

Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von

Dipl.-Inform. Sven Kreft
aus *Bielefeld*

Tag des Kolloquiums: 5. September 2012
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [BGG+08] BERSSENBRÜGGE, J.; GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; KREFT, S.: Ein Virtual Reality-basierter Nachtfahrtsimulator als Werkzeug für das Virtual Prototyping adaptiver Leuchtwieitenregler. In: Gausemeier, Jürgen; Grafe, Michael (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop "Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung". 5. - 6. Juni 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 232, Paderborn, 2008, S. 307-321
- [BKG08] BERSSENBRÜGGE, J.; KREFT, S.; GAUSEMEIER, J.: Using a Virtual Reality-based Night Drive Simulator as a Tool for the Virtual Prototyping of an Advanced Leveling Light System. In: Proceedings of the ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, August 3 - 8 2008, New York City, USA
- [BKG10] BERSSENBRÜGGE, J.; KREFT, S.; GAUSEMEIER, J.: Virtual Prototyping of an Advanced Leveling Light System Using a Virtual Reality-Based Night Drive Simulator. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 10(2), 2010
- [KGB+10] KREFT, S.; GAUSEMEIER, J.; BERSSENBRÜGGE, J.; LORENZ, W.; TRÄCHTLER, A.: Integration eines voll-aktiven X-by-wire Versuchsfahrzeugs in eine VR-basierte Simulationsumgebung. In: Gausemeier, Jürgen; Grafe, Michael (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop "Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung", 10. - 11. Juni 2010, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 274, Paderborn, 2009, S. 159-171
- [KGG+11a] KREFT, S.; GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; HASSAN, B.: Automatisierte Trassierung virtueller Straßen auf Basis von Geo-Informationssystemen. In: Gausemeier, Jürgen; Grafe, Michael (Hrsg.): 10. Paderborner Workshop "Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung", 19. - 20. Mai 2011, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 295, Paderborn, 2011, S. 253-266
- [KGG+11b] KREFT, S.; GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; HASSAN, B.: Automated Generation of Virtual Roadways based on Geographic Information Systems. In: Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, August 29 - 31 2011, Washington DC, USA
- [KLB+10] KREFT, S.; LORENZ, W.; BERSSENBRÜGGE, J.; GAUSEMEIER, J.; TRÄCHTLER, A.: A VR-based Prototyping and Demonstration Platform Integrating a Fully Active X-By-Wire Electrical Test Vehicle. In: Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, August 15 - 18 2010, Montreal, Canada
- [WK11] WABMANN, H.; KREFT, S.: Virtual Prototyping – Ingenieure entwickeln mit Virtueller Realität. In: Marco Hemmerling (Hrsg.): Augmented Reality – Mensch, Raum und Virtualität, Wilhelm Fink Verlag, München, 2011 – ISBN 978-3-7705-5254-2

Zusammenfassung

Interaktive Fahrsimulationen ermöglichen die frühzeitige, ganzheitliche Erprobung in Entwicklung befindlicher Fahrerassistenzsysteme. Das komplexe Zusammenspiel von Fahrer, Assistenzsystem und Umgebung kann dabei in einem sicheren Umfeld unter reproduzierbaren Bedingungen analysiert werden. Interaktive Fahrsimulationen sind jedoch für sich komplexe Systeme, die auf dem Zusammenspiel verschiedener Simulationsmodelle basieren. Geospezifische Umgebungsmodelle, die reale Umgebungen abbilden, sind dabei ein wichtiger Bestandteil. Deren effiziente Bildung ist jedoch eine Herausforderung. Es fehlt insbesondere eine systematische Integration von Geodaten.

Zur effizienten Nutzung interaktiver Fahrsimulation müssen Umgebungsmodelle systematisch gebildet werden. Wichtige Anforderungen ergeben sich dabei angesichts der Integration gegenwärtig verfügbarer Geodaten sowie der technischen Rahmenbedingungen interaktiver Fahrsimulationen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden wurde eine *Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen* erarbeitet. Der Kern der Systematik ist ein Vorgehensmodell, das die einzelnen Tätigkeiten und Hilfsmittel zur effizienten Modellbildung strukturiert. Dabei werden bestehende Hilfsmittel integriert und – sofern notwendig – neue entwickelt. Das Vorgehensmodell wird durch ein prototypisch implementiertes Software-Werkzeug ergänzt, das die Bildung vollständiger Umgebungsmodelle erst ermöglicht.

Die Systematik wird anhand von zwei realen Umgebungen validiert, für die exemplarisch Umgebungsmodelle gebildet wurden. Die abschließende Bewertung zeigt, dass die Systematik die formulierten Anforderungen in vollem Umfang erfüllt.

Abstract

Interactive driving simulations enable early and comprehensive tests of driver assistance systems under development. The close interplay between driver, assistance system, and environment can be investigated in a safe setting under reproducible conditions. Interactive driving simulations, though, are complex systems on their own. They are based on various simulation models that need to interact at runtime. In this context, geo-specific environment models, which represent real world environments, are one important component. However, efficiently building such models is a challenge. For instance, there is a lack of a systematic integration of geo-data.

In order to efficiently utilize interactive driving simulations, environment models need to be built systematically. Essential requirements in this field arise from the integration of currently available geo-data as well as from the technical conditions of interactive driving simulations. To address these issues, a *systematics for the efficient building of geo-specific environment models for driving simulations* has been developed. Central to the systematics is a process model that structures necessary activities and tools in order to efficiently build environment models. Thereby, existing methods and tools were integrated and – whenever necessary – new ones have been developed. The process model is complemented by a prototypically implemented software tool, which finally enables building complete environment models.

The systematics is validated by two real environments, for which environment models have been built exemplarily. The final evaluation of the systematics shows that the initially formulated requirements are entirely met.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Produktentstehung am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Sie ist das Ergebnis meiner wissenschaftlichen Tätigkeit im Rahmen von Forschungs- und Industrieprojekten im Bereich Virtual Prototyping und Simulation.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, der mich stets gefordert, gefördert und damit meine berufliche und persönliche Entwicklung maßgeblich geprägt hat. Seine strukturierte und geradlinige Vorgehensweise sowie seine konstruktive Kritik haben sehr zum Erfolg meiner Arbeit beigetragen. Darüber hinaus waren die Selbstständigkeit, mit der ich meine Arbeiten ausgestalten durfte, und die mir übertragene Verantwortung außergewöhnlich.

Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler vom Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn danke ich für die Übernahme des Korreferats und die langjährige ausgezeichnete Zusammenarbeit in vielen gemeinsamen Projekten.

Es war Herr Professor Dr. Ralf Möller vom Lehrstuhl Technische Informatik der Universität Bielefeld, der mich schon zu Studienzeiten entscheidend gefördert und damit für den Weg der Promotion begeistert hat – dafür danke ich ihm.

Allen Kollegen und Kolleginnen des Lehrstuhls danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit. Besonders hervorzuheben sind an dieser Stelle Michael Grafe, Sven-Kelana Christiansen, Jan Berssenbrügge, Helene Waßmann und Tobias Bensiek; neben den fachlichen Impulsen haben sie mich in jeder Leidenslage unterstützt und mit ihrem aufgeweckten Humor dafür gesorgt, dass der Spaß an der Sache nie auf der Strecke blieb.

Ich danke Christian Horstkötter, Vitalij Janzen und Victor Neumann sowie allen weiteren Studenten und Studentinnen, die durch Ihre Studien- und Diplomarbeiten oder als studentische Hilfskraft zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben.

Mein besonders herzlicher Dank gilt meinen Eltern Anke und Peter Kreft, die mich seit jeher nach Kräften unterstützen und mir fortwährend den nötigen Rückhalt und die Zuversicht geben, meine Ziele zu erreichen. Dies gilt seit vielen Jahren auch für meine Schwiegermutter Ursula Sauer – ich danke ihr dafür.

Abschließend gebührt mein größter Dank meiner Frau Stefanie sowie unseren Kindern Finn-Luca und Lenia Jasmin; sie schenken mir jeden Tag Liebe und Geborgenheit und vermitteln mir stets das Gefühl, den richtigen Weg zu beschreiten. Vielen Dank!

für Steffi, Finn-Luca und Lenia Jasmin

Inhaltsverzeichnis Seite

1 Einleitung	5
1.1 Problematik.....	6
1.2 Zielsetzung	7
1.3 Vorgehensweise	7
2 Problemanalyse	9
2.1 Begriffsdefinitionen und Einordnung der Arbeit	9
2.2 Entwicklung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme.....	10
2.2.1 Mechatronische Systeme	11
2.2.2 Fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme	13
2.2.3 Entwicklungsvorgehen bei Fahrerassistenzsystemen	16
2.2.3.1 Virtual Prototyping	18
2.2.3.2 Validierungsmethoden und -technologien für Fahrerassistenzsysteme.....	20
2.3 Interaktive Fahrsimulation	22
2.3.1 Systemkomponenten interaktiver Fahrsimulationen	23
2.3.2 Umgebungsmodelle für interaktive Fahrsimulationen.....	27
2.3.2.1 Logikmodell	29
2.3.2.2 Graphikmodell	32
2.3.2.3 Abhängigkeiten des Logik- und Graphikmodells zur Laufzeit.....	34
2.3.3 Umgebungsmodelle für die Entwicklung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme.....	34
2.4 Geo-Informationssysteme	36
2.4.1 GIS-Komponenten und -Architekturen.....	37
2.4.2 Geodaten.....	40
2.4.2.1 Raumbezug und Koordinatenreferenzsysteme.....	41
2.4.2.2 Datentypen und -modelle	43
2.4.2.3 Ebenenprinzip und Harmonisierung	45
2.4.2.4 Geobasis- und Geofachdaten.....	45
2.4.2.5 Quantität, Qualität und Verfügbarkeit	47
2.4.3 Identifikation von Geodaten zur Bildung von Umgebungs- modellen.....	48
2.5 Problemabgrenzung	51

2.6 Anforderungen an eine Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle	53
2.6.1 Anforderungen an das Vorgehensmodell	53
2.6.2 Spezifische Anforderungen an das zu bildende Umgebungsmodell	54
2.6.3 Funktionale Anforderungen an ein Software-Werkzeug	55
 3 Stand der Technik	57
3.1 Methoden zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen	57
3.1.1 Prozeduraler Ansatz zur Definition von Verkehrsszenarien nach ALLEN et al.	57
3.1.2 Bildung von Umgebungsmodellen mit vorgefertigten Kacheln...	59
3.1.3 Automatisierte Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen nach CARLES.....	61
3.1.4 Dynamische Szenerien in der Fahrsimulation nach KAUßNER....	64
3.2 Ansätze zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle auf Basis von Geodaten	66
3.2.1 Transformierung von Geodaten in großflächige Umgebungsmodelle für Verkehrssimulationen nach WILKIE et al.....	67
3.2.2 Framework zur bildbasierten Generierung von Straßennetzwerken nach GUO	70
3.2.3 Einsatz eines Geo-Informationssystems zur Bildung von Umgebungsmodellen nach HAUNERT et al	75
3.2.4 Bildung von Umgebungsmodellen nach DRESIA, BILDSTEIN und RANDT	78
3.2.5 SimWorld – Automatische Landschaftsgenerierung für Fahrsimulationen	79
3.2.6 Geodaten basierte Modellierung realer Straßen nach DESpine und BAILLARD	81
3.3 Software-Werkzeuge zur Bildung von Umgebungsmodellen.....	83
3.3.1 Anwendungsschwerpunkt: Interaktive visuelle Simulationen....	84
3.3.2 Anwendungsschwerpunkt: Interaktive Fahrsimulation.....	86
3.3.3 Anwendungsschwerpunkt: Simulation von Fahrzeugsystemen	88
3.4 Handlungsbedarf	90
 4 Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen.....	95
4.1 Vorgehensmodell.....	96
4.2 Festlegung der Achsverläufe einzelner Strecken	99
4.2.1 Identifikation einzelner Strecken und Knotenpunkte	99

4.2.2	Definition des Lageplans	101
4.2.3	Ermittlung des Höhenplans.....	104
4.2.4	Registrierung zwischen Referenzlinien und Navigationsdaten	105
4.3	Definition einzelner Fahrbahnen.....	106
4.3.1	Generierung von Fahrstreifen.....	107
4.3.2	Festlegung des Querschnittprofils	108
4.3.3	Spezifikation der Oberflächeneigenschaften	109
4.4	Integration logischer Eigenschaften.....	110
4.4.1	Definition von Abbiegerelationen und Abbiegepfaden	110
4.4.2	Zuweisung verkehrsrelevanter Attribute	112
4.4.3	Integration sonstiger Objekte.....	113
4.5	Bildung von 3D-Modellen des Verkehrsnetzes	114
4.5.1	Generierung von 3D-Modellen einzelner Strecken	115
4.5.2	Bildung von 3D-Modellen einzelner Knotenpunkte	117
4.6	Generierung von 3D-Modellen der Umgebung	118
4.6.1	Generierung von 3D-Modellen des Geländes.....	119
4.6.2	Zusammenführung von Gelände und Verkehrsnetz	122
4.6.3	Integration von Verkehrsmobiliar	123
4.6.4	Integration von Gebäuden und Baumformationen	124
4.7	Fertigstellung des Graphikmodells	126
4.7.1	Detaillierung einzelner 3D-Modelle	127
4.7.2	Reduzierung der Komplexität einzelner 3D-Facettenmodelle..	128
4.8	Anwendungsspezifische Adaptierung des Vorgehensmodells	129
4.9	Software-Werkzeug	131
4.9.1	Aufgaben und Konzept des Software-Werkzeugs	132
4.9.2	Architektur des Gesamtsystems	133
4.9.3	Prototypische Implementierung	136
5	Validierung der Systematik	141
5.1	Validierungsumgebungen: Simmerath und Rüthen	141
5.2	Validierungsbeispiel Simmerath	142
5.2.1	Phase 1: Festlegung der Achsverläufe einzelner Strecken	143
5.2.2	Phase 2: Definition einzelner Fahrbahnen.....	147
5.2.3	Phase 3: Integration logischer Eigenschaften.....	149
5.2.4	Phase 4: Bildung von 3D-Modellen des Verkehrsnetzes	151
5.2.5	Phase 5: Generierung von 3D-Modellen der Umgebung	152
5.2.6	Phase 6: Fertigstellung des Graphikmodells	155
5.3	Kritische Bewertung: Erfahrungen aus Modellierungsprojekten	158
5.4	Bewertung der Systematik hinsichtlich der Anforderungen	159
6	Resümee und Ausblick	163

7 Abkürzungsverzeichnis	167
8 Formelzeichenverzeichnis.....	169
9 Literaturverzeichnis.....	171

Anhang

Inhaltsverzeichnis	Seite
A1 Ergänzungen zur Problemanalyse (Kapitel 2)	A-3
A1.1 Eingesetzte geodätische Koordinatenreferenzsysteme.....	A-3
A1.2 Eingesetzte Transformationsverfahren.....	A-3
A2 Ergänzungen zum Stand der Technik (Kapitel 3)	A-5
A3 Ergänzungen zur Systematik (Kapitel 4)	A-7
A3.1 Eingesetzte Geodaten	A-7
A3.2 Eingesetzte Regelquerschnitte	A-7
A3.3 Betrachtete verkehrsrelevante Attribute	A-8
A3.4 Ergänzungen zur prototypischen Implementierung des Software-Werkzeugs.....	A-9
A4 Ergänzungen zur Validierung (Kapitel 5)	A-11

1 Einleitung

Kürzer werdende Produktlebenszyklen, steigende Variantenvielfalt und wachsende Komplexität der Erzeugnisse sind heute wesentliche Herausforderungen in der Fahrzeugindustrie. Ein Beispiel für technisch hochkomplexe Fahrzeugkomponenten sind moderne Fahrerassistenzsysteme, welche die Sicherheit, den Komfort und die Energieeffizienz prägen. Die Leistungsfähigkeit derartiger Systeme wird vorrangig durch maschinelle Wahrnehmung gesteigert. Durch die Fusion verschiedener Sensormodalitäten und die Vernetzung einzelner Fahrzeugkomponenten sind Fahrerassistenzsysteme zunehmend in der Lage, die Umgebung des Fahrzeugs wahrzunehmen. Die maschinelle Wahrnehmung erhöht die Komplexität der Software im Fahrzeug jedoch signifikant. Die effiziente Entwicklung und Erprobung derartig komplexer Fahrzeugsysteme ist daher eine Herausforderung [Mau09, S. 43ff.], [Kno10, S. 104ff.].

Bei der Entwicklung von komplexen technischen Produkten, wie Fahrerassistenzsystemen, ist der Einsatz Virtueller Prototypen weitgehend etabliert [Mey07, S. 11ff.]. Virtuelle Prototypen sind rechnerinterne Repräsentationen realer Prototypen. Virtual Prototyping bedeutet, rechnerinterne Repräsentationen von in Entwicklung befindlichen Produkten zu bilden und zu analysieren. Der zeit- und kostenintensive Bau realer Prototypen kann damit weitgehend vermieden werden. Virtual Prototyping ermöglicht schon in frühen Phasen der Entwicklung Eigenschaften und Funktionen des Produkts abzusichern [GEK01, S. 384f.].

Interaktive Fahrsimulationen sind Werkzeuge des Virtual Prototyping: Sie ermöglichen das Zusammenspiel zwischen Fahrer und virtuellem Prototyp des Fahrzeugs, bzw. der Fahrzeugkomponenten zu untersuchen. Der Fahrer steuert dazu ein virtuelles Fahrzeug durch eine virtuelle Umgebung; es handelt sich insgesamt um eine virtuelle Versuchsfahrt [CDF+07].

Fahrsimulationen basieren auf dem Zusammenwirken verschiedener Simulationsmodelle zur Laufzeit. Diese repräsentieren dedizierte Aspekte des Fahrzeugs, einzelner Fahrzeugkomponenten und der virtuellen Umgebung. Ein wesentlicher Bestandteil der Fahrsimulation ist das Umgebungsmodell, das die statische Umgebung des Fahrzeugs beschreibt. Umgebungsmodelle bestehen dabei im Wesentlichen aus zwei Teilmodellen [Car01, S. 69f.], [Kau03, S. 8f.], [DG06, S. 27], [DB11, S. 434ff.]: Das Logikmodell beschreibt beispielsweise Straßenverläufe, Oberflächeneigenschaften und Verkehrsregeln in Form von mathematischen Funktionen oder Graphen; das Graphikmodell beschreibt die Umgebung in Form von 3D-Modellen, die etwa Gebäude, Vegetation oder Beschilderung abbilden.

Umgebungsmodelle lassen sich grundsätzlich in zwei Klassen unterteilen: geotypisch und geospezifisch¹ [Guo05, S. 1], [Ran03, S. 142], [KNW09, S. 87f.], [DB11, S. 432ff.]. Geotypische Umgebungsmodelle beschreiben lediglich synthetische Umgebungen, die typische Straßenverläufe, Gebäude- oder Vegetationsstrukturen für Landschaften oder Stadtgebiete beinhalten. Geospezifische Umgebungsmodelle bilden hingegen reale Umgebungen nach. Diese Klasse von Modellen gewinnt insbesondere bei der Entwicklung und Erprobung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme zunehmend an Bedeutung: Erst durch die realitätsgestreue Nachbildung einer realen Versuchsstrecke lassen sich Simulationsergebnisse und die Ergebnisse realer Erprobungsfahrten validieren [TVG+08, S. 95], [DWM+08, S. 109f.], [ASK+03, S. 250ff.].

1.1 Problematik

Die Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen ist ein aufwändiger Prozess; die Beschaffung und Integration der notwendigen, georeferenzierten² Daten erfolgt heute großenteils manuell durch den Entwickler³. Primäre Datenquellen sind dabei beispielsweise digitale Geländefemodelle, Landschaftsmodelle oder digitale Karten aus kommerziellen Systemen oder behördlichen Institutionen. Diese werden mit unterschiedlichen Software-Werkzeugen in die einzelnen Teilmodelle des Umgebungsmodells überführt; die dabei grundsätzlich eingesetzten Daten sowie das Vorgehen bei der Modellbildung wird heute individuell durch den jeweiligen Entwickler bestimmt [Ran03, S. 137ff.], [SFK+07, S. 1].

Der systematische Einsatz von Geo-Informationssystemen und deren zugrundeliegenden georeferenzierten Daten birgt hier ein erhebliches Nutzenpotential. Geo-Informationssysteme (GIS) werden zur Erfassung, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation georeferenzierter Daten (Geodaten⁴) verwendet [Goo93, S. 8], [Bar05, S. 15], [LGM+11, S. 13], [Bil10, S. 8]. Derartige Systeme werden heute beispielsweise bei Städteplanungen, Umweltforschungen oder Marketingaktivitäten eingesetzt. Sie bauen dabei auf eine breite Basis von Geodaten, auf die immer einfacher zugegriffen werden kann. Ferner steigen sowohl Quantität als auch Qualität der Geodaten kontinuierlich. So enthalten sie in zunehmendem Maße 3D-Modelle. Diese bestehen aus Facet-

¹ Das Präfix Geo steht im Rahmen dieser Arbeit im Kontext der Geographie; es ist daher ein unmittelbarer Bezug zur Erde.

² „georeferenziert“ beschreibt einen räumlichen Bezug für Orte oder Positionen auf der Erde. Die Begriffe raumbezogen und georeferenziert werden im Folgenden synonym verwendet.

³ Es sind stets Personen männlichen und weiblichen Geschlechts gleichermaßen gemeint; aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit wird im Folgenden nur die männliche Form verwendet.

⁴ Die Begriffe Geodaten und GIS-Daten werden im Folgenden synonym verwendet.

ten (Polygone), Materialien und Texturen zur Beschreibung der Gestalt und der visuellen Darstellung von Objekten. Geo-Informationssysteme verwenden derartige 3D-Modelle beispielsweise zur realitätsnahen Darstellung von Gebäuden oder Landschaften.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass verfügbare und zukünftige Geodaten eine Voraussetzung zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle sind. Beste-hende Ansätze und Software-Werkzeuge setzen Geodaten heute zwar überwiegend ein, insgesamt fehlt jedoch eine Systematik, welche die einzelnen Tätigkeiten zur Bildung vollständiger geospezifischer Umgebungsmodelle strukturiert, dabei effizient gegenwärtig verfügbare Geodaten einsetzt und entsprechende Hilfsmittel zu deren Verarbeitung empfiehlt bzw. bereitstellt.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist eine *Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen*. Die Systematik richtet sich sowohl an Entwickler von Fahrsimulationssystemen, als auch an Entwickler fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme, die im Rahmen ihrer Tätigkeit Umgebungsmodelle für virtuelle Versuchsfahrten bereitstellen müssen. Sie sollen in die Lage versetzt werden, gegenwärtig verfügbare Geodaten gezielt zur Bildung von Umgebungsmodellen, die reale Umgebungen nachbilden, einzusetzen.

Die Systematik soll – ausgehend von der Identifikation geeigneter Geodaten – eine effiziente Bildung von Umgebungsmodellen ermöglichen. Die entstehenden Umgebungsmodelle sollen dabei für das Virtual Prototyping fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme geeignet sein und die technischen Randbedingungen der interaktiven Fahrsimulation berücksichtigen. Den Kern bildet ein Vorgehensmodell, das die notwendigen Tätigkeiten zur Bildung derartiger Umgebungsmodelle strukturiert und die zur Verfügung stehenden Informationen aus Geodaten zielgerichtet integriert. Die Systematik soll dabei bestehende Hilfsmittel einsetzen und diese ggf. erweitern. Darüber hinaus sollen sowohl das Vorgehensmodell, als auch entsprechende Hilfsmittel prototypisch in einem Software-Werkzeug umgesetzt werden, damit als Resultat vollständige geospezifische Umgebungsmodelle für interaktive Fahrsimulationen entstehen können.

Die durchgängige Anwendbarkeit und Praktikabilität der Systematik soll anhand der Bildung von ausgewählten geospezifischen Umgebungsmodellen nachgewiesen werden.

1.3 Vorgehensweise

In **Kapitel 2** wird das Handlungsfeld der vorliegenden Arbeit dargestellt und die Problematik präzisiert. Dazu werden zunächst die wesentlichen Begriffe definiert und die Arbeit in den Kontext der Forschungstätigkeiten eingeordnet. Ausgangspunkt der Problemalyse ist eine Charakterisierung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme; dabei

werden insbesondere die Notwendigkeit und der aktuelle Einsatz der virtuellen Produktentwicklung derartiger Systeme dargestellt. In diesem Zusammenhang werden (interaktive) Fahrsimulationen und deren technische Komponenten eingeführt. Der Schwerpunkt liegt auf einer detaillierten Beschreibung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen. Anschließend werden Grundlagen von GIS und Geodaten beschrieben. Darauf aufbauend wird ein Bezug zwischen gegenwärtig verfügbaren Geodaten und den einzelnen Beschreibungsformen von Umgebungsmodellen hergestellt. Das Kapitel endet mit der Problemabgrenzung und der Ableitung von Anforderungen an die zu erarbeitende Systematik.

