

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnisse	viii
Abbildungen	viii
Tabellen	xviii
Akronyme	xix
Nomenklatur	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Überblick	3
2 Stand der Technik	6
2.1 Sensormodelle	6
2.1.1 Idealisierte Modelle	7
2.1.2 Phänomenologische Modelle	8
2.1.3 Physikalische Modelle	9
2.2 Verfahren zur Simulation von Umfeldsensoren	10
2.2.1 Objektbasierte Simulation	11
2.2.2 Rasterbasierte Simulation	12
2.2.3 Raytracingbasierte Simulation	14
2.3 X-in-the-Loop (XiL) im Entwicklungsprozess	15
2.3.1 Model-in-the-Loop (MiL)	16
2.3.2 Software-in-the-Loop (SiL)	17
2.3.3 Hardware-in-the-Loop (HiL)	18
2.3.4 Vehicle-in-the-Loop (ViL)	19
3 Zielsetzung	21
3.1 Fazit zum Stand der Technik	21
3.2 Das Ziel: Hybride Testbeds (HTBs)	22
4 Grundlagen	25
4.1 Sensortechnologien zur Umfeldperzeption	25
4.1.1 Kamera	26
4.1.2 Lidar	28
4.1.3 Radar	30

v

4.1.4	Ultraschall	32
4.1.5	Gemeinsamkeiten der Sensortechnologien	34
4.2	Raytracing zur globalen Beleuchtungssimulation	39
4.2.1	Varianten des Raytracings	39
4.2.2	Schnittpunktbestimmung	40
4.2.3	Materialauswertung	42
4.2.4	Beleuchtungsberechnung	44
4.2.5	Verfahren zur Rauschreduktion	47
4.3	GPU-basiertes Echtzeit-Raytracing	49
4.3.1	Hardwarebeschleunigung auf Grafikprozessoren (GPUs)	49
4.3.2	CUDA-Programmierung zur Parallelisierung	50
4.3.3	OptiX's Raytracing-Pipeline	53
4.3.4	Material Definition Language (MDL)	55
5	Architektur zur Modellierung und Simulation von Umfeldsensoren	57
5.1	Anforderungen an die Architektur	57
5.2	Überblick über die Architektur	59
5.3	Grundgedanke: Dreiachsige Skalierbarkeit	60
5.3.1	Simulationstiefe	61
5.3.2	Sensortypen und Anwendungen	62
5.3.3	Prozessoren	63
5.4	Basiselemente zur multimodalen Sensor-Umfeld-Interaktion	64
5.4.1	Sensor	66
5.4.2	Informationsträger	69
5.4.3	Material	71
5.4.4	Geometrie	75
5.4.5	Umwelteinflüsse	80
5.5	Generalisierung und Parallelisierung der Sensorkomponenten	82
5.5.1	Linse	84
5.5.2	Detektor	89
5.5.3	Signalprozessor	96
5.5.4	Informationsprozessor	99
5.5.5	Kommunikationsschnittstelle	100
6	Integration in den Entwicklungsprozess	103
6.1	Verfahren zur entwicklungsbegleitenden Validierung der Simulation . . .	103
6.1.1	Schleife 1/2: Laborbasierte Validierung	105
6.1.2	Schleife 2/2: Szenariobasierte Validierung	110
6.2	Architektur-Schnittstellen für den entwicklungsbegleitenden Einsatz . . .	114
6.2.1	Architektur-Erweiterung zur Ground-Truth-Annotierung	116
6.2.2	Unterstützte Ebenen der Sensordateninjektion	117

7	Echtzeitfähige Implementierung der Architektur	123
7.1	Framework zur generalisierten Simulation von Umfeldsensoren	124
7.1.1	Sensor-Umfeld-Interaktion	126
7.1.2	Generalisierte Sensorkomponenten	132
7.1.3	Ground-Truth-Annotierung	134
7.2	Generalisierte Kamera-Simulation	136
7.2.1	Kamera-Umfeld-Interaktion	137
7.2.2	Generalisierte Kamerakomponenten	139
7.3	Generalisierte Lidar-Simulation	141
7.3.1	Lidar-Umfeld-Interaktion	142
7.3.2	Generalisierte Lidar-Komponenten	145
8	Anwendung und Evaluation der Architektur	149
8.1	Raumfahrt: Lidar Rendezvous- und Dockingsensor (RVS)	149
8.1.1	Zielobjektverfolgung	151
8.1.2	Modellbasierte Lageschätzung	152
8.1.3	Leit-, Navigations- und Kontrollsystem	154
8.1.4	Mission: Mars Sample Return (MSR)	156
8.2	Automobil: Camera Monitoring System (CMS)	158
8.2.1	Online-Kalibrierung	159
8.2.2	Blendlicht- und Verschmutzungsdetektion	161
8.2.3	Objektdetektion, -klassifikation und -verfolgung	162
8.3	Vergleich der Skalierbarkeit über Prozessoren	164
8.3.1	Multi-Core-Parallelisierung	166
8.3.2	Multi-GPU-Parallelisierung	171
8.4	Weitere mögliche Anwendungen	176
8.4.1	Automobil: Lidar-Sensoren für das automatisierte Fahren	176
8.4.2	Raumfahrt: Kerasensoren für robotische Anwendungen	177
8.4.3	Industrie: Inline-Prüfsysteme und Fahrerlose Transportsysteme	179
9	Zusammenfassung und Ausblick	181
9.1	Zusammenfassung	181
9.2	Ausblick	184
	Danksagung	196