den Vergleich der Bildinhalte . . . . .	158
5.2.6.	Gesamt-Maß der Metrik . . . . .	161
5.2.7.	Anwendungsbeispiel . . . . .	162
5.3.	Kalibrierung der Simulationsumgebung durch Anwendung der Metrik . . . . .	163
5.3.1.	Integration der Metrik in die Simulationsumgebung . . . . .	164
5.3.2.	Verfahren zur Optimierung . . . . .	165
5.3.3.	Anwendungsbeispiel . . . . .	166
5.4.	Zusammenfassung . . . . .	169
<b>6.</b>	<b>Untersuchung der Anwendbarkeit einer Kamerasimulation im Entwicklungsprozess</b>	<b>171</b>
6.1.	Entwicklung eines Fahrzeugererkennungssystems . . . . .	171
6.1.1.	Evaluierung . . . . .	172
6.1.2.	Zusammenfassung . . . . .	173
6.2.	Untersuchung des Verhaltens der Signalverarbeitungskette in der Simulation . . . . .	174
6.2.1.	Vergleich der Kundenfunktion Active Lane Assist . . . . .	174
6.2.2.	Vergleich der Spur- und Fahrzeugererkennungsfunktion . . . . .	176
6.2.3.	Vergleich der Hypothesenverifikation der Fahrzeugererkennung . . . . .	179
6.2.4.	Vergleich der Hypothesengenerierung der Fahrzeugererkennung . . . . .	182
6.3.	Zusammenfassung . . . . .	186
<b>7.</b>	<b>Hardware-in-the-Loop Simulator zur Erprobung von Fahrerassistenzsystemen</b>	<b>189</b>
7.1.	Systemaufbau . . . . .	189
7.2.	Stimulation der Fahrzeugkamera . . . . .	190
7.2.1.	Abbildungsfehler . . . . .	191
7.3.	Weitere Sensormodelle . . . . .	193
7.3.1.	Radar . . . . .	194
7.3.2.	Prädiktive Streckendaten . . . . .	194
7.3.3.	Ultraschall . . . . .	194
7.4.	Anwendungsbeispiele . . . . .	195
7.4.1.	Active Lane Assist . . . . .	195
7.4.2.	Tempolimitanzeige . . . . .	195
7.4.3.	Akzeptanz der virtuellen Erprobung . . . . .	196
7.5.	Zusammenfassung . . . . .	196
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>199</b>
8.1.	Zusammenfassung . . . . .	199
8.2.	Ausblick . . . . .	205
<b>9.</b>	<b>Publikationen, Patente und betreute Arbeiten</b>	<b>207</b>
9.1.	Publikationen . . . . .	207
9.2.	Patentanmeldungen . . . . .	208

9.3. Betreute Arbeiten . . . . .	208
----------------------------------	-----

**Literaturverzeichnis** **209**

<b>A. Anhang</b>	<b>i</b>
A.1. Vergleich des Simulationslösungen . . . . .	i
A.2. Koordinatensysteme . . . . .	i
A.2.1. Weltkoordinatensystem (WKS) . . . . .	i
A.2.2. Umfeldsensorikkoordinatensystem (USK) . . . . .	i
A.2.3. Kamerakoordinatensystem (KOS) . . . . .	ii
A.2.4. Straßenkoordinatensystem . . . . .	ii
A.2.5. OpenGL-Koordinatensystem . . . . .	ii
A.3. Bewertung der Fahrzeuge . . . . .	iii
A.4. Anforderungen an die Simulation . . . . .	iv
A.4.1. Geometrie- und Oberflächeneigenschaften . . . . .	iv
A.4.2. Verkehrszeichen . . . . .	v
A.4.3. Beleuchtungssimulation . . . . .	vi
A.4.4. Szenen und Szenario Design . . . . .	vi
A.4.5. Bildentstehungsprozess . . . . .	vii
A.4.6. Weitere Anforderungen an das Testsystem . . . . .	vii
A.5. Szenengraphen . . . . .	vii
A.5.1. Fahrzeug . . . . .	vii
A.6. Herleitung der Emission von Wasserpartikeln . . . . .	vii