Kapitel 3 gibt einen Überblick über den Stand der Technik. Dabei werden zunächst allgemeine Methoden zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen betrachtet. Dies sind vorrangig Grundlagenarbeiten, die einzelne Bestandteile der Systematik maßgeblich beeinflussen. Anschließend werden Ansätze zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen untersucht. Diese stehen in unmittelbarem Zusammenhang der vorliegenden Arbeit. Eine knappe Charakterisierung von Software-Werkzeugen, die heute zur Bildung von Umgebungsmodellen eingesetzt werden, komplettiert den betrachteten Stand der Technik. Schließlich werden die einzelnen Ansätze hinsichtlich der in Kapitel 2 festgelegten Anforderungen bewertet und ein Handlungsbedarf identifiziert.

Kapitel 4 bildet den Kern der vorliegenden Arbeit; es beschreibt die *Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen*. Dazu werden zunächst die Bestandteile der Systematik vorgestellt. Das Vorgehensmodell, dessen einzelne Phasen sowie eingesetzte Hilfsmittel werden anschließend detailliert methodisch konzeptionell dargestellt.

Die Validierung der Systematik erfolgt in **Kapitel 5**. Dabei wird die Systematik durchgängig angewandt und damit vollständige Umgebungsmodelle gebildet. Die Eigenchaften der nachzubildenden Umgebungen sind dabei so gewählt, dass der Nutzen der Systematik dargestellt und die Anforderungen aus Kapitel 2 validiert werden können.

Kapitel 6 besteht aus der Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten. Der **Anhang** stellt ergänzenden Informationen und technische Details bereit.

2 Problemanalyse

Ziel der Problemanalyse sind Anforderungen an eine *Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen*. Dafür wird in den folgenden Abschnitten⁵ das Problemfeld skizziert: In Abschnitt 2.1 werden zunächst die zum Verständnis der Arbeit wesentlichen Begriffe definiert und die Arbeit in den Kontext dieser Begriffe eingeordnet. Kapitel 2.2 beschreibt das für die Arbeit wesentliche Anwendungsgebiet der Entwicklung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme. In diesem Zusammenhang werden in Abschnitt 2.3 die Grundlagen der interaktiven Fahrsimulation dargestellt – insbesondere die Eigenschaften von geospezifischen Umgebungsmodellen. Kapitel 2.4 stellt Geo-Informationssysteme sowie Geodaten vor und beschreibt den Bezug zu Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen. In Kapitel 2.5 erfolgt die Problemabgrenzung aus der in Abschnitt 2.6 die Anforderungen an die Systematik resultieren.

2.1 Begriffsdefinitionen und Einordnung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Systematik, die Entwickler bei der Modellbildung für interaktive Fahrsimulationen unterstützen soll. Eine **Systematik** ist im Allgemeinen eine *einheitliche Darstellung und Gliederung nach sachlichen und logischen Gesichtspunkten* [Bro03, S. 1942]. In Anlehnung an DUMITRESCU steht der Begriff Systematik im weiteren Verlauf dieser Arbeit für ein Rahmenwerk, das ein **Vorgehensmodell**, **Hilfsmittel** und ein **Software-Werkzeug** zur Erarbeitung von Umgebungsmodellen beinhaltet. Hilfsmittel sind dabei beispielsweise Methoden, Verfahren, Algorithmen oder Funktionen in einem Software-Werkzeug, die den Benutzer unterstützen [Dum11, S. 5f.].

Die entwickelte Systematik steht im Kontext der Entwicklung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme⁶. Der Begriff (Produkt-)**Entwicklung** umfasst sämtliche Aufgaben und Tätigkeiten die ein technisches Problem lösen; das Resultat ist ein technisches System. Als wichtiger Bestandteil von Produktentwicklungen ist das **Virtual Prototyping** längst etabliert [GEK01, S. 385]. Dabei werden die Eigenschaften des in Entwicklung befindlichen Produkts frühzeitig anhand eines rechnerinternen **Modells** abgesichert [GEK01, S. 384f.]. Dieses Modell wird als **Virtueller Prototyp** bezeichnet. Virtual Prototyping ist die Arbeit mit dem virtuellen Prototyp. Sie umfasst die **Modellbildung**

⁵ Der Aufbau der Arbeit unterscheidet in Anlehnung an die DIN-Norm 1421 nicht zwischen Kapiteln und Abschnitten. Die Begriffe Unterkapitel und Unterabschnitt werden nicht verwendet [DIN1421].

⁶ Die Begriffsdefinition für fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme sowie die Eingrenzung der für die vorliegende Arbeit relevanten Systeme erfolgt in Abschnitt 2.2.2.

des virtuellen Prototyps und dessen Einsatzumgebung, die anschließende numerische **Simulation** sowie die eigentliche **Analyse** der Produkteigenschaften [GEK01, S. 419ff.], [WK11, S. 139].

Fahrsimulationen sind Werkzeuge des Virtual Prototyping. Sie sind längst zur frühzeitigen technischen Funktionsabsicherung und zur Evaluierung des Zusammenspiels zwischen Fahrer und Assistenzsystem etabliert [CDF+07, S. 2], [Zee10, S. 157f.]. Der Begriff **interaktive Fahrsimulation** steht im Kontext dieser Arbeit für eine virtuelle Versuchsfahrt in einer **virtuellen Umgebung**, die Rückschlüsse auf Eigenschaften des virtuellen Prototyps eines Fahrzeugs oder Fahrzeugsystems ermöglicht.

Vor dem Hintergrund der Produktentwicklung fortgeschrittenen Fahrerassistenzsysteme adressiert diese Arbeit demnach ein systematisches Vorgehen, geeignete Hilfsmittel und ein Software-Werkzeug zur effizienten Modellbildung geospezifischer virtueller Umgebungen für (interaktive) Fahrsimulationen. Bestehende Hilfsmittel sind dabei in das Vorgehen zu integrieren; sollten diese nicht geeignet sein, sind sie adäquat zu erweitern bzw. neue zu entwickeln.

Die vorliegende Arbeit ordnet sich in den Forschungsschwerpunkt **Virtual Prototyping und Simulation (ViProSim)** des Heinz Nixdorf Instituts ein. Übergeordnetes Ziel ist, Entwicklern das Verständnis komplexer technischer Abläufe mittels interaktiver visueller Analyse zu erleichtern. Das Gebiet der interaktiven Fahrsimulation ist dabei ein zentraler Bestandteil; die Produktivität bei der Entwicklung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme soll hier durch den Einsatz eines flexiblen Fahrsimulationssystems gesteigert werden. Ein wesentlicher Aspekt der Flexibilität sind verschiedene Simulationsszenarien. Die effiziente Bildung der dafür notwendigen Umgebungsmodelle ist Gegenstand dieser Arbeit.

2.2 Entwicklung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme

Elektronik und Elektrik bleiben bis mindestens 2015 die Innovationstreiber im Automobil. Der Anteil am Kaufwert eines Personenkraftwagens liegt heute bei über 30%. Es ist absehbar, dass dieser Anteil weiter steigen wird [Wym07, S. 12], [KEG+08, S. 45], [Ise06, S. 1]. Die rasante Entwicklung der Informationstechnik ist zudem maßgeblich dafür verantwortlich, dass faszinierende technische Perspektiven Realität werden: So hat im Oktober 2010 erstmals ein Prototyp eines vollständig autonomen Kraftfahrzeugs am realen Straßenverkehr teilgenommen [NHO+11, S. 1]. Dies ist richtungweisend für die Vision des vollständig autonomen Straßenverkehrs. Auf dem Weg dorthin werden jedoch noch zahlreiche Fahrzeugsysteme entwickelt, die zunächst Teilfunktionen des autonomen Fahrens realisieren und den Fahrer bei seiner Fahraufgabe unterstützen; die Anzahl an Fahrerassistenzsystemen wird daher weiter zunehmen [KEG+08, S. 9].

Moderne Fahrerassistenzsysteme sind durch eine zunehmende Integration von Mechanik, Elektronik und Informationstechnik gekennzeichnet. Der Begriff **Mechatronik**

bringt dies zum Ausdruck. Mechatronik ist heute die Basis für Funktionsverbesserungen oder gänzlich neue Funktionen im Fahrzeug [Ise06, S. 9]. Darüber hinaus werden einzelne Funktionen im Fahrzeug vermehrt durch die Vernetzung mechatronischer Systeme realisiert, bspw. integrierte Fahrdynamikregelungen [Trä05]. Zusammengenommen steigt dadurch die Komplexität bei der Entwicklung von Fahrzeugsystemen signifikant.

Es ist heute zwar absehbar, dass zukünftige Fahrerassistenzsysteme zunehmend autonom in das Fahrverhalten eingreifen und damit dem Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug entziehen. Der Mensch bleibt gegenwärtig jedoch allein verantwortlich für das Führen des Fahrzeugs [GGS09, S. 31]. Das **erfolgreiche Zusammenwirken von Fahrer und Assistenzsystem** bleibt damit ein wesentlicher Aspekt fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme.

Vor diesem Hintergrund wird in den folgenden Abschnitten die Entwicklung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme skizziert. Dabei werden zunächst Grundlagen mechatronischer Systeme dargestellt. Als konkrete Ausprägung der Mechatronik werden anschließend fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme beschrieben und schließlich das Vorgehen zu deren (virtueller) Entwicklung erläutert.

2.2.1 Mechatronische Systeme

Der Begriff Mechatronik ist ein Kunstwort aus Mechanik und Elektronik. KIKUCHI prägte diesen Begriff im Jahre 1969 [HTF69]. Grundsätzlich wurde darunter die elektronische Funktionserweiterung mechanischer Komponenten verstanden. Mit dem Aufkommen der Mikroprozessortechnik ist die Informationstechnik hinzugekommen. Die Definition des Begriffs Mechatronik wurde daher weiterentwickelt. Eine einheitliche, allgemein akzeptierte Definition ist heute kaum erkennbar. Im Kern eines modernen Verständnisses von Mechatronik geht es um die synergetische Kombination von Einzeltechnologien, deren zielgerichtetes Zusammenwirken Systeme ermöglicht, die Aufgaben optimal erfüllen.

In Anlehnung an die VDI Richtlinie 2206 [VDI2206] wird im Rahmen dieser Arbeit die Definition von HARASHIMA, TOMIZUKA und FUKUDA verwendet:

*„[Mechatronics is] ... the synergetic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes.“
[HTF96, S. 1]*

Der allgemeine Aufbau mechatronischer Systeme ist in Bild 2-1 dargestellt; sie bestehen aus einem Grundsystem, Sensoren, Aktoren und einer Informationsverarbeitung; sie interagieren ferner mit ihrer Betriebsumgebung und bieten in der Regel eine Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Interaktion mit dem Benutzer [VDI2206, S. 14ff.], [Ise06, S. 3ff.].

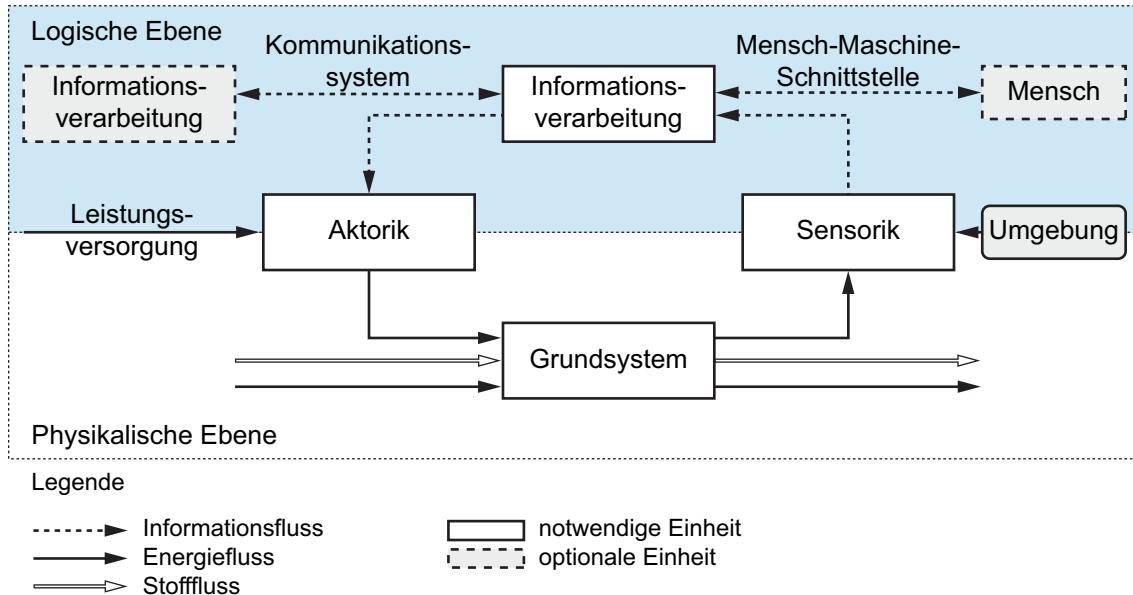


Bild 2-1: Grundstruktur mechatronischer Systeme nach [VDI2206, S. 14] und [Dum11, S. 8].

Das **Grundsystem** ist der Kern der *physikalischen Ebene*. Es besteht aus einer mechanischen, elektromechanischen, hydraulischen oder pneumatischen Struktur. Kombinationen dieser Grundstrukturen sind ebenfalls möglich. Die **Sensorik** bestimmt ausgewählte Zustandsgrößen⁷ des Grundsystems und erfasst ausgewählte Aspekte der Umgebung. Die erfassten Größen werden an die **Informationsverarbeitung** übermittelt, die den Kern der *logischen Ebene* bildet. Diese ermittelt notwendige Einwirkungen unter Berücksichtigung der Einflüsse weiterer Systeme und des menschlichen Benutzers und liefert Stellgrößen für die **Aktorik**. Die Umsetzung der Stellgrößen erfolgt schließlich durch Aktoren am Grundsystem; damit werden die Zustandsgrößen des Grundsystems und ggf. die Betriebsumgebung beeinflusst.

Die Verknüpfungen zwischen Grundsystem, Sensorik, Informationsverarbeitung und Aktorik werden mittels Flüssen dargestellt. PAHL/BEITZ unterscheiden für technische Systeme zwischen drei Arten von Flüssen [PBF+07, S. 41ff.]:

- **Energiefluss:** Mechanische, elektrische, thermische und andere Energie sowie Kraft, Strom und Wärme werden mittels Energiefluss dargestellt.
- **Stofffluss:** Die Verarbeitung, die Verpackung oder der physische Transport von Gas, Flüssigkeiten oder festen Körpern (Rohprodukten, Materialien usw.) wird mittels Stofffluss gekennzeichnet.

⁷ Unter Zustandsgrößen werden physikalische Größen eines technischen Systems verstanden, die die zukünftige Systemantwort bestimmen, wenn der momentane Systemzustand, die Eingangsgrößen und die das dynamische Verhalten beschreibenden Gleichungen gegeben sind [DB06a, S. 194]

- **Signalfluss:** Das Einsammeln, Aufbereiten und Versenden von Messgrößen, Daten, Informationen usw. wird mittels Signalflüssen (syn. Informationsflüsse) dargestellt.

Mechatronische Systeme umfassen eine große Bandbreite. Fahrerassistenzsysteme sind Beispiele heutiger mechatronischer Systeme, die bereits einen sehr hohen Entwicklungsstand erreicht haben und weit verbreitet sind. Sie bieten dennoch weiterhin ein großes Innovationspotential, vorrangig im Bereich der logischen Ebene (Informationsverarbeitung, Verknüpfung mehrerer Systeme, Mensch-Maschine-Schnittstelle), das es durch fortgeschrittene Systeme zu erschließen gilt [WW09, S. 666ff.], [Kno10, S. 112ff.].

2.2.2 Fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme

1979 wurde mit dem Antiblockiersystem das erste mechatronische (Fahrerassistenz-) System in einem Serienfahrzeug verbaut. Es folgten Systeme zur Antischlupfregelung (1986), das elektronische Stabilitätsprogramm (1995) sowie weitere Systeme der aktiven Fahrdynamik-Regelung [Ise06, S. 1ff.].

Gegenwärtige Fahrerassistenzsysteme informieren, sie warnen und sie stabilisieren, um verlorengegangene Kontrolle über das Fahrzeug zurückzugeben. Sie tragen maßgeblich zu Sicherheit, Komfort und Energieeffizienz bei. Das Ziel ist, die *Diskrepanz zwischen den Anforderungen der Verkehrssituation und dem Leistungsvermögen des Fahrers zu beseitigen* [GGS09, S. 24]. Die Systeme stehen dabei im Spannungsfeld zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umfeld und unterliegen zahlreichen Einflussfaktoren (Bild 2-2): So unterscheiden sich Fahrer in Alter, Erfahrung und ihrer Persönlichkeit, sie sind unterschiedlich motiviert, aufmerksam oder ermüdet. Verschiedene Fahrzeugtypen sind unterschiedlich ausgestattet. Das Umfeld des Fahrers bietet zudem eine große Vielfalt an Verkehrsumgebungen und -situationen [Kön09, S. 34f.], [Kno10, S. 104f.].

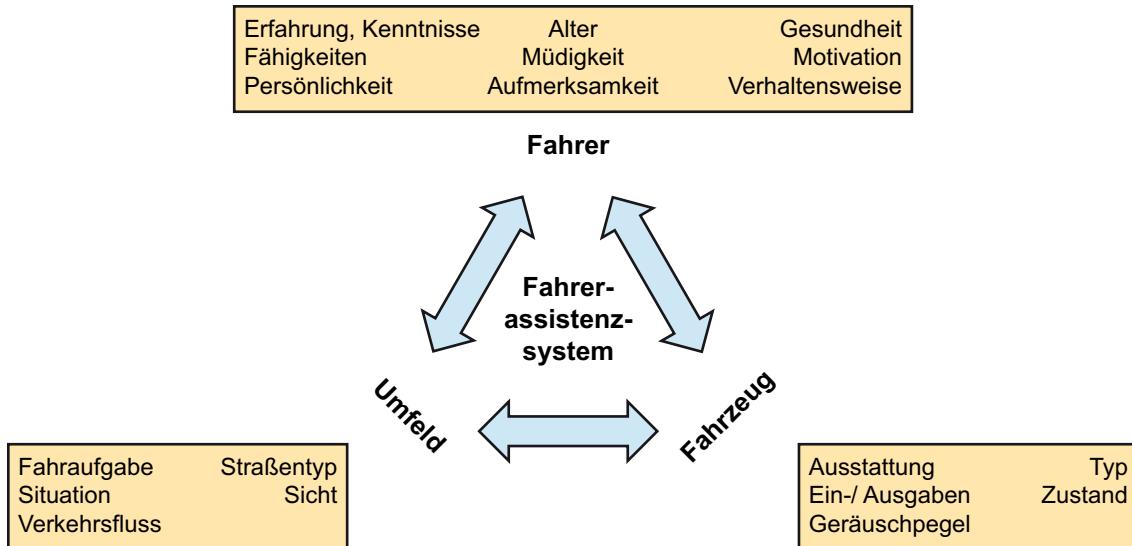


Bild 2-2: Spannungsfeld zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umfeld nach [Kön09, S. 34] und [Kno10, S. 104].

Fahrerassistenzsysteme sollen den Fahrer vorrangig bei seiner **primären Fahraufgabe** unterstützen. Die notwendigen Tätigkeiten und die zur Durchführung zur Verfügung stehende Zeit sind in die drei Ebenen der Fahrzeugführung gegliedert [EWG+00], [GGS09, S. 33], [Res09, S. A67ff.]:

- **Navigieren:** Der Fahrer legt die Fahrtroute vor der Fahrt fest oder verändert diese zur Fahrtzeit. Er berücksichtigt dabei Einflussgrößen wie die zu erwartende Fahrtzeit oder das aktuelle Verkehrsaufkommen. Die Planungszeit kann zwischen wenigen Sekunden bis zu einigen Minuten betragen.
- **Bahnhöfchen:** Hier wird die geplante Fahrtroute umgesetzt. Dies umfasst Spurhalten, Überholen, Folgefahrt sowie Reaktionen auf Verkehrszeichen und resultiert in Führungsgrößen, die die gewünschte Längs- und Querführung des Fahrzeugs abbilden. Die Durchführungszeit einzelner Aktionen liegt dabei in einem Zeitfenster von etwa 1 s - 10 s.
- **Stabilisieren:** Die Führungsgrößen werden hier in Fahrzeugbewegungen überführt. Dafür werden Stellgrößen der Fahrzeugführung (bspw. Lenkwinkel, Gas- und Bremspedalstellung) festgelegt. Die Durchführungszeit liegt dabei unter 1 s.

Die eingangs erwähnten frühen Fahrerassistenzsysteme arbeiten auf der Ebene der Stabilisierung. Diesen Systemen ist gemein, dass sie einzelne Zustände des Fahrzeugs erfassen. Durch die Fortschritte in allen Bereichen der Mechatronik unterstützen heutige Fahrerassistenzsysteme auf allen drei Ebenen der Fahrzeugführung. Diese Systeme

werden häufig unter dem Begriff **fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme**⁸ zusammengefasst. Eine einheitliche, anerkannte Begriffsdefinition ist gegenwärtig jedoch nicht zu erkennen. Im Rahmen des Projekts RESPONSE 3⁹ wurde die Klasse der fortgeschrittenen Fahrerassistenzsysteme durch charakteristische Eigenschaften gekennzeichnet. Nach RESPONSE 3 muss das System sämtliche der folgenden Eigenschaften aufweisen [Res09, S. 4]:

- Unterstützung des Fahrers bei seiner primären Fahraufgabe
- Aktive Unterstützung bei lateraler und/oder longitudinaler Kontrolle
- Erkennen und Bewerten der Fahrzeugumgebung
- Einsatz komplexer Signalverarbeitung
- Direkte Interaktion zwischen Fahrer und System

Neben diesen Eigenschaften schränkt RESPONSE 3 den Begriff der fortgeschrittenen Fahrerassistenzsysteme auf solche Systeme ein, die vorrangig auf der Ebene der Bahnführung wirken. Derartige Systeme assistieren dem Fahrer, bspw. durch Warnhinweise, die zusätzliche zeitliche Spielräume für die Planung und Durchführung sicherer Fahrhandlungen einräumen. Lediglich in Notfallsituationen wird in die Fahrzeugdynamik eingegriffen. Die Verantwortung für die Fahraufgabe bleibt daher vollständig beim Fahrer [Res09, S. 4].

RESPONSE 3 gibt ferner einen Überblick über Systeme, die dieser Charakterisierung entsprechen [Res09, S. A66ff.]. Dazu gehören sowohl heute verfügbare, als auch in der Forschung bzw. Vorentwicklung befindliche Systeme; Beispiele sind: Aktive Geschwindigkeitsregelungen [WDS09], Spurhalteassistenten [Gay09], prädiktive Scheinwerferregelungen [BBG06] sowie autonomes Kreuzungsmanagement [BT09]. Die vorliegende Arbeit orientiert sich an derartigen Systemen. Die Funktionsweise der einzelnen Systeme sind in [LKV+07] und [WHW09, S. 448ff.] dargestellt. Zusammenfassend sind dabei die folgenden drei Aspekte von besonderer Bedeutung:

- **Mechatronik:** Die Mechatronik stellt das (technische) Grundgerüst moderner Fahrerassistenzsysteme dar. Innovationen und Funktionsverbesserungen sind dabei in allen Bereichen zu erwarten. Die Vernetzung einzelner Fahrfunktionen
-

⁸ Im englischen werden fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme als „Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)“ oder „Intelligent Transport System (ITS)“ angeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wird durchgängig die deutsche Bezeichnung verwendet.

⁹ RESPONSE 3 ist ein Teilprojekt des von der europäischen Kommission geförderten integrierten Projekts PReVENT (FP6-507075, 2004 - 2008). Das Konsortium bestand aus 52 Partnern aus der Fahrzeug- und Zuliefererindustrie, Hochschulen und Forschungsinstituten sowie öffentlichen Einrichtungen des Verkehrswesens.

durch integrierte Fahrdynamikregelungen bietet bspw. im Bereich der Informationsverarbeitung und Aktorik ein großes Nutzenpotential [NJT08]. Durch Fusion verschiedener Sensordaten (ebenfalls in der Informationsverarbeitung) wird ferner die maschinelle Wahrnehmung der Fahrsituation ermöglicht [FLK10]. Neben der Verbesserung etablierter Sensoren (Radar, Infrarot, Ultraschall) gewinnen dabei weitere Sensoren an Bedeutung: Das Navigationssystem kann bspw. als ein zusätzlicher Sensor eingesetzt werden, der ortsbzogene Daten bereitstellt [BBG06], [Ess08, S. 17], [Kno10, S. 109ff.].

- **Zusammenspiel von Fahrer und Assistenzsystem:** Der Fahrer behält die Verantwortung für seine Fahraufgabe. Damit das Assistenzsystem dabei unterstützen kann, muss sichergestellt werden, dass notwendige Informationen beim Fahrer ankommen, richtig interpretiert und in Handlungen überführt werden, die der Verkehrssituation angepasst sind. Dies bedingt eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle. Darüber hinaus müssen Fehler oder Missbrauch durch den Menschen in Betracht gezogen werden. Insgesamt weisen diese Aspekte auf eine herausragende Bedeutung der nutzergerechten Gestaltung von fortgeschrittenen Fahrerassistenzsystemen hin [GGS09, S. 25], [Kön09, S. 38].
- **Umfeld/ Umgebung:** Das Umfeld oder die Umgebung beeinflussen sowohl den Fahrer, als auch das Fahrzeugsystem. Durch die zunehmende automatische Erfassung der Verkehrssituation durch neue und bessere Sensorik und Sensordatenfusion gewinnt dieser Aspekt weiter an Bedeutung.

Insgesamt müssen diese Aspekte bei der Entwicklung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme ganzheitlich betrachtet und integriert erprobt werden.

2.2.3 Entwicklungsverfahren bei Fahrerassistenzsystemen

Fahrerassistenzsysteme sind mechatronische Systeme. Die wesentlichen Herausforderungen bei deren Entwicklung sind die steigende Heterogenität und Komplexität der Systeme sowie die Beteiligung mehrerer Fachgebiete und der damit einhergehende hohe Abstimmungsbedarf. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, schlägt die VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme“ [VDI2206] ein flexibles, fachgebietsübergreifendes Vorgehen vor. Die Richtschnur des grundsätzlichen Vorgehens ist dabei das auf der Softwaretechnik basierende und an die Mechatronik angepasste V-Modell (Bild 2-3). Dieses gibt die wesentlichen Entwicklungsschritte vor, die fallspezifisch auszuprägen und je nach Komplexität mehrfach zu durchlaufen sind [VDI2206, S. 26ff.]:

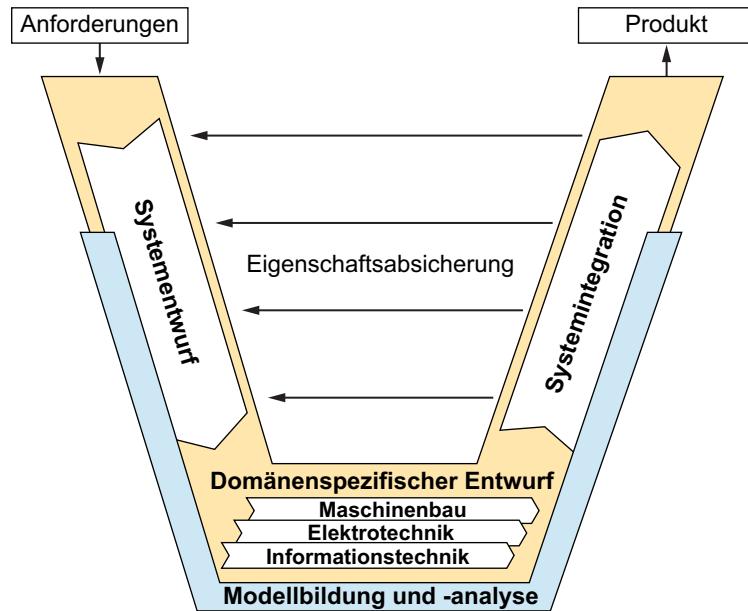


Bild 2-3: Das V-Modell als Makrozyklus inklusive der Modellbildung und -analyse [VDI2206, S. 29].

- **Anforderungen:** Für einen konkreten Entwicklungsauftrag werden die Anforderungen beschrieben. Diese sind gleichzeitig die Bewertungsgrundlage für das spätere Produkt.
- **Systementwurf:** Hier werden die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produkts spezifiziert. Ergebnis ist das fachgebietsübergreifende Lösungskonzept.
- **Domänen spezifischer Entwurf:** An dieser Stelle erfolgt die Konkretisierung des Lösungskonzepts in den beteiligten Fachgebieten. Fachgebietsspezifische Auslegungen und Berechnungen sollen die Funktionserfüllung sicherstellen.
- **Systemintegration:** Die Ergebnisse der einzelnen Fachdisziplinen werden zum Gesamtsystem integriert, damit das Zusammenwirken untersucht werden kann.
- **Eigenschaftsabsicherung:** Während der Systemintegration wird das System anhand des Lösungskonzepts und der Anforderungen überprüft. Die gewünschten und die tatsächlichen Systemeigenschaften müssen dabei übereinstimmen.
- **Modellbildung und -analyse:** Die Systemeigenschaften werden durchgehend mittels rechnerunterstützten Modellen, Methoden und Werkzeugen analysiert.

Die generischen Schritte des V-Modells wurden bspw. durch MAURER [Mau09, S. 45f.] und KLEIN et al. [KOM+09, S. 4] auf die (modellbasierte) Entwicklung und Erprobung

von Fahrerassistenzsystemen angepasst. Diesen Vorgehensmodellen ist gemein, dass Simulationen¹⁰ zur (frühzeitigen) Eigenschaftsabsicherung eine bedeutende Rolle spielen. Dies gilt insgesamt für die Entwicklung von mechatronischen (Fahrerassistenz-) Systemen; sie ist durch die *Notwendigkeit von Virtual Prototyping* gekennzeichnet [VDI2206, S. 22].

2.2.3.1 Virtual Prototyping

Virtual Prototyping¹¹ heißt, Rechnermodelle von in Entwicklung befindlichen Produkten zu bilden und zu analysieren. Ziel ist, die Funktionen des Systems frühzeitig abzusichern und Aussagen über das Verhalten des Systems zu gewinnen – bevor ein realer Prototyp existiert; auf deren Bau kann damit weitgehend verzichtet werden. Dies spart Zeit und Geld [GEK01, S. 383f.].

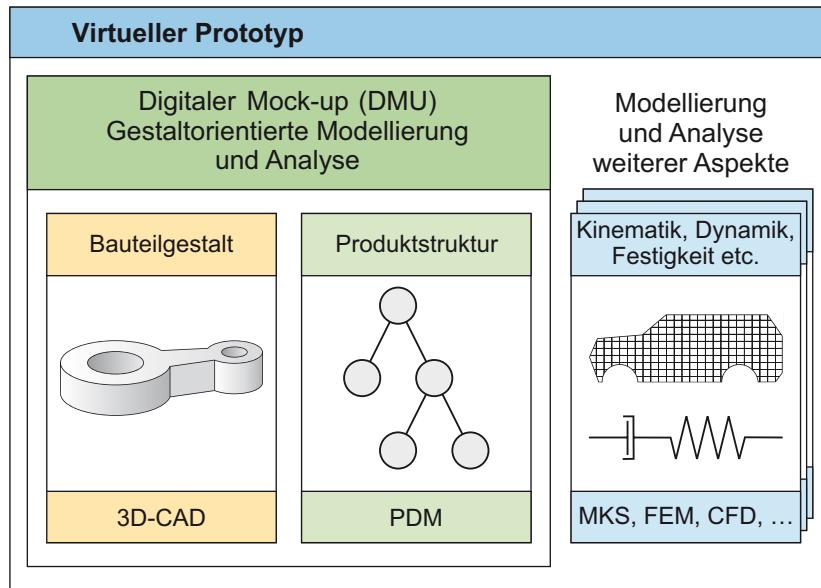
Im Kern der Virtuellen Produktentwicklung steht der Virtuelle Prototyp des in Entwicklung befindlichen Systems. Der **Virtuelle Prototyp** ist dabei eine rechnerinterne Repräsentation des realen Prototyps. Bild 2-4 zeigt eine schematische Darstellung des Begriffs [GEK01, S. 383f.], [GPW09, S. 375f.].

Die Basis für den Virtuellen Prototyp ist der sogenannte digitale Mock-Up (DMU). Der englische Begriff *Mock-Up* steht für ein Modell in natürlicher Größe, eine Attrappe. Im Kontext der virtuellen Produktentwicklung wird darunter ein rechnerinternes Modell der Gestalt des zu entwickelnden Produkts verstanden. Der DMU dient der Entwicklung der sogenannten Baustuktur; er beschreibt die Gestalt (Geometrie) und Struktur des Systems. Die Gestalt wird dabei rechnerintern durch 3D-CAD-Modelle¹² abgebildet. Zusammen mit der Produktstruktur (Baustuktur) ergeben diese CAD-Modelle den Bauzusammenhang des gesamten Produkts. Die Produktstruktur wird mittels eines Produktdatenmanagement (PDM) verwaltet [GEK01, S. 383f.], [GPW09, S. 375f.].

¹⁰ Simulation: „Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt. Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden.“ [VDI3633]

¹¹ Die Begriffe Virtual Prototyping und Virtuelle Produktentwicklung werden im Rahmen dieser Arbeit synonym verwendet.

¹² CAD: Computer Aided Design



PDM: Produktdatenmanagement; MKS: Mehrkörpersimulation; CFD: Computational Fluid Dynamics; FEM: Finite Elemente Methode

Bild 2-4: Die Struktur des Begriffs Virtueller Prototyp nach [GEK01, S. 385] und [GPW09, S. 376].

Der Virtuelle Prototyp ist eine Erweiterung des digitalen Mock-Ups, weil neben der Gestalt auch Aspekte des Verhaltens berücksichtigt werden. Dabei werden beispielsweise Bewegungen (Kinematik), Reaktionen auf Krafteinwirkung (Dynamik) oder Festigkeiten des Systems simuliert. Zur Berechnung dieser Aspekte werden dedizierte Simulationsmethoden (Mehrkörpersimulation, Finite Elemente Methode) eingesetzt [GEK01, S. 383f.], [GPW09, S. 375f.].

Virtual Prototyping ist schließlich die Arbeit mit dem Virtuellen Prototyp. Dabei gliedert sich der Ablauf in drei Phasen (Bild 2-5) [GEK01, S. 419ff.], [BZB+03, S. 3], [WK11, S. 139]:

- **Modellbildung:** Es werden vereinfachte formale Modelle des in Entwicklung befindlichen Systems gebildet. Dabei ist entscheidend, dass die Modelle alle Eigenschaften des realen Systems und seiner Umgebung abbilden, die das Verhalten maßgeblich beeinflussen.
- **Simulation:** Die Berechnung der Modelle wird mittels numerischer Algorithmen durchgeführt, da geschlossene analytische Lösungen nur selten möglich sind. Interaktive Simulationen erlauben ferner den Eingriff eines Benutzers und die Verarbeitung von dessen Eingaben.
- **Analyse:** Die Ergebnisdaten der Simulation sind zu interpretieren. Im Wesentlichen sind dabei die relevanten Informationen zu extrahieren, aufzubereiten und anschaulich zu visualisieren.

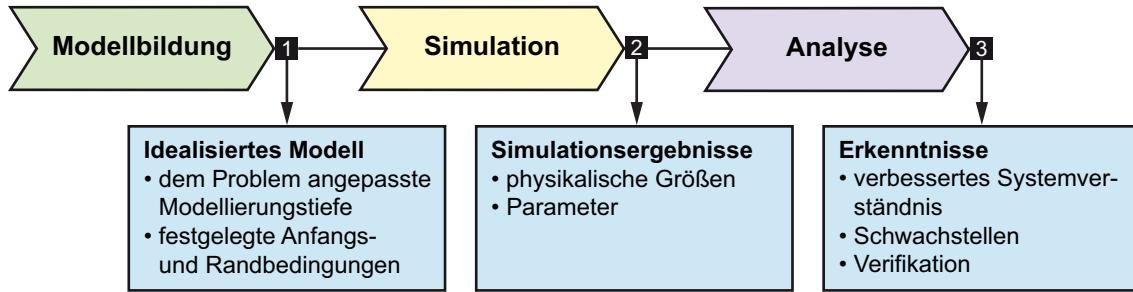


Bild 2-5: Generisches Vorgehen beim Virtual Prototyping in Anlehnung an [GEK01, S. 421].

Diese Phasen sind nicht strikt linear zu durchlaufen; Rücksprünge in eine vorherige Phase sind durchaus üblich, um bspw. die Modelle zu verfeinern.

2.2.3.2 Validierungsmethoden und -technologien für Fahrerassistenzsysteme

Zur Validierung der Systemeigenschaften von Fahrerassistenzsystemen werden unterschiedliche Methoden und Werkzeuge des Virtual Prototyping eingesetzt, für die jeweils die drei Phasen der Modellbildung, Simulation und Analyse durchlaufen werden. In Anlehnung an ATHANASAS et al. lassen sich die eingesetzten Validierungsmethoden und -technologien in einem Diagramm ordnen, welches den zeitlichen Entwicklungsprozess dem Realisierungsgrad des (virtuellen) Prototypen gegenüberstellt (Bild 2-6) [ABF+03, S. 267f.]. Ähnliche Ansätze werden von HUESMANN et al. [HEW06, S. 136ff.] und KLEIN et al. [KOM+09, S. 4] vorgeschlagen. Gemein ist diesen Ansätzen der Einsatz folgender Validierungsmethoden und -technologien:

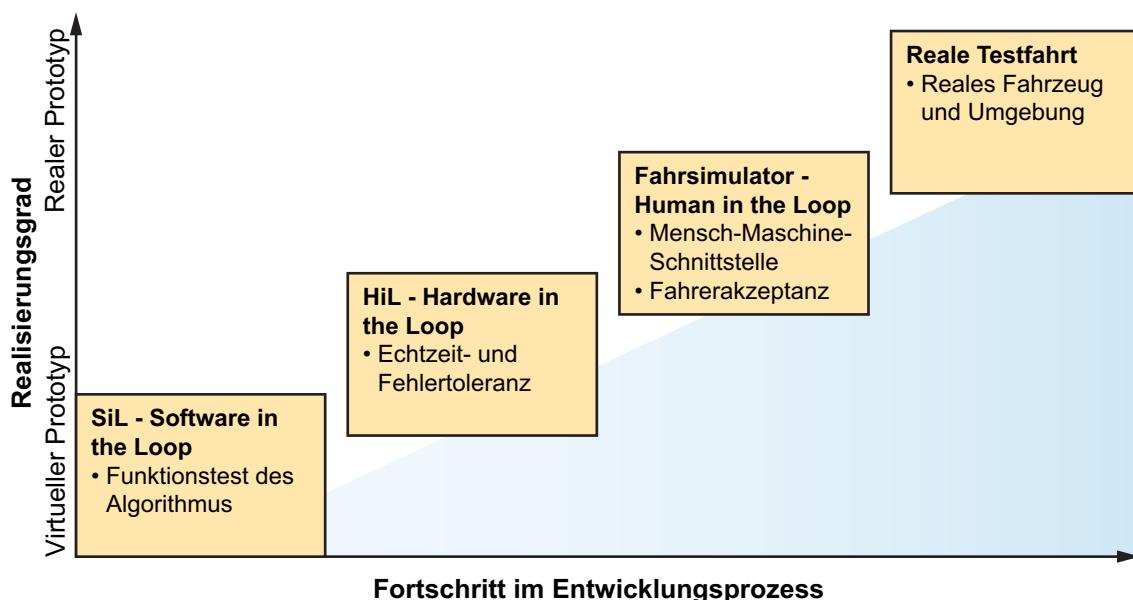


Bild 2-6: Validierungstechnologien für Fahrerassistenzsysteme in Anlehnung an [ABF+03, S. 267].

- Software in the Loop (SIL)¹³ ermöglicht das frühzeitige Testen von Steuerungs-, bzw. Regelungssoftware. Dabei werden Funktionstest der Algorithmen durchgeführt; durch Automatisierung lassen sich hier eine Vielzahl von Tests durchführen.
- Hardware in the Loop (HIL) ermöglicht das Erproben der Steuerungs-, bzw. Regelungssoftware des Fahrerassistenzsystems auf der Zielsystemhardware. Das bedeutet, der Algorithmus wird auf einem frühen Muster des Steuergeräts oder einem Seriensteuergerät berechnet. Neben funktionalen Eigenschaften können hier bereits nicht-funktionale Eigenschaften wie Echtzeitverhalten oder Fehlertoleranz untersucht werden.
- Fahrsimulator (Human in the Loop): In einem Fahrsimulator werden sowohl die Ergebnisse der SIL, als auch der HIL eingesetzt. Virtuelle Versuchsfahrten ermöglichen zum einen die interaktive Erprobung der Funktionsweise des Virtuellen Prototyps; sie unterstützen den Entwickler dabei bspw. bei der Auslegung des Regelungsalgorithmus eines prädiktiven Scheinwerfersystems [BBG06]. Zum anderen lassen sich durch interaktive virtuelle Versuchsfahrten Einblicke in das Zusammenspiel zwischen Mensch und Assistenzsystem gewinnen, welche die Abstimmung der Mensch-Maschine-Schnittstelle unterstützen. Darüber hinaus können Fahrsimulatoren die Funktionsweise von Assistenzsystemen vermitteln, die in der Realität nur in Notfallsituationen eingesetzt werden [Kno10, S. 119]. Interaktive Fahrsimulationen sind heute eine anerkannte und weit verbreitete Methode, die zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen empfohlen wird [Res09, S. A60f.].
- Reale Versuchsfahrten: Letztlich kann Virtual Prototyping reale Versuchsfahrten nicht vollständig ersetzen; es wirkt komplementär und unterstützend. Zur Validierung des Gesamtsystems sind daher reale Versuchsfahrten erforderlich [Boc09, S. 76], [Mau09, S. 52], [Kno10, S. 116].

Allen Validierungsmethoden und -technologien ist gemein, dass sie neben dem aktuell verfügbaren Virtuellen Prototyp des Fahrerassistenzsystems auch ein Modell der Betriebsumgebung einsetzen. Die Weiterverwendung von Modellen, Daten und Umgebungen zu einer durchgängigen Werkzeugkette ist dabei generell erstrebenswert [NDW09, S. 39ff.]. So sollten die in der interaktiven Fahrsimulation eingesetzten Modelle auf Modellen der vorangegangen Validierungsmethoden und -technologien aufbauen, um redundante Arbeiten in der Modellbildung zu vermeiden.

¹³ Software in the Loop ist die Integration von Systemmodellen in eine gemeinsame Simulationsumgebung. Hardware in the Loop ist die Integration von realen Komponenten (Bauteilen) und Systemmodellen in eine gemeinsame Simulationsumgebung [VDI2206, S. 40].

2.3 Interaktive Fahrsimulation

Interaktive Fahrsimulationen¹⁴ sind Werkzeuge des Virtual Prototyping: Sie ermöglichen die integrierte Untersuchung der Aspekte Mechatronik, Umgebung und Zusammenspiel zwischen Fahrer und Fahrzeugsystem (vgl. Abschnitt 2.2.2). Interaktive Fahrsimulationen können mit einer großen Bandbreite an Systemkonfigurationen realisiert werden. So existieren Einzelplatzsysteme, die mit einfachen Bedienelementen der Konsumelektronik betrieben werden, ebenso wie Fahrsimulationssysteme, die ein vollständiges Fahrzeug realitätsnah bewegen können. Dabei sind Fahrsimulatoren¹⁵ mit einem Bewegungssystem bevorzugt einzusetzen, da sie den höchsten Immersionsgrad¹⁶ bieten. Ferner übt die haptische Kraftrückkopplung eines Bewegungssystems einen positiven Effekt auf das realistische Verhalten der Fahrer aus [CDR+08].

NEGELE bezeichnet ein Fahrsimulationssystem¹⁷ als *Prüfstand zum Test von Systemen im geschlossenen Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt* [Neg07, S. 2]. Derartige Systeme werden heute bei Fahrzeugherstellern (z.B. die Daimler AG [Zee10] oder Toyota Motor Corporation AG [Cha08]) und akademischen Instituten eingesetzt (z.B. die Universität von Iowa [SGP03], das deutsche Luft und Raumfahrtzentrum in Braunschweig [Sui05], die technische Universität München [Neg07] und das Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn (Bild 2-7)). Entsprechende Systeme werden in weiten Teilen der Fahrzeugentwicklung eingesetzt [CDF+07]. Einen guten Überblick über moderne Fahrsimulatoren und deren Anwendungsbereiche liefert SLOB [Slo08].

Zum Betrieb von Fahrsimulationssystemen werden die drei generischen Phasen des Virtual Prototyping durchlaufen (vgl. Abschnitt 2.2.3.1) (Bild 2-7). Zunächst werden im Rahmen der **Modellbildung** Simulationsmodelle aufgebaut, die dedizierte Aspekte des Fahrzeugs, der Umgebung und des Verkehrs abbilden. Einzelne Simulationsmodelle werden anschließend anwendungsspezifisch gekoppelt. Während der eigentlichen **Simulation** (Laufzeit) werden diese Simulationsmodelle mit Hilfe der Hard- und Softwarekomponenten des Fahrsimulationssystems verarbeitet. Für den Fahrer entsteht dabei der Eindruck einer realen Versuchsfahrt. Zur Laufzeit werden Simulationsdaten berechnet, die zur **Analyse** eingesetzt werden. Ziel ist, Rückschlüsse auf das virtuelle

¹⁴ Auf das Adjektiv interaktiv wird im weiteren Verlauf der Arbeit weitgehend verzichtet. Zur besseren Lesbarkeit wird stattdessen der einfache Begriff Fahrsimulation verwendet. Wenn nicht explizit anders dargestellt, ist damit immer die interaktive Fahrsimulation gemeint.

¹⁵ Die Begriffe Fahrsimulator und Fahrsimulationssystem werden im Folgenden synonym verwendet.

¹⁶ Immersion (auch Präsenzempfinden [Neg07, S. 18]) bezeichnet die Einbeziehung des Benutzers in eine virtuelle Umgebung. Im Englischen bedeutet Immersion etwa eintauchen [GEK01, S. 478].

¹⁷ Wenn im Folgenden der Begriff Fahrsimulationssystem oder Fahrsimulator verwendet wird, so sind leistungsfähige Systeme gemeint, die eine reale Fahrzeugkabine mit entsprechenden Bedienelementen integrieren und über ein Bewegungssystem verfügen.

Fahrzeug bzw. den Fahrer zu ziehen. Die Analyse kann im Nachgang an die Simulation durchgeführt werden, beispielsweise durch Auswertung von Kennlinien, die aus den Simulationsdaten abgeleitet werden. Fahrsimulatoren bieten darüber hinaus die Möglichkeit interaktive visuelle Analysen durchzuführen; so kann beispielsweise das Verhalten moderner Scheinwerfersysteme schon zur Laufzeit qualitativ untersucht werden [BGG+08].

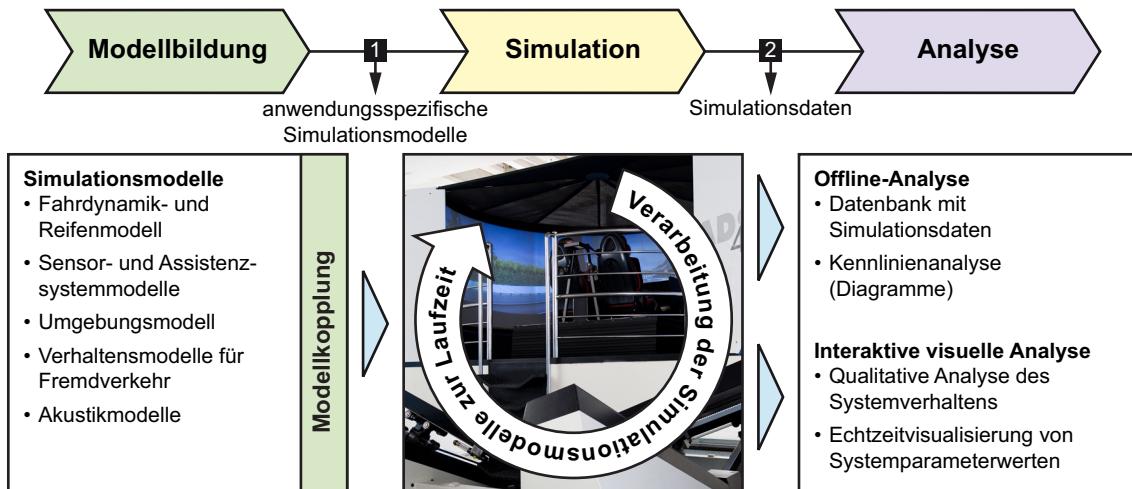


Bild 2-7: Generisches Vorgehen des Virtual Prototyping und entsprechende Ausprägungen für die interaktive Fahrsimulation.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Simulationsmodelle sowie die Hard- und Softwarekomponenten, die explizit für interaktive Fahrsimulationen eingesetzt werden. Die Beschreibung ist dabei auf die Phasen Modellbildung und Simulation begrenzt; die Analyse und die dabei eingesetzten Methoden und Werkzeuge sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

2.3.1 Systemkomponenten interaktiver Fahrsimulationen

Interaktive Fahrsimulationen bestehen aus verschiedenen Systemkomponenten. Dies beinhaltet sowohl Simulationsmodelle, als auch Software- und Hardwarekomponenten (Bild 2-8). Zwar unterscheiden sich bestehende Fahrsimulatoren in der konkreten Ausprägung der einzelnen Komponenten, gegenwärtige Gesamtarchitekturen sind jedoch ausnahmslos durch die folgenden Systemkomponenten gekennzeichnet (bspw. [Zee10, S. 159f.] [Neg07, S. 22ff.], [NDW09, S. 40f.], [Kau03, S. 11ff.]):

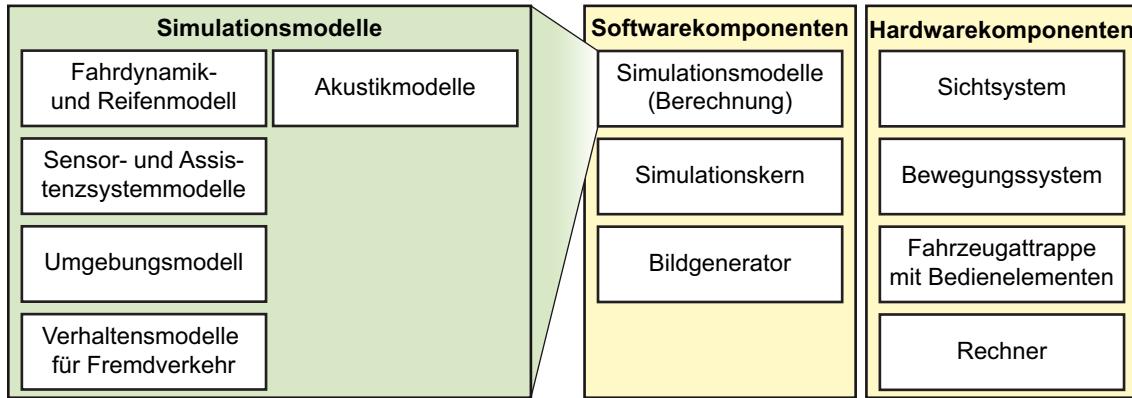


Bild 2-8: Charakteristische Systemkomponenten der interaktiven Fahrsimulation mit einem Fahrsimulator.

Simulationsmodelle

Simulationsmodelle werden im Rahmen der Modellbildung aufgebaut und zur Laufzeit berechnet (Bild 2-8). Die Modellierungstiefe einzelner Modelle ist dabei von den Anforderungen an die Fahrsimulation abhängig und variiert entsprechend der Anwendungsbereiche. So sind bspw. einfache Modelle der Fahrdynamik ausreichend, um Ausbildungsfahrten durchzuführen. Zur Fahrwerksabstimmung im Fahrsimulator sind hingegen hochdetaillierte Modelle der Fahrdynamik notwendig. Insgesamt sind Simulationsmodelle die Grundlage der Fahrsimulation; sie gliedern sich wie folgt:

- **Fahrdynamik- und Reifenmodell:** Das Fahrdynamikmodell steht für mehrere echtzeitfähige Rechenmodelle, welche die Längs- und Querdynamik des zu simulierenden Fahrzeugs beschreiben. Dies beinhaltet Teilmodelle der Lenkung, des Antriebsstrangs, der Bremsen und – insbesondere – des Reifenverhaltens [Neg07, S. 47ff.], [Kau03, S. 11]. Die Modellierung von Fahrdynamik- und Reifenmodellen und die zugrundeliegenden physikalischen Eigenschaften sind ausführlich dokumentiert (bspw. [Ril07], [Mit04]).
- **Sensor- und Assistenzsystemmodelle¹⁸:** Sensormodelle beschreiben bspw. Beschleunigungs-, Geschwindigkeits-, oder Abstandssensoren. Darüber hinaus werden auch bildbasierte Sensoren zunehmend durch Simulationsmodelle nachgebildet [NNL+09, S. 32ff.]. Das Verhalten von Fahrerassistenzsystemen wird in eigenen Simulationsmodellen abgebildet, die auf Ergebnisse der Sensormodelle zurückgreifen.
- **Umgebungsmodell:** Die Bildung von Umgebungsmodellen ist das Handlungsfeld dieser Arbeit; sie werden daher in Kapitel 2.3.2 detailliert behandelt.

¹⁸ Die Begriffe Assistenzsystem und Fahrerassistenzsystem im Folgenden synonym verwendet; Grundlage ist die Begriffsdefinition aus Abschnitt 2.2.2.

- **Verhaltensmodelle für Fremdverkehr:** Dies sind vorrangig Fahrermodelle, die den Kurs einzelner Fremdverkehrsteilnehmer regeln. Dafür werden regelbasierte Ansätze eingesetzt, die entsprechend geltender Verkehrsregeln und der gegenwärtigen Verkehrssituation agieren [Bar10, S. 15ff.].
- **Akustikmodelle:** Diese beschreiben Geräusche, die den aktuellen Fahrzustand des Eigenfahrzeugs wiedergeben, wie drehzahl- und lastabhängige Motorgeräusche, Reifen- und Abrollgeräusche, Windgeräusche oder fahrbahninduzierte Schwingungen. Darüber hinaus werden auch Geräusche externer Schallquellen abgebildet, bspw. entfernungsabhängige Geräusche des Fremdverkehrs [Neg07, S. 50ff.].

Softwarekomponenten

Softwarekomponenten bilden das Rahmenwerk, welches zur Laufzeit der Simulation die Verarbeitung und Kommunikation zwischen Simulationsmodellen sowie die Darstellung der Simulationswelt ermöglicht. Wesentlich dafür sind folgende Komponenten:

- **Simulationsmodelle (Berechnung):** Zur Laufzeit sind Simulationsmodelle ausführbarer Programmcode. Sie gelten daher als eigenständige Softwarekomponenten. Die Ausgangswerte einzelner Simulationsmodelle werden dabei in Abhängigkeit der anliegenden Eingangswerte berechnet; so berechnet bspw. das Fahrdynamikmodell die Längs- und Querbeschleunigung des Fahrzeugs in Abhängigkeit der aktuellen Gaspedalstellung, des Lenkwinkels und weiterer Eingänge.
- **Simulationskern:** Der Simulationskern kontrolliert und synchronisiert die Datenflüsse einzelner Simulationsmodelle [NDW09, S. 40]. Er verwaltet ferner die Zustände der Simulation und der einzelnen Simulationsteilnehmer und bildet damit die Simulationswelt zu jedem Zeitpunkt vollständig ab. Die dabei generierten Daten sind Grundlage der Analyse und werden vom Simulationskern gespeichert.
- **Bildgenerator:** Hier wird die graphische Darstellung der virtuellen Szene (vgl. Abschnitt 2.3.2.2) generiert. Der Bildgenerator verarbeitet dazu die aktuelle Position und Ausrichtung des Eigenfahrzeugs, das Umgebungsmodell sowie weitere Simulationszustände und berechnet die computergraphische Darstellung in der Bildebene. Darüber hinaus können Effekte (bspw. Wetter) und ergänzende Informationen (bspw. Parameterwerte eines Assistenzsystems) in die computergraphische Szene integriert werden. Der entsprechende Prozess wird als **Rendering** bezeichnet. Der Bildgenerator muss dabei eine Bildwiederholungsrate von mehr als 30 Bildern pro Sekunde garantieren, um ein für das menschliche Auge flüssiges Bild zu erzeugen.

Hardwarekomponenten

Die Hardwarekomponenten unterteilen sich in Ein- und Ausgabesysteme zur Realisierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie Rechner zur Ausführung der Softwarekomponenten:

- **Sichtsystem:** Die vom Bildgenerator gelieferten Einzelbilder werden dargestellt. Dafür werden in modernen Fahrsimulatoren digitale Projektoren eingesetzt. Diese projizieren die Bilder auf eine Fläche, die idealerweise das gesamte Sichtfeld des Fahrers abdeckt. Darüber hinaus werden zusätzlich Bildschirme eingesetzt, um die Spiegel des Fahrzeugs nachzubilden [Neg07, S. 22ff.].
- **Bewegungssystem:** Dieses ermöglicht dem Fahrer eine haptische Rückkopplung der fahrdynamischen Größen. Dabei sollen berechnete Größen der Fahrdynamik durch das Bewegungssystem umgesetzt werden. Aufgrund der eingeschränkten Verfahrwege von Fahrsimulatoren können diese Vorgaben jedoch nicht unverfälscht wiedergegeben werden [Neg07, S. 38ff.]. Zwar lassen sich kurzzeitige Beschleunigungen durch Translation der Kabine nachbilden, langanhaltende Beschleunigungen werden jedoch durch Kippbewegungen realisiert; der Eindruck einer Beschleunigung entsteht dabei durch die Gravitation. Verfahren zur Abbildung fahrdynamischer Größen auf den verfügbaren Bewegungsumfang und das Frequenzspektrum des Bewegungssystems werden als *Motion-Cueing* bezeichnet und sind hinreichend dokumentiert (bspw. [FSP10]); sie sind allerdings auf die Kinematik und Dynamik spezifischer Fahrsimulatoren anzupassen.
- **Fahrzeugattrappe mit Bedienelementen:** Der Fahrer sitzt in einer Fahrzeugattrappe, die den Innenraum eines realen Fahrzeugs möglichst real nachbildet. Die Attrappe ist mit Elektronik ausgestattet, welche die Bedieneingaben des Fahrers (Pedalstellungen, Lenkwinkel usw.) auswertet und die Anzeigegeräte (Tachometer, Drehzahlmesser usw.) ansteuert. Das Lenkrad bietet eine haptische Rückkopplung, die mit Hilfe eines Motors an der Lenksäule umgesetzt wird. Darüber hinaus ist die Attrappe mit Lautsprechern ausgerüstet, um dem Fahrer auch akustische Rückmeldungen zu vermitteln.
- **Rechner¹⁹:** Diese stellen die notwendige Rechenleistung zur Ausführung der Softwarekomponenten bereit. Moderne Fahrsimulationssysteme setzen dabei zwei unterschiedliche Rechnerklassen ein: Die Softwarekomponenten, die harte Echtzeitanforderungen erfüllen müssen (bspw. die Berechnung der Fahrdynamik), werden auf spezieller Echtzeithardware berechnet. Die Ausführung von

¹⁹ Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird in Anlehnung an Konrad Zuse der deutsche Begriff Rechner (*engl. Computer*) verwendet.

Softwarekomponenten, die in weicher Echtzeit berechnet werden (bspw. die Computergraphik), erfolgt üblicherweise auf kostengünstigen PC-Systemen.

Die genannten Systemkomponenten interaktiver Fahrsimulationen sind anwendungsspezifisch auszuprägen. NEGELE beschreibt dafür wesentliche Ausprägungsstufen einzelner Komponenten und schlägt eine Methode zur Konzipierung von Fahrsimulatoren vor [Neg07].

2.3.2 Umgebungsmodelle für interaktive Fahrsimulationen

Das **Umgebungsmodell**²⁰ ist ein zentraler Bestandteil interaktiver Fahrsimulationen. Es besitzt mehrere Schnittstellen zu weiteren Simulationsmodellen [Neg07, S. 22ff.], [Kau03, S. 11ff.]: Das Umgebungsmodell ist zum einen ein wesentlicher Bestandteil der Bildgenerierung, zum anderen ist es die Grundlage für die Verkehrssimulation und die Fahrdynamik (vgl. Abschnitt 2.3.2.3).

Umgebungsmodelle beschreiben **unbewegliche Objekte und Flächen** in der virtuellen Umgebung. Dies beinhaltet Landschaftsoberflächen, Straßenverläufe, Fahrstreifen, Fahrbahnoberflächen, Lichtsignalanlagen, Verkehrszeichen, Gebäude und Vegetation. Diese Objekte sind geometrisch repräsentiert. Darüber hinaus sind physikalische, logische topologische Eigenschaften enthalten, die bspw. Abbiegerelationen in Verkehrsknoten festlegen [Car01, S. 10], [Neg07, S. 56ff.], [Ran03, S. 141f.], [Kau03, S. 8ff.], [ARA+01, S. 370].

Es wird zwischen **geotypischen** und **geospezifischen** Umgebungsmodellen unterschieden. Geotypische Umgebungsmodelle beschreiben fiktive Umgebungen; geospezifische Umgebungsmodelle bilden hingegen reale Umgebungen nach [Guo05, S. 1], [Ran03, S. 142], [KNW09, S. 87f.], [DBB11, S. 432ff.].

Darüber hinaus unterscheiden sich Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen von solchen, die für sonstige interaktiv visuelle Simulationen, bspw. Flugsimulationen, eingesetzt werden. Diese benötigen weitläufige Landschaften, die aus großer Höhe ein realitätsnahes Erscheinungsbild aufweisen [KNW09, S. 87]. Für Fahrsimulationen hingegen ist der **Straßenverlauf** der *primäre Konstruktionsfaktor* [AB01, S. 5]. Der Straßenverlauf und dessen unmittelbarer Nahbereich sind für Fahrsimulationen von großer Bedeutung, während Objekte in größerer Entfernung zum Straßenverlauf weniger relevant sind. Damit ist der Detailgrad von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen besonders

²⁰ In der englischsprachigen Literatur sind die Begriffe virtual environment, synthetic environment oder environment model etabliert (bspw. in [EFG+03]). In Anlehnung wird in der vorliegenden Arbeit der Begriff Umgebungsmodell verwendet, weil er den Kern – die Umgebung – beinhaltet. Synonym dazu wird in der deutschsprachigen Literatur häufig der Begriff Datenbasis (bspw. in [Ran03]) verwendet.

im Nahbereich der Straßen deutlich höher als bei Flugsimulationen [Ran03, S. 139], [CKP96, S. 19]. Das Umgebungsmodell sollte in diesem Bereich sehr hoch aufgelöst sein und Details wie Fahrbahnmarkierungen enthalten [GWK+09].

NEGELE unterscheidet ferner drei Arten von Umgebungsmodellen [Neg07, S. 57ff.]:

- **Statische Umgebungsmodelle** bilden die Umgebung vollständig in einem Modell ab, das ein global konsistentes Straßennetz beinhaltet. Heutige Fahrsimulatoren setzen diese Art von Umgebungsmodellen nahezu ausnahmslos ein.
- **Modular statische Umgebungsmodelle** werden aus einzelnen lokal konsistenten Bereichen zusammengesetzt. Dies sind üblicherweise vorgefertigte Kacheln (vgl. Abschnitt 3.1.2). Das entstehende Straßennetz ist dabei nicht notwendig global konsistent.
- **Dynamische²¹ Umgebungsmodelle** generieren das Umgebungsmodell zur Laufzeit. Dabei werden einzelne Segmente, die lokale Bereiche der Umgebung beschreiben, situationsabhängig aneinandergereiht (vgl. Abschnitt 3.1.4).

Vor diesem Hintergrund befasst sich die vorliegende Arbeit mit geospezifischen, statischen Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen. Der Begriff des Umgebungsmodells wird daher für den weiteren Verlauf der Arbeit wie folgt definiert:

„Das Umgebungsmodell für Fahrsimulationen beinhaltet logische, topologische, physikalische und geometrische Abbildungen der Gesamtheit aller unbeweglichen Objekte und Flächen geospezifischer, global konsistenter Straßenverläufe und deren unmittelbarer Umgebung.“

Zur vollständigen Abbildung der Informationen und Daten, die ein Umgebungsmodell beinhaltet, werden in der Literatur zumindest zwei korrelierende Teilmodelle genannt: Das **Logik-** und das **Graphikmodell** (Bild 2-9), die in den folgenden Abschnitten detailliert werden. Abweichungen zwischen diesen Teilmodellen führen zu Differenzen zwischen der eigentlichen Fahrsimulation und der entsprechenden Visualisierung [Car01, S. 69f.], [Kau03, S. 8f.], [DG06, S. 27], [EFG+03, S. 3], [CTH+10, S. 211ff.], [Ran03, S. 141], [DB11, S. 434ff.].

²¹ Der Begriff Dynamik steht in diesem Zusammenhang für die zeitliche Veränderung des Umgebungsmodells.

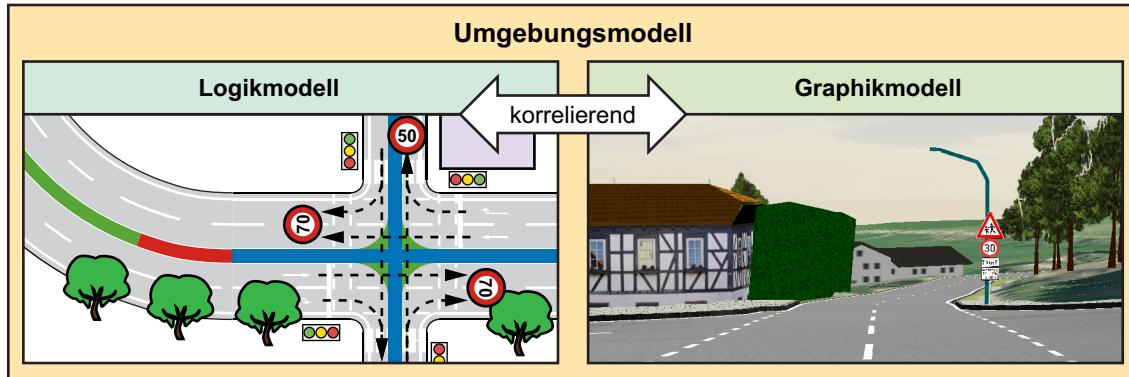


Bild 2-9: Struktur des Umgebungsmodells für interaktive Fahrsimulationen: Das Umgebungsmodell setzt sich aus zwei korrelierenden Teilmodellen (Logik- und Graphikmodell) zusammen.

2.3.2.1 Logikmodell

Das Logikmodell kapselt die nicht sichtbaren Elemente des Verkehrsnetzes und dessen näherer Umgebung. DRESIA, BILDSTEIN und RANDT sprechen in diesem Zusammenhang von Steuerdaten [Ran03, S. 141], [DB06b, S. 161ff.]. Diese sind zum Betrieb mehrerer Komponenten der Fahrsimulation notwendig. So werden bspw. mathematische Funktionen, welche die Straßengeometrie repräsentieren, an das Fahrdynamikmodell übermittelt. Das Logikmodell beinhaltet topologische, geometrische, logische und physikalische Aspekte. Es ist essentiell zum Betrieb eines Fahrsimulators; es ist die Grundlage der eigentlichen Simulation (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Die Bestandteile des Logikmodells variieren, insbesondere bei den frühen Grundlagenarbeiten (vgl. Kapitel 3.1). Mit zunehmender Verbreitung von Fahrsimulationssystemen wurde jedoch die Notwendigkeit einheitlicher Repräsentationsformen erkannt. Die folgende Darstellung der Bestandteile und Repräsentationsformen für das Logikmodell stützt sich auf die Austauschformate OpenDRIVE [DG06], [ODR10, S. 23f.] und RoadXML [CTH+10, S. 211ff.], [RXM11, S. 6ff.]. Diese gelten gegenwärtig als De-Facto Standards zur Beschreibung des Logikmodells für Fahrsimulationen [BJG+10, S. 139], [DSG10, S. 233]. Ferner orientieren sie sich an Richtlinien zur Anlage realer Straßen (bspw. [RAL95], [RAS06], [RAA08]), um virtuelle Straßen realitätsnah nachbilden zu können. Bild 2-10 zeigt die wesentlichen Bestandteile in der Übersicht.

Das Verkehrsnetz wird vollständig durch die Elemente Strecke (einzelne Straßen) und Knotenpunkt (Kreuzungen, Einmündungen und weitere Verkehrsknoten) gebildet. Knotenpunkte verknüpfen dabei zwei oder mehr Strecken. Die **Topologie** des Verkehrsnetzes ist daher als **Graph** repräsentiert, mit Strecken als Kanten und Knotenpunkten als Knoten.

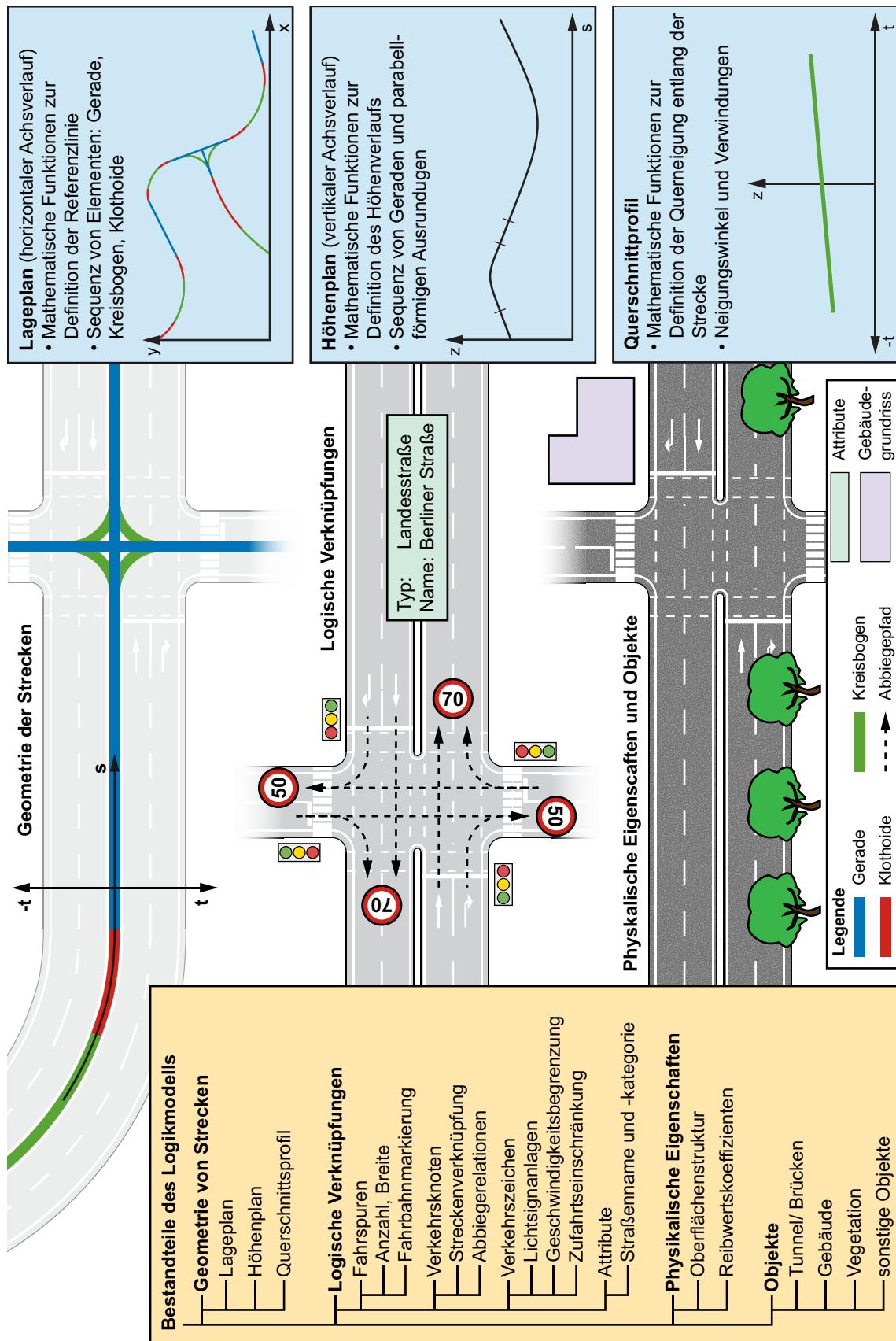


Bild 2-10: Bestandteile des Logikmodells in der Übersicht; die Bildmitte zeigt exemplarisch verschiedene Sichten auf einen Ausschnitt eines Verkehrsnetzes.

Die **Geometrie von Strecken** wird analytisch beschrieben; dabei werden mathematische Funktionen verwendet, die auch zur Trassenplanung im modernen Straßenbau eingesetzt werden [Kau03, S. 16], [Ran03, S. 139], [Car01, S. 18f.]. Die vollständige Geometrie wird durch den Achsverlauf²² sowie das Querschnittprofil definiert und durch folgende Repräsentationsformen festgelegt:

- **Lageplan:** Dieser beschreibt den horizontalen Achsverlauf (x - y -Ebene) einzelner Verkehrswege. Dafür wird eine gerichtete, stetige Sequenz der geometrischen Primitive Gerade (keine Krümmung), Kreisbögen (konstante Krümmung) und Klothoide²³ (lineare Veränderung der Krümmung) verwendet. Klothoiden dienen dabei als Übergangsbogen zwischen Geraden und Kreisbögen; die lineare Veränderung der Krümmung ermöglicht dabei eine ruckfreie Fahrdynamik in Kurven [RAA08, S. 27ff.], [RAL95, S. 14ff.], [RAS06, S. 76].
- **Höhenplan:** Der Höhenplan beschreibt den vertikalen Achsverlauf. Er ordnet jedem Punkt entlang des horizontalen Achsverlaufs eine Höhe zu. Damit wird ein Höhenprofil in der s - z -Ebene definiert, das durch eine gerichtete, stetige Sequenz von Segmenten konstanter Steigung bzw. konstantem Gefälle (Geraden) und Ausrundungen (Polygone dritten Grades) beschrieben wird [RAA08, S. 29ff.], [RAL95, S. 18ff.], [RAS06, S. 76].
- **Querschnittprofil:** Dieses legt die Querneigung der Straße fest. Querneigungen werden zur Entwässerung (in der Geraden) und aus fahrdynamischen Gründen (in Kurven) verbaut. Sie werden in der t - z -Ebene als Neigungswinkel definiert, wobei t orthogonal zur Richtung der Referenzlinie ist. Änderungen der Fahrbahnquerneigung werden mittels Verwindung entlang der Übergangsbögen vollzogen [RAA08, S. 38ff.], [RAL95, S. 27ff.].

Einzelne Strecken werden mit Hilfe von Identifikatoren **logisch miteinander verknüpft** um das Verkehrsnetz zu bilden; gleichzeitig sind damit auch topologische Beziehungen festgelegt. Durch weitere logische Verknüpfungen werden entlang einzelner Strecken Fahrstreifen, Verkehrszeichen und Attribute definiert. Fahrstreifen werden dabei durch die Anzahl je Fahrrichtung, die jeweilige Breite und die zugehörige Fahrbahnmarkierung definiert. Verkehrszeichen sind Lichtsignalanlagen und Verkehrsschilder, welche bspw. die Höchstgeschwindigkeit oder Fahrverbote für Fahrzeugklassen vorschreiben. Attribute sind bspw. die Kategorie oder der Name einer Straße. Logische Verknüpfungen legen außerdem die Abbiegerelationen an Knotenpunkten fest: Einzelne

²² Die Achse ist ein Fachbegriff des Verkehrswesens; sie beschreibt eine mathematisch definierte Referenzlinie für den Verlauf von Verkehrswegen. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Begriffe Achse und Referenzlinie synonym verwendet.

²³ Klothoiden werden nach Marie Alfred Cornu auch als Cornu-Spiralen bezeichnet.

Fahrstreifen der eingehenden Strecken eines Knotenpunkts werden dazu logisch miteinander verbunden, wenn ein Abbiegen von einer auf die andere Fahrspur erlaubt ist.

Die **physikalischen Eigenschaften** sind auf Reibungskoeffizienten und die Körnung der Fahrbahnoberfläche begrenzt. Sie werden als Attribute entlang einzelner Strecken bzw. Fahrstreifen definiert. Dabei gilt ein spezifischer Reibungskoeffizient für die gesamte Breite einer Fahrspur²⁴.

Das Logikmodell bietet ferner die Voraussetzung weitere **Objekte** entlang der Strecken zu platzieren. Dies sind bspw. Gebäude, Vegetation, Brücken oder Tunnel, die als mathematische Funktionen etwa einen extrudierten Grundriss abbilden.

2.3.2.2 Graphikmodell

Die sichtbaren Bestandteile des Umgebungsmodells sind im Graphikmodell abgebildet. Es ist Voraussetzung für die **computergraphische Darstellung** der Umgebung auf einer Bildebene, etwa einem Bildschirm oder einer Projektionsfläche. Damit ist das Graphikmodell Grundlage einer visuellen Rückmeldung des Simulationsgeschehens an den Benutzer der interaktiven Fahrsimulation [GEK01, S. 387f.].

Das Graphikmodell beschreibt korrelierend zum Logikmodell, bspw. die Straßen, Kreuzungen oder Verkehrsschilder. Darüber hinaus beinhaltet es zusätzlich die Landschaft in der näheren Umgebung der Straße sowie Dekorationsobjekte wie Bäume, Sträucher oder Tiere auf Weideflächen. Diese sind für die eigentliche Fahrsimulation weitgehend irrelevant, für den Benutzer der interaktiven Fahrsimulation jedoch von hoher Bedeutung: Sie steigern den Realitätsgrad der Darstellung und helfen bei der räumlichen Wahrnehmung und dem Geschwindigkeitsempfinden.

Die einzelnen Objekte des Graphikmodells sind als **3D-Facettenmodelle** beschrieben, welche die Geometrie von Objekten durch eine Vielzahl dreiseitiger Polygone approximieren. Deren Lage im Raum wird durch ein Bezugskoordinatensystem und Transformationen (Translation und Rotation) eindeutig festgelegt. Darauf aufbauend wird das Aussehen von Objekten maßgeblich durch Texturen festgelegt. Dies sind Bilddaten, die einzelnen Polygonen oder Polygongruppen zugewiesen werden, um Details der Oberflächen zu visualisieren (Bild 2-11, links) [GEK01, S. 388].

²⁴ Moderne Verfahren erlauben hochgenaue Messungen physischer Eigenschaften realer Strecken mit einer Auflösung im Bereich eines Zentimeters. Die Messungen können indes nur mit einem Fahrzeug mit komplexer Messvorrichtung durchgeführt werden [RM08, S. 55ff.]. Daher wird in dieser Arbeit auf derartige Messdaten verzichtet, obgleich sie in das Logikmodell integriert werden könnten, in dem die entstehende Matrix aus Messdaten entlang der Strecke platziert wird [ODR10, S. 62ff.].

Das Graphikmodell setzt sich insgesamt aus mehreren texturierten 3D-Facettenmodellen (3D-Modellen²⁵) zusammen. Diese Einzelmodelle beschreiben bspw. die Landschaft, die Straße zwischen zwei Verkehrsknoten, ein einzelnes Verkehrsschild oder ein Gebäude. Die Gesamtheit der darzustellenden Objekte wird als **Szene** bezeichnet [GEK01, S. 387].

Das vollständige Graphikmodell ist eine komplexe Szene, deren einzelne Objekte bereits aus mehreren Millionen Polygonen bestehen und mit hochauflösten Texturen versehen sein können. Zum effizienten Rendering des Graphikmodells wurde daher eine Datenstruktur eingeführt, die als **Szenengraph** bezeichnet wird. Dieser organisiert die Szene, deren Objekte und Transformationen hierarchisch in einem azyklischen Baum (Bild 2-11, rechts) [GEK01, S. 396], [AH02, S. 355ff.].

Der Szenengraph ist Ausgangspunkt für die Anwendung von Verfahren zur Komplexitätsreduktion (vgl. [GEK01, S. 397ff.]). Relevant für das Graphikmodell ist dabei das **Level of Detail**-Verfahren, da es unterschiedliche Detaillierungsgrade der 3D-Modelle eines Objekts voraussetzt, die als Alternativen im Szenengraph hinterlegt werden. Zur Laufzeit wird in Abhängigkeit der Entfernung zum Betrachter der optimale Detaillierungsgrad ausgewählt: Ist das Objekt unmittelbar vor dem Betrachter wird ein hochdetailliertes 3D-Modell dargestellt, ist es weit vom Betrachter entfernt wird ein entsprechendes 3D-Modell mit wenig Details visualisiert.

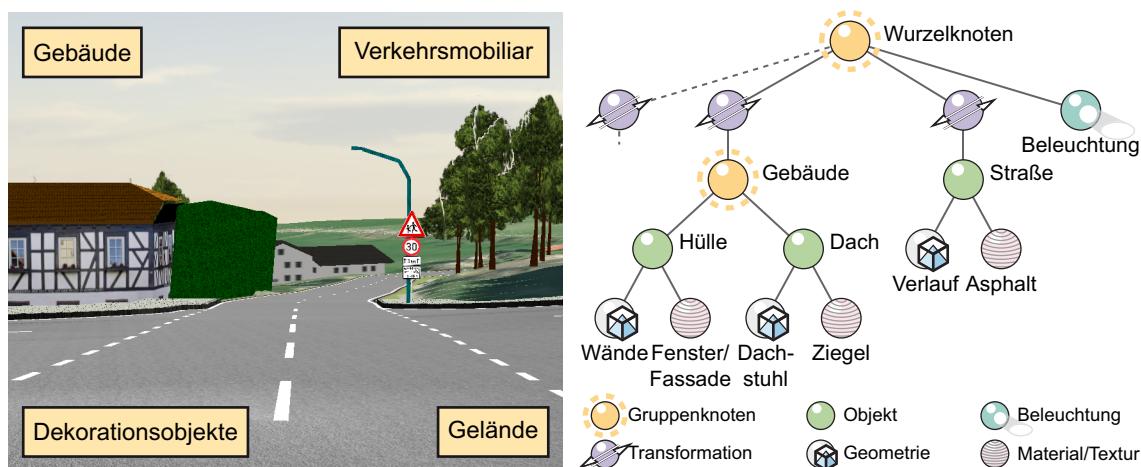


Bild 2-11: Bestandteile des Graphikmodells; links: Texturierte 3D-Facettenmodelle einer Szene; rechts: Entsprechender Szenengraph (Ausschnitt) mit hierarchisch organisierten Einzelmodellen nach [GEK01, S. 397].

²⁵ Zwar beschreibt Begriff 3D-Modell selbstredend auch weitere Teilmodelle, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden, bspw. die Beschreibung der Straßengeometrie im Logikmodell. Wenn nicht anders gekennzeichnet sind damit im weiteren Verlauf jedoch die texturierten 3D-Facettenmodelle des Graphikmodells gemeint.

2.3.2.3 Abhängigkeiten des Logik- und Graphikmodells zur Laufzeit

Das Umgebungsmodell ist eine zentrale Komponente der Fahrsimulation: Zur Laufzeit greifen mehrere Komponenten der Fahrsimulation (vgl. Abschnitt 2.3.1) auf Daten des Logik- bzw. des Graphikmodells zu. Bild 2-12 zeigt exemplarisch wesentliche Abhängigkeiten in Form von Datenflüssen.

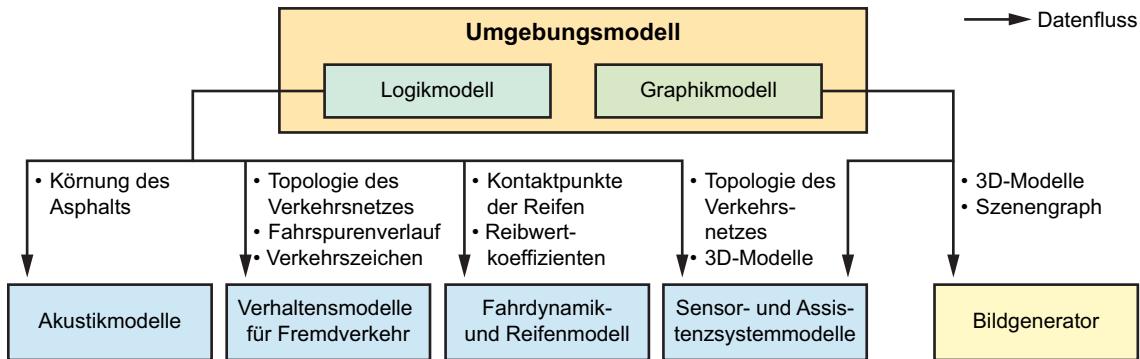


Bild 2-12: Laufzeitzugriffe einzelner Komponenten der Fahrsimulation auf Daten des Logik- bzw. Graphikmodells.

Das Logikmodell liefert ausschließlich Daten an weitere Simulationsmodelle. Dabei ist z.B. die mathematisch beschriebene Geometrie der Streckenverläufe Voraussetzung für die korrekte Berechnung von Kontaktpunkten einzelner Reifen; damit ist das Logikmodell gleichzeitig Grundlage der Berechnung einer realistischen Fahrdynamik. Darüber hinaus ist das Verhalten des Fremdverkehrs abhängig von Kenntnissen der Topologie des Verkehrsnetzes, des Verlaufs von Fahrstreifen sowie zugeordneter Verkehrszeichen. Auch Akustik-, Sensor- und Assistenzsystemmodelle greifen auf Daten des Logikmodells zu. So hat bspw. die Körnung des Asphalt Einfluss auf die Geräuschgenerierung.

Das Graphikmodell liefert 3D-Modelle und den entsprechenden Szenengraphen an den Bildgenerator. Darüber hinaus werden Facettenmodelle einzelner Objekte vereinzelt für spezielle Sensormodelle eingesetzt, bspw. Radarsensoren mit großer Reichweite.

Diese Beispiele und weitere Arbeiten (bspw. [Car01, S. 67f.], [DG06, S. 27f.], [GBC+98, S. 51f.]) bestätigen: Das Graphikmodell dient in erster Linie zur Darstellung der Umgebung. Das Logikmodell hat hingegen starke Abhängigkeiten mit weiteren Simulationsmodellen und ist damit ein wesentlicher Bestandteil der eigentlichen Fahrsimulation.

2.3.3 Umgebungsmodelle für die Entwicklung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme

Umgebungsmodelle, die zur Erprobung Virtueller Prototypen von Fahrzeugen oder Fahrzeugsystemen im Fahrsimulator eingesetzt werden, bestehen aus Logik- und Graphikmodell mit den jeweiligen Bestandteilen (vgl. Abschnitte 2.3.2.1 und 2.3.2.2). Dar-

über hinaus sind geospezifische Umgebungsmodelle wünschenswert: Erst durch die realitätsgerechte Abbildung der realen Versuchsstrecken lassen sich Simulationsergebnisse und die Ergebnisse realer Erprobungsfahrten vergleichen [TVG+08, S. 95], [DWM+08, S. 109f.], [ASK+03, S. 250ff.], [KLB+10]. Mit der absehbaren Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen, die ortsbezogene Daten in den Entscheidungsprozess einbeziehen (vgl. Abschnitt 2.2.2) werden geospezifische Umgebungsmodelle weiter an Bedeutung gewinnen, zumal diese weitere Vorteile bergen: So lassen sich Lokalisierungsdaten aus dem Umgebungsmodell bspw. zur Simulation GPS²⁶-basierter Fahrerassistenzsysteme einsetzen [BGG+08]. Die unvermeidbaren Abweichungen zwischen Umgebungsmodell und realer Umgebung sollten allerdings in der Toleranz eines Meters liegen²⁷.

Die effiziente Bildung derartiger Umgebungsmodelle ist das Handlungsfeld der vorliegenden Arbeit. Bild 2-13 zeigt die wesentliche Aufgabe: Durch die systematische Integration von Quelldaten werden reale Umgebungen in die zwei konsistenten Teilmodelle des Umgebungsmodells überführt. Die Quelldaten repräsentieren dabei Aspekte der Realität; so liefern bspw. Bildmedien wie Videos und Fotos Informationen über die Umgebung. Geodaten aus Geo-Informationssystemen bieten einen ebenso hohen Informationsgehalt und gleichzeitig ein hohes Potential zur automatisierten Verarbeitung (vgl. Kapitel 2.4). Schließlich werden auch bestehende 3D-Modelle, die spezifische, real existierende Objekte abbilden in das Umgebungsmodell integriert.

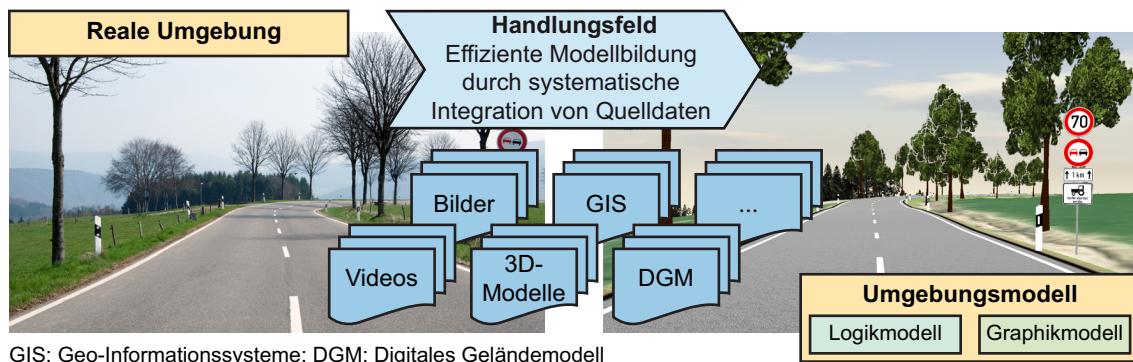


Bild 2-13: Handlungsfeld der vorliegenden Arbeit: Effiziente Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulation durch systematische Integration von Quelldaten.

²⁶ Das Global Positioning System (GPS) ist ein globales Navigationssatellitensystem. Es wird zur Positionsbestimmung auf der Erde eingesetzt.

²⁷ Auskunft des für die Entwicklung prädiktiver Scheinwerferregelungen zuständigen Mitarbeiters eines Unternehmens der Automobilzulieferindustrie.

2.4 Geo-Informationssysteme

Zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle sind Quelldaten erforderlich, die Aspekte realer Umgebungen beschreiben. Dieser Abschnitt beschreibt daher Begriffe, Grundlagen und Zusammenhänge im Bereich **Geo-Informationssysteme²⁸** (**GIS**), die für das Verständnis der weiteren Arbeit notwendig sind. Nach LONGLEY et al. wurde der Begriff Geo-Informationssystem 1963 von R. F. TOMLINSON eingeführt [LGM+11, S. 19]. Anlass war der Entwicklungsbeginn des *Canada Geographic Information System*, das als erstes Geo-Informationssystem zur Inventarisierung der Landnutzung in Kanada eingesetzt wurde [Tom67]. Überblicke zur weiteren historischen Entwicklung von Geo-Informationssystemen sind beispielsweise in [DZ01, S. 23ff.] oder [LGM+11, S. 17ff.] zu finden.

Geo-Informationssysteme sind im Allgemeinen *raumbezogene, digitale Informationssysteme* [Lan06, S. 320], die auf einen Datenbestand zugreifen können und Auswertungen dieser (raumbezogenen) Daten ermöglichen. In der Literatur existieren Definitionen des Begriffs Geo-Informationssystem, die sich lediglich geringfügig unterscheiden (bspw. [Goo93, S. 8], [Bar05, S. 15], [LGM+11, S. 13]). Dazu gehört auch die in der deutschsprachigen Literatur etablierte Definition von R. BILL²⁹:

„Ein Geo-Informationssystem (GIS) ist ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software und Daten besteht und mit dem sich raumbezogene Problemstellungen in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen modellieren und bearbeiten lassen. Die dafür benötigten raumbezogenen Daten/ Informationen können digital erfasst und redigiert, verwaltet und reorganisiert, analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden. GIS bezeichnet sowohl eine Technologie, Produkte als auch Vorhaben zur Bereitstellung und Behandlung von Geoinformation.“ [Bil10, S. 8]

Die Anwendungsbereiche von GIS wurden in den vergangenen Jahren kontinuierlich erweitert – derartige Systeme können prinzipiell überall eingesetzt werden, wo Daten durch einen gemeinsamen Raumbezug verknüpft sind [LGM+11, S. 45ff.]. Die Gesamtheit gegenwärtiger Anwendungsbereiche aufzulisten ist zwar nahezu ausgeschlossen, technische Simulationen gehören jedoch zweifellos dazu; ROßMANN et al. zeigen beispielsweise eine Reihe derartiger georeferenzierter Simulationsanwendungen

²⁸ Die Ausführungen in diesem Abschnitt basieren zum Teil auf der von mir betreuten studentischen Arbeit „Analyse und Bewertung bestehender Geo-Informationssysteme als Datenbasis für die Entwicklung von Umgebungsmodellen“ von cand. Dipl.-Wirt.-Ing. Vitalij Janzen.

²⁹ Etabliert ist die ursprüngliche Definition von BILL und FRITSCH aus der ersten Buchausgabe [BF91]. In dieser Arbeit wird die aktuellere Begriffsdefinition verwendet, weil sie weitgreifender ist und gegenwärtige Entwicklungen berücksichtigt.

[RSH+10]. Es existiert eine unüberschaubare Menge an Softwaresystemen, die raumbezogene Daten verarbeiten. BILL gibt einen umfassenden Überblick über Klassen von GIS und deren Anwendungsgebiete [Bil10, S. 603ff.]; für die vorliegende Arbeit sind dabei folgende Systemklassen relevant:

- **Landinformationssysteme** werden im Vermessungs- und Katasterbereich eingesetzt. Sie verwalten Objekte des Liegenschaftskatasters, bspw. Flurstücke, Gebäude, Eigentümerdaten sowie topographische Objekte wie Höhenlinien, Verkehrswägen oder Siedlungen. In der Bundesrepublik Deutschland sind gegenwärtig zwei flächendeckende Landinformationssysteme im Aufbau: Das Amtliche Liegenschaftskataster Informationssystem (ALKIS) und das Amtliche Topographische-Kartographische Informationssystem (ATKIS). Diese Landinformationssysteme sind als Basissysteme für weitere GIS zu betrachten; ihre Geobasisdaten (vgl. Abschnitt 2.4.2.4) stehen zur Verfügung [Bil10, S. 606ff.].
- **Fachinformationssysteme** werden für Anwendungen mit speziellem Fachbezug eingesetzt, bspw. im Tourismus zur Bereitstellung von Reiseinformationen oder in der Telekommunikation zur Funknetzplanung. Ein populäres Beispiel für heutige weit verbreitete Fachinformationssysteme im Transportwesen sind Navigationssysteme: Sie planen den optimalen Weg und stellen dem Fahrer Informationen zur Wegführung und Position bereit [Bil10, S. 670ff.].

2.4.1 GIS-Komponenten und -Architekturen

Gemäß der Definition von BILL lassen sich die wesentlichen Charakteristika von GIS in **Vierkomponentenmodellen** abbilden; diese beschreiben den Aufbau eines GIS. Dabei werden strukturelle Aspekte und Aufgaben unterschieden und in jeweils vier Einheiten abgebildet [Lan06, S. 320], [Bil10, S. 35ff.]. Bild 2-14 zeigt den schematischen Aufbau eines Geo-Informationssystems.

Die (physischen) Bestandteile des GIS werden von vier strukturellen Komponenten abgebildet. Die **Hardware** besteht dabei aus Vermessungsgeräten, Computersystemen, Speichermedien, Peripheriegeräten und deren Vernetzung. Darüber hinaus bietet die Hardware die Benutzungsschnittstelle zum Anwender. Die **Software** besteht aus funktionalen Komponenten und Einzelanwendungen, die es dem Anwender ermöglichen, die wesentlichen Aufgaben eines GIS zu bearbeiten. **Daten** sind der wichtigste Bestandteil eines GIS; sie definieren Geoobjekte in den Aspekten Geometrie, Topologie, Thematik und Dynamik (vgl. Abschnitt 2.4.2). Die **Anwender** eines GIS richten aufgabenspezifische Fragestellungen an das System [Lan06, S. 320], [Bil10, S. 35ff.].

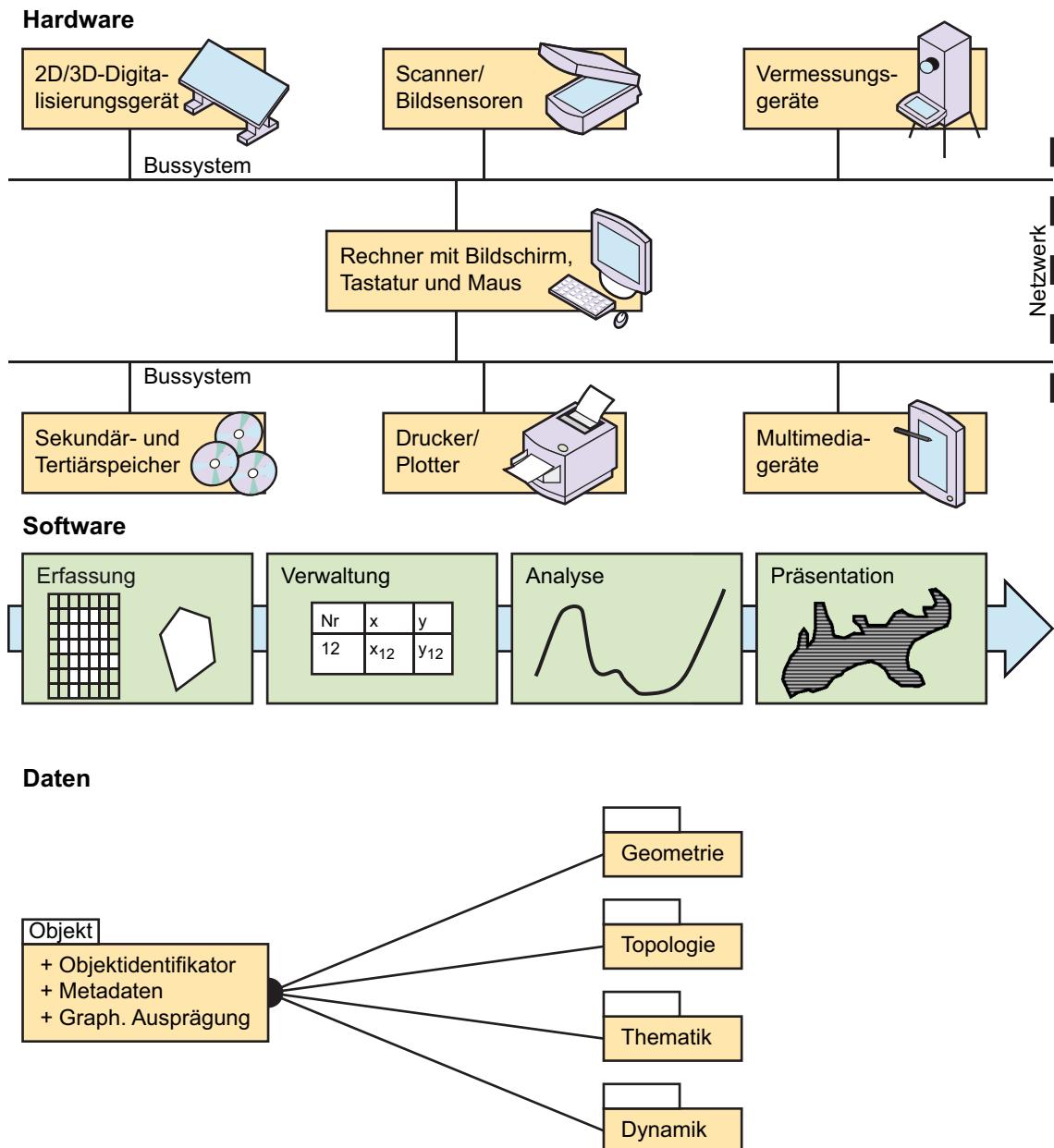


Bild 2-14: Komponenten eines Geo-Informationssystems nach [Bil10, S. 37].

Die funktionalen Komponenten ermöglichen die Bearbeitung der Aufgaben eines GIS. Unter **Erfassung** werden Methoden zur Erhebung von Geodaten verstanden; dies umfasst beispielsweise Techniken aus dem Vermessungswesen oder der Fernerkundung. Die **Verwaltung** leistet das Datenmanagement; im Zentrum stehen dabei die Erarbeitung geeigneter Datenstrukturen und deren Abbildung in einem Geodatenbanksystem³⁰

³⁰ Geodatenbanksysteme (engl. *Spatial Database Systems*) verwalten Geodaten und ermöglichen die effiziente Bearbeitung räumlicher Anfragen. Objektrationale Datenbanken mit räumlichen Erweiterungen bieten heute diese Funktionalität [Bil10, S.435], [Bri08].

(vgl. [Bri08]). Die **Analyse** dient dem Informationsgewinn; die eingesetzten Methoden basieren auf geometrischen, logischen oder relationalen Verknüpfungen der Daten sowie statistischen Auswertungen. Die **Präsentation** visualisiert die Analyseergebnisse mit Hilfe von Methoden der Kartographie und der Computergraphik [Lan06, S. 320], [Bil10, S. 35ff.]. Geo-Informationssysteme müssen nicht zwangsläufig sämtliche Funktionen aufweisen. So gelten Systeme die lediglich einzelne dieser Funktionen bereitstellen ebenso als GIS [Bar05, S. 22].

Geo-Informationssysteme befinden sich im näheren Umfeld zu klassischen Datenbank-, CAD- und Kartiersystemen. Es existieren jedoch Unterschiede [Cow88]: CAD- und Kartiersysteme verwalten in der Regel keine Geoobjekte und besitzen nur eingeschränkte Analysefunktionen [Lan06, S. 325f.]. Die Grenzen verschwinden dabei allerdings zunehmend; Software-Werkzeuge zur Kartierung sind beispielsweise häufig ein Bestandteil von Geo-Informationssystemen [Bil10, S. 42ff.].

Durch den Fortschritt der Informations- und Kommunikationstechnik sind Geo-Informationssysteme heute **verteilte Systeme** [Bil10, S. 139ff.], [Dic04, S. 24ff.], [KZ08, S. 35ff.]. BENGEL charakterisiert verteilte Systeme *durch eine Menge von Funktionseinheiten und Komponenten, die in einer Beziehung zueinander stehen (Client-Server-Beziehung)* [Ben04, S. 17]. Geo-Informationssysteme basieren in der Regel auf Client-Server Architekturen, die über Netzwerke miteinander kommunizieren. Die Bestandteile und Aufgaben des GIS müssen dabei auf die Ressourcen des Client- bzw. Serverrechners verteilt werden. Wird diese Verteilung lediglich zwischen einem Client und einem Server vorgenommen, ist es eine Zwei-Schichten-Architektur (engl. *two-tier-architecture*) [KZ08, S. 35ff.]. Zur Erhöhung der Skalierbarkeit von Servern werden mehrschichtige Architekturen eingesetzt. Die Aufteilung einzelner Aufgaben erfolgt dabei auf mehrere Server. Die im GIS-Umfeld sehr verbreitete Drei-Schichten-Architektur (engl. *three-tier-architecture*) gliedert das verteilte System beispielsweise in mehrere Clients, einen Applikationsserver sowie einen oder mehrere Datenbankserver [KZ08, S. 37].

Mehrschichtige Architekturen ermöglichen den Aufbau komplexer verteilter GIS, die Geodaten und dazugehörige Dienste bereitstellen. So können bspw. verschiedene Clients auf unterschiedlichen Plattformen (Rechner, mobile Endgeräte u.a.) über ein plattformunabhängiges, internetbasiertes **Geoportal** auf unterschiedliche Datenbankserver zugreifen. Geoportale bieten einen komfortablen Zugriff auf eine Vielzahl von Geodatenbeständen (vgl. Abschnitt 2.4.2.3). Die Clients bieten dabei eine graphische Benutzeroberfläche und ermöglichen Such-, Bearbeitungs- und Darstellungsfunktionen; sie stellen Anfragen an das Geoportal. Dieses wird auf dem Applikationsserver ausgeführt und erfüllt vorrangig Vermittlungsfunktionen zu den einzelnen Datenbankservern, die wiederum Geodaten verwalten, bereitstellen und ggf. anfallende Gebühren in Rechnung stellen [Bil10, S. 143ff.].

2.4.2 Geodaten

Der wichtigste Bestandteil von Geo-Informationssystemen sind Daten [Bil10, S. 263], [Bar05, S. 22]. Diese Daten besitzen einen räumlichen Bezug zur Erde – sie sind **georeferenziert**. In der Literatur werden in diesem Zusammenhang die Begriffe Geoobjekt, Geoinformation und Geodaten³¹ unterschieden:

Geoobjekte beschreiben reale Objekte mit Raumbezug, bspw. Grenzsteine (punktformig), Fließgewässer (linienförmig), Flurstücke (flächenförmig) oder Grundwasserkörper (als Körper). Geoobjekte *sind räumliche Elemente, die zusätzlich zu Sachinformationen geometrische und topologische Eigenschaften besitzen und zeitlichen Veränderungen unterliegen können* [Lan06, S. 159]. Sie beruhen auf den Konzepten der objektorientierten Modellierung³². Ein spezifisches Geoobjekt besitzt eine eindeutige Identität und bildet ein konkretes reales Objekt ab; es kapselt Informationen über dessen Geometrie, Topologie, Thematik und zeitliche Veränderung³³. Diese **Geoinformationen** werden durch **Geodaten**³⁴ beschrieben [Bil10, S. 19ff.], [Lan06, S. 197ff.]. Geodaten sind *Daten über Gegenstände, Geländeformen und Infrastrukturen an der Erdoberfläche, wobei als wesentliches Element ein Raumbezug vorliegen muss* [Bil10, S. 263]. Der gemeinsame Raumbezug ist Grundlage der Verknüpfung einzelner Geodaten mit dem Ziel, neue Informationen abzuleiten [Bil10, S. 263ff.].

Im Folgenden werden wesentliche Eigenschaften von Geodaten beschrieben. Auf den Bereich der Datenerfassung wurde dabei verzichtet; Einführungen in die Methoden und Werkzeuge zur Datenerfassung und die entsprechende Unterscheidung von Primär- und Sekundärdaten sind bspw. in [Bil10, S. 263ff.] oder [Lan06, S. 365ff.] zu finden. Für die vorliegende Arbeit wird davon ausgegangen, dass die zur effizienten Bildung von Umgebungsmodellen empfohlenen Geodaten (vgl. Abschnitt 2.4.3) verfügbar sind.

³¹ Die Begriffe Geodaten und GIS-Daten werden in der Literatur synonym verwendet. In dieser Arbeit wird durchgängig der Begriff Geodaten verwendet.

³² Die objektorientierte Modellierung dient zur Analyse und Entwicklung von Softwaresystemen. Zentrale Elemente sind dabei Objekte, die hinsichtlich Struktur und Verhalten beschrieben werden, bspw. durch Diagramme der Unified Modeling Language (UML) [UML11].

³³ Die zeitliche Veränderung von Geodaten ist für diese Arbeit nicht relevant: Geodaten für Umgebungsmodelle sollten so aktuell wie möglich sein, um den gegenwärtigen Zustand der Umgebung zu repräsentieren. Die zeitliche Veränderung von Geodaten wird daher nicht weiter betrachtet.

³⁴ Zum Unterschied zwischen Daten und Informationen vgl. [Bar05, S. 13ff.], [Bil10, S.2ff.] oder [GPW09, S.31f.]. Vereinfacht ausgedrückt ergeben sich Informationen aus der Interpretation von Daten. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden vorrangig die zugrundeliegenden Daten behandelt.

2.4.2.1 Raumbezug und Koordinatenreferenzsysteme

Der Raumbezug ist das fundamentale Bezugselement und Unterscheidungsmerkmal von Geodaten. Zur eindeutigen Festlegung eines Lagepunkts (mittels Koordinaten) auf der Erde werden folgende **fundamentale räumliche Bezugssysteme** (vgl. Bild 2-15) eingesetzt:

- **Ellipsoid:** Die Figur der Erdoberfläche wird mathematisch-geometrisch durch einen (Rotations-)Ellipsoid angenähert, der durch Rotation der Meridianellipse³⁵ um die Erdrotationsachse entsteht. Die Meridianellipse ist durch zwei Parameter (die Längen der Halbachsen) vollständig bestimmt [Bil10, S. 160], [Lan06, S. 182].
- **Geoid:** Eine genaue Positionsbestimmung ist allein durch das Ellipsoid nicht möglich; die Erde ist uneben. Das Geoid ist eine idealisierte physikalische Erstzfläche der Erdoberfläche; es beinhaltet in all seinen Punkten ein Höhenniveau relativ zur mittleren Meeresoberfläche. Das Geoid wird daher zur Höhenbestimmung eingesetzt [Bil10, S. 162f.], [Lan06, S. 188f.].
- **Koordinatensystem:** Koordinatensysteme beschreiben mathematische Regeln, die festlegen, wie Koordinaten Punkte zugeordnet werden [ISO19111, S. 7]. Kartesische und sphärische Koordinatensysteme mit euklidischer Metrik besitzen eine zentrale Bedeutung für Geodaten [Bil10, S. 174ff.], [Lan06, S. 167ff.].

Ein **geodätisches Koordinatenreferenzsystem** definiert die Parameterwerte für das Ellipsoid, legt das verwendete Geoid, ein Koordinatensystem sowie ein Datum fest³⁶. Das Datum spezifiziert dabei die Beziehung des Koordinatensystems zum Ellipsoiden; dabei wird mehrheitlich ein Nullmeridian auf dem Ellipsoiden definiert und dieser mit einer Achse des Koordinatensystems in Beziehung gesetzt [ISO19111, S. 14], [Bil10, S. 170], [Lan06, S. 183ff.].

Das *World Geodetic System 1984 (WGS'84)* ist ein weitverbreitetes geodätisches Koordinatenreferenzsystem, das bspw. GPS-Koordinaten definiert. Es beinhaltet ein Referenzellipsoid und legt ein kartesisches Koordinatensystem, dessen Orientierung und metrische Koordinatenangaben fest. Ein Lagepunkt auf der Erde wird dabei mittels ellipsoidischer Länge und Breite sowie einer Höhe definiert, die entweder dem Geoid entnommen wird oder als Höhe über dem Ellipsoid angegeben wird (Bild 2-15).

³⁵ Meridiane sind halbe Längenkreise, die auf der Erdoberfläche von einem geographischen Pol zum anderen verlaufen. Breitenkreise verlaufen dementsprechend parallel zum Äquator.

³⁶ Anhang A1.1 listet die Parameter der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten geodätischen Koordinatenreferenzsysteme und gibt für diese exemplarisch Lagekoordinaten einzelner Punkte auf der Erde an.

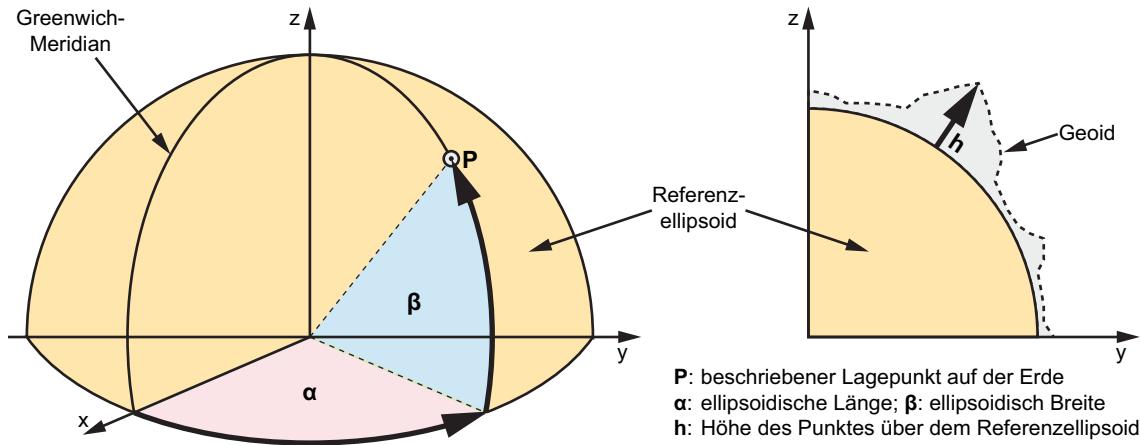


Bild 2-15: Lage von Punkten im WGS'84 Koordinatenreferenzsystem mittels ellipsoidischer Länge und Breite (links); Höhe von Punkten auf der Erdoberfläche mittels Ellipsoid oder Geoid (rechts).

Geodätische Abbildungen sind die Basis der Landvermessung, bei der rechtwinklige, ebene Koordinaten eingesetzt werden, die Längen- und Breitenkreise als quadratisches Gitter abbilden. Eine geodätische Abbildung projiziert dabei die gekrümmte Erdoberfläche in eine ebene Fläche. Eine derartige Abbildung ist niemals gleichzeitig winkel-, längen- und flächentreu; es entstehen immer Verzerrungen. Bild 2-16 (links) zeigt dazu beispielhaft eine Zylinderprojektion: Als Referenzfläche wird dabei ein Zylinder um die Erdachse gelegt. Durch die Projektion werden die Meridiane zu nicht äquidistanten, die Breitenkreise zu äquidistanten Geraden in einem kartesischen Koordinatensystem [Bil10, S. 179ff.], [Lan06, S. 189ff.].

Die Parameter geodätischer Abbildungen wie die verwendete Referenzfläche und dessen Lage bzgl. des Ellipsoids werden ebenfalls in Koordinatenreferenzsystemen zusammengefasst. Die *Universale Transversale Mercatorprojektion (UTM)* (Bild 2-16, rechts) wird heute bspw. durchgängig in der amtlichen Landvermessung eingesetzt. UTM ist eine winkeltreue Zylinderprojektion; sie teilt die Erde in 60 Zonen (Meridianstreifen). Die unvermeidbare Längenverzerrung der UTM beträgt in Deutschland ca. 15 cm auf 1 km. Ein Lagepunkt auf der Erde wird mittels Hochwert (engl. *northing*) und Rechtswert (engl. *easting*) angegeben (vgl. Anhang A1.1) [Bil10, S. 184ff.], [Lan06, S. 195f.].

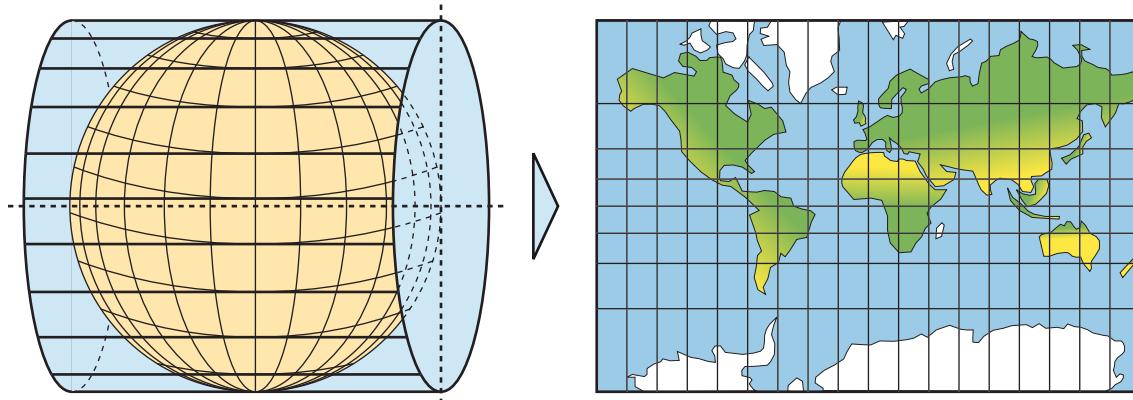


Bild 2-16: Transversale, winkeltreue Zylinderprojektion (links) und entsprechende Mercatorkarte (rechts) nach [Lan06, S. 181].

Geodaten werden grundsätzlich in verschiedenen Koordinatenreferenzsystemen erhoben. Zur integrierten Verarbeitung und Darstellung einzelner Geodatenbestände in einem GIS müssen die Daten in ein gemeinsames Referenzkoordinatensystem überführt werden: Dies erfordert Koordinatenumrechnungen³⁷. Die Parameter der Quell- und Zielkoordinatenreferenzsysteme müssen dafür bekannt sein. Durch den Wechsel von Referenzsystemen entstehen nicht zu verhindern Abweichungen, die schließlich im Zielkoordinatensystem korrigiert werden müssen [Lan06, S. 177ff.], [Bil10, S. 188ff.].

2.4.2.2 Datentypen und -modelle

Zur Definition der Eigenschaften von Geoobjekten werden Geodaten mit folgenden Datentypen bzw. Datenmodellen eingesetzt:

Die **Geometrie** räumlicher Objekte basiert auf der Lage von Punkten auf Basis eines eindeutigen metrischen Bezugskoordinatensystems (vgl. Abschnitt 2.4.2.1). Die Geometrie einzelner Objekte wird durch punkt-, linien- oder flächenhafte Gebilde festgelegt, wobei Linien und Flächen die Folge ihrer charakteristischen Punkte sind. Vektor- oder Rasterdaten beschreiben die Geometrie; Graphikdaten ergänzen ferner Aspekte des Aussehens einzelner Objekte (Bild 2-17) [Bil10, S. 351ff.], [Lan06, S. 160ff.]:

- **Vektordaten** beinhalten Vektoren, die Punkte durch Koordinaten eindeutig bestimmen. Nachbarschaftsbeziehungen legen zudem fest, welche Vektoren eine Linie definieren und welche Linien eine Fläche festlegen. Vektordaten zeichnen sich durch eine hohe geometrische Genauigkeit und geringe Datenmengen aus; sie sind jedoch aufwändiger zu erfassen.

³⁷ Anhang A1.2 beschreibt die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Transformationsverfahren.

- **Rasterdaten** beziehen sich direkt auf Flächen, die mittels Bildelementen (engl. *picture element, Pixel*) abgebildet werden. Rasterdaten beinhalten keine Nachbarschaftsbeziehungen: Punkte, Linien und Flächen sind daher logisch nicht zu unterscheiden. Dies bedingt, dass bspw. die Grenzlinien einzelner Objekte in Bilddaten (bspw. Satellitenfotos) für den menschlichen Betrachter relativ einfach zu identifizieren sind, dies maschinell aber nur schwer zu erreichen ist. Das Konvertieren von Raster- in Vektordaten (Vektorisieren) ist keinesfalls trivial und benötigt trotz ausgefeilter Bildverarbeitungstechniken heute zumeist manuelle Korrekturen [Lan06, S. 204]. Demgegenüber steht die relativ einfache Erfassung von Rasterdaten.
- **Graphikdaten** beschreiben, auf welche Art und Weise spezifische räumliche Objekte auf Ausgabegräten dargestellt werden sollen. Graphikdaten beinhalten Vektor- und Rasterdaten sowie graphische Beschreibungsangaben wie Farbe, Linienstil, Symbol oder Textur [Bil10, S. 32f.].

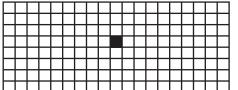
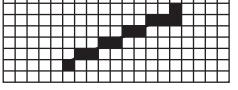
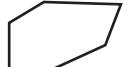
	Vektor		Raster	
	Datentyp	Graphische Repräsentation	Datentyp	Graphische Repräsentation
Punkt	Koordinaten	●	Pixel	
Linie	Koordinatenfolge		Pixel	
Fläche	geschlossene Koordinatenfolge		Pixel	

Bild 2-17: Geoobjekte in Vektor- und Rasterdarstellung sowie Beispiele graphischer Repräsentationen auf Basis von Graphikdaten nach [Bil10, S. 34].

Die **Topologie** legt die räumlichen Beziehungen zwischen Geoobjekten fest, ohne deren geometrische Form zu berücksichtigen. Im Vordergrund stehen dabei Nachbarschaftsbeziehungen. Ein anschauliches Beispiel zur Darstellung derartiger Beziehungen sind Stadtbahnkarten, die lediglich Haltestellen und die verbindenden Linien zeigen; der geometrische Verlauf der Stadtbahntrasse ist irrelevant. Topologische Beziehungen in Geodaten werden daher als **mathematischer Graph** abgebildet [Bil10, S. 370ff.], [Lan06, S. 163f.].

Die **Thematik** wird mittels Sachdaten, thematischen Daten oder **Attributen** beschrieben. Sie repräsentieren sämtliche nicht geometrischen Daten wie Namen, Postleitzahlen, Bewertungsstufen oder Typenbezeichnungen. Attribute werden in Datenbanken vorgehalten, die mehrheitlich auf ein **relationales Datenmodell** gründen, das Daten in Tabellen organisiert [Bil10, S. 389ff.], [Lan06, S. 165].

2.4.2.3 Ebenenprinzip und Harmonisierung

Geoobjekte besitzen eine Thematik; sie repräsentieren ein Objekt der Realität, dem mindestens ein Thema zugeordnet werden kann. Mehrere Geoobjekte kennzeichnen eine gemeinsame Thematik, bspw. Gewässer oder Straßen. Geoobjekte werden letztlich durch Geodaten beschrieben. Daher werden Geodaten gleicher thematischer Bedeutung häufig in Ebenen (engl. *layer*) separiert (Bild 2-18).

Durch Übereinanderlegen einzelner Ebenen wird die Gesamtdarstellung gewonnen, die Daten einzelner Ebenen zusammenführt, um neue Informationen zu gewinnen. Die integrierte Darstellung von Geodaten nach dem Ebenenprinzip ist eine etablierte Standardtechnik moderner Geo-Informationssysteme [Bil10, S. 391ff.], [Lan06, S. 334ff.], [Bar05, S. 57ff.].

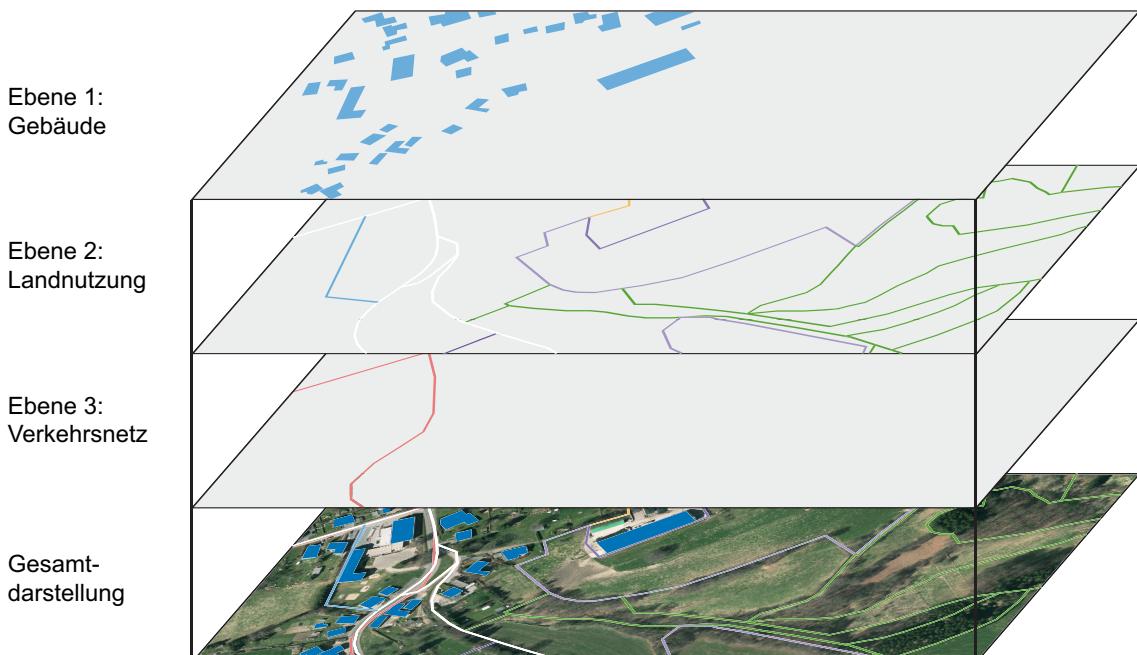


Bild 2-18: Thematische Separation von Geodaten in Ebenen.

Der gemeinsame Raumbezug der Daten ist Grundlage der integrierten Darstellung: Einzelne Ebenen müssen in Metrik, Maßstab und Genauigkeit übereinstimmen. Diese Voraussetzung ist aufgrund der Heterogenität von Geodaten jedoch selten erfüllt, so dass eine Anpassung der Daten erforderlich ist [Bil10, S. 391ff.], [Lan06, S. 334ff.], [Bar05, S. 57ff.]. Sollen heterogene Geodatenbestände gleicher Thematik (bspw. Verkehrsnetze) zu einem umfassenden Datensatz fusioniert werden, so sind geometrisch-topologische Daten sowie Sachdaten zu harmonisieren [Bil10, S. 342].

2.4.2.4 Geobasis- und Geofachdaten

Geodaten werden in Geobasis- und Geofachdaten unterschieden [Bil10, S. 264f.], [Har09, S. 143], [Lan06, S. 255]. **Geobasisdaten** beschreiben die Topographie der

Landschaft sowie die Liegenschaften der Erde. Sie haben keinen direkten Anwendungszweck; sie dienen vielmehr als Grundlage übergeordneter Anwendungen. Geobasisdaten werden vom amtlichen Vermessungswesen im gesetzlichen Auftrag flächendeckend erhoben, aktualisiert, fortgeführt und bereitgestellt. Der Geobasisdatenbestand umfasst dabei die folgenden Daten [Bil10, S. 264], [Lan06, S. 225f.]:

- Das **automatisierte Liegenschaftskataster** beinhaltet grundstückbezogene Daten zu Rechten, Pflichten und Ansprüchen an Grund, Boden und Gebäude (Liegenschaften). Es beschreibt ferner die tatsächliche Nutzungsart für jedes Grundstück sowie dessen Bodenart. Diese Daten sind in der automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) und dem automatisierten Liegenschaftsbuch (ALB) organisiert; das ALK ist dabei der vermessungstechnische, das ALB der beschreibende Teil [Bil10, S. 607ff.], [Lan06, S. 227].
- **Digitale Landschaftsmodelle (DLM)** beschreiben die topographischen Objekte der Landschaft. Einzelnen Objekten werden dabei die räumliche Lage, der geometrische Typ, beschreibende Attribute sowie eine spezifische Objektart aus einem definierten Objektkatalog zugewiesen. Damit wird eine Landnutzungsfläche bspw. als Siedlung oder Wald gekennzeichnet [Bil10, S. 613].
- **Digitale Geländemodelle (DGM)** beinhalten Reliefinformationen der Geländeoberfläche. Dazu werden überwiegend regelmäßig angeordnete Gitterpunkte verwendet, welche die Lage und Höhenstruktur der Geländeoberfläche repräsentieren [Bil10, S. 361], [Lan06, S. 226].
- **Digitale 3D-Stadtmodelle (3DSt)** erweitern das digitale Geländemodell um 3D-Modelle einer Stadt bzw. einzelner Gebäude. Als Standard zur Modellierung der 3D-Modelle etabliert sich zunehmend CityGML [CGM08]; dies ist ein Informationsmodell, das die 3D-Geometrie, 3D-Topologie, Semantik und Erscheinung von Gebäuden beschreibt [Bil10, S. 255ff.].
- **Digitale Orthophotos (DOP)** sind entzerrte und lagerichtige Senkrechtluftbilder (Bild 2-19) [Lan06, S. 226], [Bil10, S. 280].

Geofachdaten sind fachdisziplinspezifische Daten, die einen Raumbezug besitzen. Zu Geofachdaten werden sämtliche Geodaten gezählt, die nicht den Geobasisdaten zuzuordnen sind. Geofachdaten werden in amtlichen Verwaltungen geführt, um bspw. Planungen und Analysen in den Bereichen Infrastruktur, Landwirtschaft oder Naturschutz durchzuführen. Darüber hinaus werden Geofachdaten auch von kommerziellen Organisationen erhoben: Die Unternehmen NAVTEQ, Tele Atlas und Google erfassen und führen bspw. Daten über Straßen, vollständige Verkehrsnetze und verkehrsrelevante Objekte; diese Daten sind Grundlage von Navigationssystemen [Bil10, S. 264f.], [Har09, S. 143].



Bild 2-19: *Digitales Orthophoto (Hintergrund) mit Elementen des digitalen Landschaftsmodells und des digitalen 3D-Stadtmodells.*

2.4.2.5 Quantität, Qualität und Verfügbarkeit

Die Bedeutung von Geodaten ist in den letzten Jahren immens gestiegen. Jedermann ist heute in der Lage, mittels einfacher Hilfsmittel wie dem Mobiltelefon georeferenzierte Daten zu erzeugen und der Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen. In diesem Zusammenhang ist das Projekt OpenStreetMap (OSM) bedeutend; es verfolgt das Ziel einer weltweiten Geodatenerhebung durch eine freiwillige Nutzergemeinde. OSM ist dabei lediglich ein Beispiel für die kontinuierlich steigende **Quantität** von Geodaten [Bil10, S. 258ff.].

Die **Qualität** von Geodaten steigt ebenso kontinuierlich. Positions- und inhaltliche Genauigkeit sowie Vollständigkeit sind dabei entscheidende Kriterien. Technologische Fortschritte in den Erfassungsmethoden erhöhen dabei die Genauigkeit von Daten [Bil10, S. 267ff.]. So erreichen bspw. amtliche digitale Geländemodelle heute flächendeckend eine Höhengenauigkeit von ± 20 cm bei einer Gitterauflösung von 1 m. Bemerkenswert ist die Prognose, dass Geodaten von OpenStreetMap in naher Zukunft den Geodaten kommerzieller Anbieter wie Tele Atlas in Genauigkeit und Vollständigkeit ebenbürtig sein werden [NZZ12, S. 17]. Darüber hinaus werden in absehbarer Zeit auch hochwertige 3D-Modelle einzelner Gebäude vorliegen [ADF+10, S. 36ff.]. Normungen und Datenspezifikationen durch Standardisierungsorganisationen wie ISO oder OGC³⁸

³⁸ ISO: International Organization for Standardization; OGC: Open Geospatial Consortium

steigern ferner die Interoperabilität von Geodaten und damit ebenso die Qualität [Bil10, S. 218ff.], [Bar05, S. 363ff.].

Geodaten sind Grundlage einer Reihe von Anwendungen, die aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken sind, bspw. Navigationssysteme, ortsbezogene Dienste auf mobilen Endgeräten oder Geobrowsersn wie Google Earth [Bil10, S. 17]. Die eingesetzten **Geodaten sind grundsätzlich verfügbar**. Ein komfortabler Zugriff auf Geodaten ist dabei über das Internet und Geoportale schon heute möglich [KZ08, S. 9], [Dic04, S. 112]. Übersichten zu Geoportalen sind in [KZ08, S. 57], [Dic04 S. 115f.] und [Har09, S. 189ff.] zu finden. Geodaten werden dort als Produkte aktiv gehandelt; bestehende Geobasisdaten werden im Rahmen von Dienstleistungen veredelt [LGM+11, S. 26ff.], [Bar05, S. 11], [Har09, S. 143ff.]. Geodaten sind damit ein Wirtschaftsgut, *das bereitgestellt, verwaltet und aktuell gehalten werden muss* [Bil10, S. 231]. Zum Aufbau der dafür notwendigen **Geodateninfrastruktur** existieren nationale und internationale politische Vorhaben, wie die gesetzlich verankerte Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE), welche das europäische Basisvorhaben INSPIRE³⁹ umsetzt. Ein wesentlicher Bestandteil ist dabei ein zentrales Geoportal, das fachübergreifend Geodaten aus Bund, Ländern, und Kommunen vermittelt [Lan06, S. 243]. Dies wird die Verfügbarkeit insbesondere von Geobasisdaten nachhaltig steigern und ferner einen benutzerfreundlichen, komfortablen Zugang ermöglichen.

2.4.3 Identifikation von Geodaten zur Bildung von Umgebungsmodellen

Die kontinuierlich steigende Qualität und Quantität von Geodaten führt zu einem nahezu unüberschaubaren Angebot. Zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle sind zunächst jedoch geeignete Geodaten zu identifizieren, die anschließend systematisch integriert werden. Idealerweise werden dabei sämtliche Aspekte des Umgebungsmodells durch Geodaten beschrieben. Es ist ferner wichtig, dass die Daten flächendeckend⁴⁰ verfügbar sind und die rechtlichen Bedingungen eine kommerzielle bzw. akademische Nutzung erlauben. Dies schränkt die Auswahl potentieller Geodaten zwar erheblich ein⁴¹, garantiert jedoch den praktischen Nutzen der in dieser Arbeit entwickelten Systematik.

³⁹ INSPIRE: Infrastructure for Spatial Information in the European Community

⁴⁰ Die für die vorliegende Arbeit betrachtete Fläche ist das Bundesland Nordrhein-Westfalen. Sämtliche Aussagen über die verwendeten Geodaten, deren Genauigkeit und methodische Verarbeitung gelten jedoch aufgrund gesetzlicher Rahmenbestimmungen ebenso für die gesamte Bundesrepublik Deutschland.

⁴¹ Google verfügt bspw. über ein reichhaltiges Geodatenangebot, deren Nutzung aufgrund unklarer rechtlicher Rahmenbedingungen jedoch erheblich eingeschränkt ist.

Vor diesem Hintergrund werden die folgenden amtlichen **Geobasisdaten** (vgl. Abschnitt 2.4.2.4) genutzt: digitale Landschafts- und Geländemodelle, Orthophotos sowie 3D-Stadtmodelle. Liegenschaftskataster werden nicht verwendet, weil die Einsichtnahme aufgrund personenbezogener Daten nur bei berechtigtem Interesse gestattet ist [Bil10, S. 608]. Amtliche Geobasisdaten sind für jedermann erwerblich und flächendeckend in vergleichsweise hoher Qualität verfügbar.

Die Geobasisdaten werden durch Geofachdaten ergänzt, die gegenwärtig zur Navigation im Verkehrsnetz eingesetzt werden. Diese werden im Folgenden als **Navigationsdaten (NAV)** bezeichnet. Navigationsdaten beinhalten einen Graph, der das Verkehrsnetz abbildet und Attribute, die für die Zielfindung und effektive Navigation relevant sind, bspw. Straßennamen, die Anzahl von Fahrstreifen und Verkehrsregeln; moderne Datensätze beinhalten bis zu 260 verkehrsrelevante Attribute [Lud10, S. 31]. Navigationsdaten werden kommerziell erhoben und vertrieben; in jüngster Vergangenheit bietet das Projekt OpenStreetMap Navigationsdaten ebenso frei an.

Tabelle 2-1 stellt die Bestandteile von Umgebungsmodellen und die identifizierten Geodaten gegenüber. Grundsätzlich wird damit dargestellt, ob die jeweiligen Geodaten Informationen für einen spezifischen Bestandteil des Umgebungsmodells beinhalten. Darüber hinaus werden die Datentypen bzw. -modelle des Umgebungsmodells mit denen der Geodaten verglichen sowie erforderliche Tätigkeiten skizziert die zur Überführung notwendig sind. So beinhalten Navigationsdaten bspw. Informationen über den Lageplan. Diese Information ist jedoch als Linienzug hinterlegt und liegt nicht als gerichtete, stetige Sequenz aus Geraden, Kreisbögen und Klothoiden vor. Schließlich wird auch die Vollständigkeit der Geodaten bewertet. Zwar ist die Oberflächenstruktur prinzipiell ein Attribut der Navigationsdaten, es ist jedoch selten mit konkreten Daten versehen. Grundlage dieser Bewertung ist eine qualitative Analyse der eingesetzten Daten.

Tabelle 2-1: Gegenüberstellung der Bestandteile des Umgebungsmodells mit den im Rahmen dieser Arbeit genutzten Geodaten.

Gegenüberstellung der Bestandteile von Umgebungsmodellen (UM) mit den identifizierten Geodaten (GD)		Landschaftsmodell (DLM)	Geländemodell (DGM)	3D-Stadtmodell (3DSt)	Orthophotos (DOP)	Navigationsdaten (NAV)	Vollständigkeit	Datentyp, bzw. -modell der Geodaten	Datentyp, bzw. -modell im Umgebungsmodell	Erforderliche Tätigkeit bzw. Voraussetzung zur Überführung
<p>= GD beinhalten Inform. für den Bestandteil des UM</p> <p>= GD beinhalten keine Inform. für den Best. des UM</p> <p>= Zuordnung von GD zu dem Best. des UM</p> <p>✓ = GD sind Vollständig</p> <p>✗ = GD sind Unvollständig</p>										
Geometrie von Strecken										
Lageplan		✗				✓	✓ Linienzug	math. Funktionen	Interpolation	
				✗		✓	Rastergraphik	math. Funktionen	Bilderk. und -verarb.	
					✗	✓	Graph	math. Funktionen	Interpolation	
Höhenplan		✗				✓	georef. Höhenwerte	math. Funktionen	Interpolation	
Querschnittsprofil		✗				✓	georef. Höhenwerte	math. Funktionen	Interpolation	
Logische Verknüpfung										
Fahrspuren										
Anzahl			✗			✓	Rastergraphik	relationales Attribut	Bilderk. und -verarb.	
				✗		✓	relationales Attribut	relationales Attribut	Registrierung	
Breite			✗			✓	Rastergraphik	relationales Attribut	Bilderk. und -verarb.	
Fahrbahnmarkierungen			✗			✓	Rastergraphik	relationales Attribut	Bilderk. und -verarb.	
				✗		✓	relationales Attribut	relationales Attribut	Registrierung	
Verkehrsknoten										
Streckenverknüpfung			✗			✓	Rastergraphik	relationales Attribut	Bilderk. und -verarb.	
				✗		✓	relation. Beziehung	relation. Beziehung	Registrierung	
Abbiegerelationen				✗		✓	relation. Beziehung	relation. Beziehung	Registrierung	
Verkehrszeichen										
Lichtsignalanlagen			✗			✓	relationales Attribut	relationales Attribut	Registrierung	
				✗		✓	relationales Attribut	relationales Attribut	Registrierung	
Zufahrtsbeschr.			✗			✓	relationales Attribut	relationales Attribut	Registrierung	
Attribute										
Straßenn. und -kat.				✗		✓	relationales Attribut	relationales Attribut	Registrierung	
Physik. Eigenschaften										
Oberflächenstruktur			✗			✓	Rastergraphik	relationales Attribut	Bilderk. und -verarb.	
				✗		✗	relationales Attribut	relationales Attribut	Registrierung	
Reibwertskoeffizienten										
Objekte		✗								
Tunnel/Brücken			✗			✓	Rastergraphik	relationales Attribut	Bilderk. und -verarb.	
				✗		✓	relationales Attribut	relationales Attribut	Registrierung	
Gebäude		✗	✗			✓	Polygon (Grundriss)	Polygon (Grundriss)	Koord. transform.	
				✗		✓	Rastergraphik	Polygon (Grundriss)	Bilderk. und -verarb.	
Vegetation		✗				✓	Polygon (Wald)	Koord. einz. Objekte	nicht möglich	
				✗		✓	Rastergraphik	Koord. einz. Objekte	Bilderk. und -verarb.	
Gelände		✗				✓	georef. Höhenwerte	3D-Modell	Triangulieren	
Strecken/Knotenpunkte			✗			✓	Rastergraphik	3D-Modell	Texturieren	
Verkehrsmobilien			✗			✓	Rastergraphik	3D-Modell	Bilderk. und -verarb.	
Gebäude			✗			✓	Grundr. u. Geb.höhe	3D-Modell	Extrudieren	
Dekorationsobjekte		✗				✓	Rastergraphik	3D-Modell	Bilderk. und -verarb.	
				✗		✓	Polygon (Landn.)	3D-Modell	Registrierung	
				✗		✓	Rastergraphik	3D-Modell	Bilderk. und -verarb.	

Bilderk. und -verarb.: Bilderkennung und -verarbeitung; georef.: georeferenzierte; Grundr. u. Geb.höhe: Grundriss und Gebäudehöhe; Koord. einz.: Koordinaten einzelner; Koord.transform.: Koordinatentransformation; Landn.: Landnutzung; math.: mathematische; Physik.: Physikalische; relation.: relationale; Straßenn. und -kat.: Straßenname und -kategorie; Zufahrtsbeschr.: Zufahrtsbeschränkung; Registrierung: eine logisch-geometrische Beziehung zwischen den Bestandteilen des Umgebungsmodells und den Geodaten

Es ist festzustellen, dass abweichende Datenmodelle nicht triviale Transformationen bzw. Näherungen erfordern. So sind Orthophotos bspw. eine reichhaltige Informationsquelle. Die maschinelle Interpretation dieser Informationen erfordert jedoch aufwändige

und kaum zu generalisierende Bildverarbeitungs- und Bilderkennungstechniken. Die Extraktion der Informationen aus Bildern ist keinesfalls einfach. Einige Geodaten weisen zudem gegenwärtig noch Lücken auf (bspw. fehlende Fahrstreifenbreite). Im Rahmen dieser Arbeit werden daher **straßenbauliche Richtlinien** ([RAL95], [RAS06], [RAA08]) eingesetzt, welche diese Lücken mit Standardwerten füllen können. Grundsätzlich können die gewählten Geodaten die Aspekte des Logikmodells nahezu vollständig abbilden, auch wenn Reibwertkoeffizienten der Fahrbahnoberfläche fehlen, da entsprechende Geodaten bisher nicht flächendeckend verfügbar sind. Das Graphikmodell lässt sich weit weniger vollständig aus Geodaten bilden. Zwar kann das Verkehrsnetz, die Landschaft und Gebäude abgebildet werden, es fehlen jedoch Dekorationsobjekte, die bisher nicht flächendeckend erhoben werden. Dennoch bieten die eingesetzten Geodaten insgesamt eine weitgehende Überdeckung mit den Aspekten des Umgebungsmodells. Eine vollständig automatisierte Generierung vollständiger Umgebungsmodelle bleibt heute jedoch vorerst eine Vision – insbesondere mangels flächendeckend verfügbarer 3D-Modelle für das Graphikmodell.

2.5 Problemabgrenzung

Fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme sind komplexe mechatronische Systeme, die durch ein enges Zusammenspiel von Fahrer und Assistenzsystem sowie durch zunehmende maschinelle Wahrnehmung der Umgebung gekennzeichnet sind. Diese Eigenschaften sind zwar die Grundlage faszinierender, nutzbringender Funktionen, steigern die Komplexität der Entwicklung jedoch signifikant [Mau09, S. 43ff.], [Kno10, S. 104ff.]. Der Einsatz Virtueller Prototypen zur frühzeitigen Funktionsabsicherung ist daher längst etabliert: Entlang der gesamten Entwicklung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme werden verschiedene Validierungsmethoden und -technologien eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.2.3.2).

Interaktive Fahrsimulationen sind dabei ein zunehmend wichtiger Bestandteil. Sie ermöglichen die gefahrenfreie Erprobung des Zusammenspiels zwischen Fahrer und Assistenzsystem. Fahrsimulatoren basieren auf dem Zusammenwirken von Simulationsmodellen zur Laufzeit (vgl. Abschnitt 2.3.1). Die Qualität einzelner Simulationsmodelle ist dabei entscheidend für die Qualität der Simulationsergebnisse [VDI2206, S. 49]. Modellbildung ist daher ein entscheidender Erfolgsfaktor für Fahrsimulationen. Dabei werden Modelle des Fahrzeugs und einzelner Fahrzeugkomponenten heute mittels CAE⁴²-Techniken effizient und effektiv gebildet. Entsprechende Methoden und Werkzeuge sind umfangreich dokumentiert. Demgegenüber ist die effiziente Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen bisher wenig dokumentiert. Auch wenn die

⁴² CAE: Computer Aided Engineering; der Begriff umfasst sämtliche Techniken und Werkzeuge (bspw. CAD) des computerunterstützen Entwickelns von Produkten.

Bildung von Umgebungsmodellen nicht zur eigentlichen Entwicklung des Fahrerassistenzsystems gehört, sind sie dennoch ein wichtiger Bestandteil der Fahrsimulation: Zum einen stellen sie Daten für weitere Simulationsmodelle zur Verfügung. Sie sind damit eine Kernkomponente von Fahrsimulatoren. Zum anderen ermöglichen erst Umgebungsmodelle die Erprobung Virtueller Prototypen von Fahrerassistenzsystemen in der Betriebsumgebung. Vergleiche zwischen Ergebnissen virtueller Versuchsfahrten mit Ergebnissen realer Versuchsfahrten erfordern geospezifische Umgebungsmodelle, die reale Umgebungen abbilden [SFK+07, S. 1], [Car01, S. 67f.], [DG06, S. 27f.], [GBC+98, S. 51f.], [TVG+08, S. 95], [DWM+08, S. 109f.], [ASK+03, S. 250ff.].

Der Aufwand zur Erarbeitung derartiger Umgebungsmodelle ist erheblich: Es sind korrelierende Logik- und Graphikmodelle zu erarbeiten, welche reale Umgebungen abbilden. Spezielle Methoden und Software-Werkzeuge haben dabei heute klassische Modellierungswerkzeuge ergänzt bzw. abgelöst (vgl. Abschnitt 3.3) [Ran03, S. 142ff.] [ARA01]. Darüber hinaus wird seit langem versucht die Bildung von Umgebungsmodellen weitgehend zu automatisieren [Car01, S. 69f.] – bisher jedoch ohne abschließenden Erfolg.

Die effiziente Verarbeitung von Geodaten ist sicherlich eine wesentliche Voraussetzung zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle [SFK+07, S. 1], [Ran03, S. 141], [DB11, S. 431ff.], [Guo05, S. 1]. Geodaten die Informationen beinhalten um das Logikmodell nahezu vollständig zu bilden, sind heute flächendeckend vorhanden und verfügbar. Dies gilt nicht für die vollständige Generierung des Graphikmodells. Ansätze die Geodaten zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle einsetzen sind in Abschnitt 3.2 beschrieben. Grundsätzlich gilt, dass dabei Geodaten aus verschiedenen Quellen zu harmonisieren sind. Zwar bestehen dafür Methoden, diese sind jedoch anwendungsspezifisch anzupassen; dies setzt bisweilen geowissenschaftliche Kenntnisse voraus. Darüber hinaus müssen die Ergebnisse überwiegend nachgebessert werden [Lan06, S. 177ff.], [Bil10, S. 188ff.].

Insgesamt greifen die bisherigen Ansätze zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen zu kurz – insbesondere vor dem Hintergrund der Entwicklung fortgeschrittenen Fahrerassistenzsysteme (vgl. Abschnitt 3.4). Es bleibt nach wie vor eine komplexe, arbeitsintensive Aufgabe und damit eine **Herausforderung**. Um dieser Herausforderung zu begegnen besteht ein **Bedarf** für eine *Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen*. Diese sollte folgende Bestandteile beinhalten:

- **Vorgehensmodell:** Die Tätigkeiten zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle müssen zielgerichtet sein und das Virtual Prototyping fortgeschrittenen Fahrerassistenzsysteme berücksichtigen; zur Verfügung stehende Hilfsmittel müssen effektiv eingesetzt werden. Ein strukturiertes Vorgehensmodell ist daher der Kern der Systematik: Es ordnet die Tätigkeiten zur Bildung von Logik- und

Graphikmodell in Phasen, definiert notwendige Hilfsmittel und legt die eingesetzten Geodaten fest.

- **Hilfsmittel:** Die Verarbeitung von Geodaten erfolgt mehrheitlich mit Hilfe spezifischer Methoden und Verfahren aus dem Bereich Geodäsie. Geeignete Hilfsmittel sind für die einzelnen Tätigkeiten zur Bildung von Umgebungsmodellen auszuwählen, ggf. anzupassen bzw. zu erweitern.
- **Software-Werkzeug:** Die Modellbildung muss selbstredend rechnerunterstützt erfolgen. Dafür ist ein Software-Werkzeug bereitzustellen, welches die einzelnen Phasen des Vorgehensmodells informationstechnisch abbildet sowie einzelne Hilfsmittel implementiert. Das Software-Werkzeug muss darüber hinaus bestehende Standards zur Beschreibung von Logik- und Graphikmodell unterstützen.

2.6 Anforderungen an eine Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle

Aus der Problemanalyse resultieren Anforderungen an *eine Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrersimulationen*. Die folgenden Abschnitte legen diese Anforderungen fest; es wird dabei zwischen Anforderungen an das Vorgehensmodell, spezifischen Anforderungen an das zu bildende Umgebungsmodell sowie funktionalen Anforderungen an ein Software-Werkzeug unterschieden.

2.6.1 Anforderungen an das Vorgehensmodell

Das Vorgehensmodell ist der Kern der Systematik; es strukturiert die einzelnen Tätigkeiten sowie die eingesetzten Hilfsmittel zur Bildung von Umgebungsmodellen. Folgende Anforderungen sind dabei zu erfüllen:

A1: Ausrichtung auf das Virtual Prototyping von Fahrerassistenzsystemen

Virtual Prototyping ist bei der Entwicklung fortgeschrittenen Fahrerassistenzsysteme längst etabliert: Mit fortschreitender Entwicklung werden verschiedene Validierungsmethoden und -technologien zur Absicherung von Systemfunktionen eingesetzt. Die jeweils eingesetzten Umgebungsmodelle unterscheiden sich jedoch erheblich im Detailgrad (vgl. Abschnitt 2.2.3). Das Vorgehensmodell muss daher gewährleisten, dass zu jeder Technologie Logik- und Graphikmodell in adäquater Ausprägungstiefe vorliegen. Es muss ferner sicherstellen, dass die einzelnen Teilmodelle aufeinander aufbauen und in späteren Validierungsmethoden und -technologien des Entwicklungsprozesses fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme wiederverwendet werden können.

A2: Systematische Vorgehensweise

Geospezifische Umgebungsmodelle bestehen aus zwei konsistenten Teilmodellen, die eine Fülle an Informationen beinhalten (vgl. Abschnitt 2.3.2). Gegenwärtige Geodaten enthalten zwar den überwiegenden Teil der notwendigen Informationen, sie verteilen sich jedoch auf verschiedene Geobasis- und Geofachdaten (vgl. Abschnitt 2.4.3). Die gezielte Integration einzelner Geodaten sowie eine insgesamt systematische Vorgehensweise bei der Bildung des Umgebungsmodells sind daher zwingend erforderlich. Das Vorgehen muss den Ablauf nach Phasen eindeutig darstellen. Jede Phase muss anhand eindeutiger Tätigkeiten und Ergebnisse festgelegt sein. Vorgänge müssen systematisch und zielgerichtet durchführbar sein.

A3: Durchgängigkeit, Verständlichkeit und Praktikabilität

Die Systematik muss vollständig und durchgängig sein; sie muss die notwendigen Schritte und Hilfsmittel zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle beinhalten. Eine einfache und verständliche Darstellung der Systematik und ihrer Inhalte ist dabei entscheidend. Darüber hinaus ermöglicht allein eine hinreichende Beschreibungstiefe die Reproduzierbarkeit und damit den zweckmäßigen Einsatz.

A4: Hohes Potential zur Automatisierung

Eine vollständig automatische Bildung von Umgebungsmodellen aus Geodaten bleibt vorerst Vision (vgl. Abschnitt 2.4.3). Einzelne Schritte weisen jedoch ein hohes Potential zur Automatisierung auf. Dieses sollte identifiziert und im Gesamtkontext der Vorgehensweise berücksichtigt werden. Ferner sollten Verfahren zur weiteren Automatisierung und zur Unterstützung des Benutzers empfohlen werden.

2.6.2 Spezifische Anforderungen an das zu bildende Umgebungsmodell

Im Kern der Systematik geht es um die Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen. Das eigentliche Umgebungsmodell muss dabei folgenden spezifischen Anforderungen gerecht werden:

A5: Nachbildung realer Umgebungen

Testergebnisse aus virtuellen Versuchsfahrten müssen nach wie vor durch reale Testfahrten validiert werden (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). Insbesondere vor dem Hintergrund der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen, die ortsbezogene Daten verwenden, sind geospezifische Umgebungsmodelle daher erforderlich.

A6: Korrelierende Teilmodelle für Logik und Graphik

Das Umgebungsmodell hat Abhängigkeiten zu weiteren Komponenten der interaktiven Fahrsimulation, die spezifische Informationen aus den einzelnen Teilmodellen des Umgebungsmodells erhalten (vgl. Abschnitt 2.3.2.3). Beide Teilmodelle sind für eine reali-

tätsnahe interaktive Fahrsimulation zwingend erforderlich. Daher müssen korrelierende Logik- und Graphikmodelle gebildet werden.

A7: Spezifische Ausrichtung auf interaktive Fahrsimulation

Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen unterscheiden sich von solchen für interaktive visuelle Simulationen wie bspw. Flugsimulationen. Bei interaktiven Fahrsimulationen sind vorrangig der Straßenverlauf und dessen unmittelbare Umgebung bedeutsam; weitläufige Gebiete müssen nicht nachgebildet werden. Der Detailgrad und die Genauigkeit der Modellierung ist in diesem Bereich allerdings deutlich höher als bei anderen interaktiven Simulationen (vgl. Abschnitt 2.3.2). Das entstehende Umgebungsmodell muss daher den notwendigen Detailgrad beinhalten.

2.6.3 Funktionale Anforderungen an ein Software-Werkzeug

Die Bildung von Umgebungsmodellen erfolgt selbstverständlich mit einem Software-Werkzeug. Dieses muss das Vorgehensmodell vollständig abbilden und die einzelnen Tätigkeiten mit entsprechenden Funktionen unterstützen. Darüber hinaus muss das Software-Werkzeug folgenden funktionalen Anforderungen genügen:

A8: Offene und erweiterbare Systemarchitektur

Sowohl die Qualität, als auch die Quantität von Geodaten nimmt beständig zu. Es ist davon auszugehen, dass in naher Zukunft umfassende Sachdaten und hochwertige 3D-Modelle für weite Teile der Erde vorliegen werden und in Form von Geodaten zur Verfügung stehen (vgl. Abschnitt 2.4.2.3). Diese Entwicklungen müssen von Beginn an in der Systemarchitektur des Software-Werkzeugs berücksichtigt werden. Diese muss offen und erweiterbar gestaltet sein, um zukünftige Geodaten unkompliziert integrieren zu können. Eine offene und erweiterbare Systemarchitektur ist zudem die Basis zur operativen Nutzbarkeit des Software-Werkzeugs, auch über den Prototyp hinaus.

A9: Kompatibilität zu bestehenden Standards

Zur Beschreibung und Speicherung der Teilmodelle für Logik und Graphik sind etablierte Standards vorhanden, die zum einen die wesentlichen Daten definieren und zum anderen Interoperabilität ermöglichen (vgl. Abschnitte 2.3.2.1 und 2.3.2.2). Für Geodaten existieren ebenso entsprechende Standardformate und -spezifikationen (vgl. Abschnitt 2.4.2). Derartige Standards müssen bei der Konzipierung und Implementierung des Software-Werkzeugs berücksichtigt werden.

3 Stand der Technik

Es existiert eine Vielzahl von Methoden zur automatischen Bildung von virtuellen Umgebungen. Derartige Ansätze setzen bspw. heterogene Datenbestände ein, um virtuelle Stadtmodelle zu bilden [Ave06] oder sie bilden automatisch 3D-Graphikmodelle einzelner Gebäude aus Bildaufnahmen [ADF+10]. Zwar befinden sich darunter auch Arbeiten, die explizit Straßennetze in virtuelle Umgebungen integrieren (bspw. [GB03], [Ess08]), insgesamt fokussieren diese Arbeiten jedoch das Graphikmodell. Adäquate Fahrsimulation ist aufgrund des fehlenden Logikmodells (vgl. Abschnitt 2.3.2) mit diesen Ansätzen daher kaum möglich.

Dieses Kapitel untersucht bestehende Methoden, Verfahren und Software-Werkzeuge zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen. In Kapitel 3.1 werden dazu zunächst verwandte Arbeiten beschrieben, die relevante Methoden zur Bildung von Umgebungsmodellen adressieren. Abschnitt 3.2 befasst sich mit Ansätzen zur Auswahl und automatisierten Integration von Geodaten in die Modellbildung geospezifischer Umgebungsmodelle. In Kapitel 3.3 werden Software-Werkzeuge behandelt, die heute zur Erarbeitung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen eingesetzt werden. Selbstredend implementieren derartige Werkzeuge einen Teil der Ansätze der vorangegangen Abschnitte. Abschließend wird in Kapitel 3.4 der Stand der Technik anhand der Anforderungen aus der Problemanalyse bewertet. Aus dieser Bewertung resultiert der Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit.

3.1 Methoden zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen

Im Folgenden werden Ansätze beschrieben, die vollständige Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen zum Ziel haben. Es handelt sich dabei um grundlegende Arbeiten, die jedoch keine Geodaten einsetzen.

3.1.1 Prozeduraler Ansatz zur Definition von Verkehrsszenarien nach ALLEN et al.

Ziel des Ansatzes von ALLEN et al. ist, den Einsatz klassischer Modellierungswerkzeuge (vgl. Abschnitt 2.3.3) zu minimieren. Ohne Detailkenntnisse der 3D-Modellierung sollen Verkehrsszenarien für virtuelle Versuchsfahrten erarbeitet werden können. Verkehrsszenarien beinhalten in diesem Kontext sowohl die wesentlichen Aspekte des Umgebungsmodells (vgl. Abschnitt 2.3.2), als auch Beschreibungen des Fremdverkehrsverhaltens. Grundlage der Arbeiten ist eine Sprache zur Definition der Verkehrsszenarien (engl. *scenario definition language (SDL)*) [ARA+99], [ARA+01]. Darauf aufbauend wurde eine Methode zur Erarbeitung von Verkehrsszenarien vorgeschlagen [ARA+03], [APR+04].

Die SDL definiert das gesamte Verkehrsszenario über prozedurale Anweisungen⁴³ mit der Syntax:

„Distance, event, attribute 1, attribute 2, ..., attribute n“ [ARA+01]

Distance definiert dabei die Position entlang der Fahrstrecke. *Event* verweist auf einzelne Prozeduren, die das Verkehrsszenario an der jeweiligen Position kennzeichnen. Die Prozeduren definieren zum einen die Straßengeometrie, Verkehrsleitsysteme, Gebäude, Vegetation und zum anderen das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer. *Attribute* sind Parameter der Prozeduren, beispielsweise die Krümmung einer Kurve oder die Geschwindigkeit eines anderen Verkehrsteilnehmers [ARA+99], [ARA+01].

Bild 3-1 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt der SDL. Die textuellen Anweisungen werden bei der Initialisierung des Laufzeitsystems interpretiert (vgl. bspw. [ARA+02]). Das Graphikmodell der Straße wird dabei aus der geometrischen Beschreibung des Straßenverlaufs automatisch abgeleitet. Einzelne Graphikobjekte, wie Gebäude, Bäume oder Beschilderungen liegen als Standardmodelle vor und werden über entsprechende Prozeduren referenziert und in der Szene platziert.

<pre> 1 -1, Define roadway sections 2 0,ROAD,12,2,1,30,.5,10,10,.333,.333,0, -1,-1,0,6,0,-5,10,-5,10,0 3 1000,ROAD,12,4,2,2,.5,10,10,.333,.333, 500,-1,-1,0,10,0,10,5,10,5,10,0 4 3000,ROAD,12,4,2,2,.5,10,10,.333,.333, 500,-1,-1,0,10,0,10,5,10,5,10,0 5 -1, 6 -1, Add some vertical curvature 7 1000,VC,500,0.005 8 2000,VC,1000,-1.0025 9 3500,VC,250,-0.01 10 -1, 11 -1, Throw in some opposing traffic 12 100,A,65,1000,-6,*1~4 13 1075,A,65,1000,-6,6 14 2000,A,65,1000,-6,*1~4 15 -1, 16 -1, Activate various events 17 0,TREE,50,10,0,30,70 18 0,SOBJ,200,15,0,0,0,0,</pre>	<pre> 19 Data\Signs\sp35mph.3ds 20 -1, 21 -1, Curve the road to the right 22 2850, SIGN,5,1000 23 3500,C,500,0,500,.002 24 -1, 25 -1, Show houses on both sides of street and add traffic and trees 26 1160,BLDG,1000,40,5 27 1160,BLDG,1000,-40,2 28 1255,TREE,0,10,1,40,100 29 -1, 30 -1, Display the intersection, signal light and the signal ahead sign 31 170,I,0,2200,1 32 1700,SIGN,8,1977 33 1700,SL,2227,10,5,15,0,10,3 34 -1, 35 -1, Add some cross traffic in the intersection 36 100, CT 06,5,10,5,P</pre>
---	---

Bild 3-1: Ausschnitt der prozeduralen Definition eines Verkehrsszenarios mit der SDL nach [ARA+03].

⁴³ Prozedurale Anweisungen sind in diesem Zusammenhang im Wesentlichen parametrisierte Funktionsaufrufe.

Die Methode zur Erarbeitung von Verkehrsszenarien mit der SDL gliedert sich in fünf Schritte [ARA+03], [APR+04]:

- 1) **Identifikation von Anforderungen:** Zunächst werden einzelne Fahraufgaben beschrieben, die der Fahrer bewältigen muss. Daraus werden Anforderungen an das Verkehrsszenario abgeleitet. Beispiele dieser Anforderungen sind eine Kurvendurchfahrt oder ein Ereignis wie kreuzender Fremdverkehr in einer Kreuzung.
- 2) **Definition des Verkehrsszenarios:** Basierend auf den Anforderungen werden die wesentlichen Bestandteile des Verkehrsszenarios in Form eines Storyboards festgehalten und prototypisch in der SDL umgesetzt. Dabei wird zuerst der Straßenverlauf festgelegt; darauf aufbauend werden Umgebungsobjekte und Ereignisse definiert.
- 3) **Bildung spezifischer 3D-Graphikmodelle:** In dieser Phase werden spezifische 3D-Graphikmodelle gebildet, sofern die bestehenden Standardmodelle nicht ausreichen. Dabei werden klassische Modellierungswerkzeuge (vgl. Abschnitt 3.3) eingesetzt.
- 4) **Ausarbeiten des Verkehrsszenarios:** Auf Basis der prototypischen Umsetzung und der spezifischen 3D-Graphikmodelle wird das Verkehrsszenario detailliert.
- 5) **Test des Verkehrsszenarios:** Das erarbeitete Verkehrsszenario wird im Fahrsimulator getestet und ggf. angepasst.

Bewertung

Die SDL adressiert die effiziente Bildung von Umgebungsmodellen, die die spezifischen Anforderungen der Fahrsimulation berücksichtigen. Das Vorgehensmodell beschreibt die grundsätzlichen Schritte, die zur Bildung der Modelle notwendig sind. Das Vorgehen ist sicherlich richtig; es bleibt jedoch zu generisch; die notwendige Beschreibungstiefe einzelner Tätigkeiten und Hilfsmittel bleibt aus. Darüber hinaus ist die Erarbeitung von Textszenarien mittels Texteditoren als nicht mehr zeitgemäß anzusehen. Andere Software-Werkzeuge werden nicht beschrieben.

3.1.2 Bildung von Umgebungsmodellen mit vorgefertigten Kacheln

Eine weit verbreitete Methode zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen ist das manuelle Zusammensetzen im Vorfeld gebildeter Kacheln. Diese repräsentieren geographisch stark begrenzte Gebiete, bspw. einen Abschnitt einer Straße, einen Kreuzungsbereich oder ein kleines Wohngebiet. Einzelne Kacheln sind für sich vollständige Umgebungsmodelle; sie beinhalten sowohl das Logik-, als auch das vollständig gestaltete Graphikmodell; zudem besitzen die Kacheln definierte Schnittstellen an den jeweiligen Grenzen. Diese Schnittstellen ermöglichen eine nahtlose Verknüpfung einzelner Kacheln zu einem ausgedehnten Umgebungsmodell (Bild 3-2).

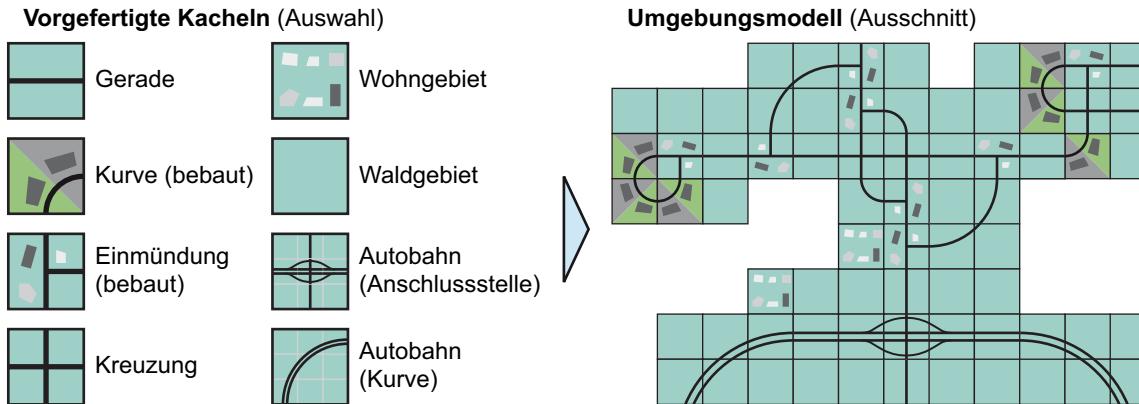


Bild 3-2: Prinzip der Kachelmethode: Aus einer Datenbank mit vorgefertigten Kacheln werden einzelne Kacheln zu einem ausgedehnten Umgebungsmodell zusammengefügt.

Die frühen Arbeiten von CREMER et al. und ALLEN stehen exemplarisch für Methoden der kachelbasierten Bildung von Umgebungsmodellen [CKP96], [PAW99], [AB01]. Diese Arbeiten entstanden im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit am National Advanced Driving Simulator⁴⁴. Ziel ist, auch fachfremden Personen (bspw. Psychologen, die Versuchsfahrten planen) die Modellierung unterschiedlicher Umgebungsmodelle zu ermöglichen [CKP99]. Dazu wurden mehr als 60 Kacheln mit typischen Umgebungen angefertigt und in einer Datenbank hinterlegt. Das Logikmodell einzelner Kacheln wurde dabei mit einem spezialisierten Software-Werkzeug erarbeitet, das gleichzeitig die Konsistenz zwischen Logik- und Graphikmodell sicherstellt [PAW99]. Die entsprechenden Graphikmodelle wurden mit herkömmlichen Modellierungswerkzeugen erstellt [AB01].

Bewertung

Die Methode der kachelbasierten Bildung von Umgebungsmodellen ist weit verbreitet. So setzen eine Reihe von Forschungs- und Entwicklungsinstituten im Umfeld der Fahrersimulation einen derartigen Ansatz ein (bspw. die Daimler AG [Zee10, S. 160]). Kommerzielle Modellierungswerkzeuge bieten dementsprechend Funktionen, die diese Methode implementieren (vgl. Abschnitt 3.3). Insgesamt ist der Ansatz daher als sehr wichtig einzurordnen, um effizient Umgebungsmodelle zu bilden. Die entstehenden Umgebungsmodelle sind jedoch nicht geospezifisch – reale Streckenverläufe lassen sich damit nicht abbilden.

⁴⁴ National Advanced Driving Simulator [SGP03] ist ein staatlich gefördertes Forschungs- und Entwicklungszentrum der Universität von Iowa.

3.1.3 Automatisierte Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen nach CARLES

Im Rahmen des Projekts „Evariste Reseau“⁴⁵ entwickelte CARLES einen frühen Beitrag zur automatisierten Bildung von Umgebungsmodellen. Vorrangiges Ziel ist, Umgebungsmodelle vollständig zu *beschreiben* (franz. *décrire*) und zu *erzeugen* (franz. *produire*) [Car01, S. 10]. Die Arbeiten fokussieren dabei auf eine mehrschichtige Beschreibung des Umgebungsmodells sowie Methoden zu dessen automatisierter Bildung. Die Automatisierung bezieht sich in diesem Zusammenhang auf spezifische Aufgaben während der grundsätzlich manuellen Bildung des Umgebungsmodells [CE00], [Car01].

Ausgehend von den technischen Randbedingungen interaktiver Fahrsimulationen entwickelte CARLES eine erweiterbare, mehrschichtige Repräsentation des Umgebungsmodells. Diese besteht aus zwei Bestandteilen: einem Graph des Verkehrsnetzes sowie einer mehrschichtigen Repräsentation (franz. *représentation multi-niveaux*) unterschiedlicher Aspekte von Straßen und Umgebungen. Jede Schicht liefert dabei spezifische Informationen an die charakteristischen Komponenten der Fahrsimulation (vgl. Abschnitt 2.3.1); so liefert eine Schicht bspw. Abbiegerelationen von Verkehrsknoten an den Fremdverkehr.

Ausgangspunkt und geometrische Referenz für alle Schichten ist der Graph des Verkehrsnetzes. Dieser beschreibt die Topologie des Netzes und die Geometrie der Referenzlinie. Die Elemente des Graphen sind [Car01, S. 22ff.]:

- **Primitive:** Diese beschreiben den Verlauf der Referenzlinie analytisch. Die Gestaltungselemente sind dabei Geraden, Kreisbögen und Klohoide.
- **Straßenabschnitt (Kanten des Graphen):** Ein Straßenabschnitt besteht aus einer Folge von Primitiven, die den Verlauf der Referenzlinie zwischen zwei Verkehrsknoten geometrisch beschreibt. Darüber hinaus beschreibt ein Straßenabschnitt die Topologie zwischen zwei Terminalknoten.
- **Knoten:** Es wird zwischen Terminal- und Non-Terminalknoten unterschieden. Terminalknoten charakterisieren dabei Verkehrsknoten. Non-Terminalknoten sind Container, die sowohl Terminal- als auch Non-Terminalknoten beinhalten können. Dadurch wird eine Hierarchie generiert, mit der sich einzelne Abschnitte des Verkehrsnetzes kapseln und wiederverwenden lassen. Jedem Knoten ist ferner ein eigenes Koordinatensystem zugewiesen, das bspw. die Position und Orientierung der angrenzenden Straßenabschnitte in Weltkoordinaten definiert.

⁴⁵ „Evariste Reseau“ ist ein Verbundprojekt zwischen dem französischen, staatlich geförderten Forschungsinstitut für Transport und Sicherheit (INRETS) und der Oktal Société à Responsabilité Limitée (Sarl), Entwickler und Hersteller von kommerziellen Fahrsimulationssystemen.

- **Route:** Diese verknüpft einzelne Non-Terminalknoten zu einem vollständigen Verkehrsnetz und definiert dessen Ursprung.

Der Graph wird durch die erweiterbare, mehrschichtige Repräsentation ergänzt. CARLES setzt dazu sogenannte Markierungen (franz. *objets-balise*) ein, die entlang der Referenzlinie platziert werden. Die Markierungen beschreiben dabei bspw. das Querschnittprofil der Straße, Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche, Abbiegerelationen, Verkehrszeichen und -signale sowie Dekorationsobjekte und die Geländestruktur in der unmittelbaren Umgebung der Straße [CE00], [Car01, S. 67ff.].

Der Graph des Verkehrsnetzes und die Markierungen definieren das Logikmodell. Dieses wird zur Bildung des Umgebungsmodells zuerst aufgebaut; das Graphikmodell wird anschließend automatisch generiert. Die Tätigkeiten gliedern sich in drei Schritte:

- 1) **Aufbau des Straßennetzes:** Der Graph des Verkehrsnetzes wird manuell aufgebaut. Der Modellierer gestaltet dabei einzelne Verkehrswege, die anschließend zu einem Netz zusammengefasst werden; als Hilfsmittel wird eine Karte oder ein Foto der nachzubildenden Umgebung eingesetzt. Der Aufbau des Straßennetzes wird durch zwei Methoden unterstützt:

- Berechnung der Parameterwerte einzelner Primitive: Der Modellierer gestaltet Abschnitte von Straßen durch die simple Festlegung von zwei Punkten mit jeweils einer Tangente. Das System berechnet die Parameter der einzelnen Primitive automatisch (Bild 3-3, links). CARLES beschreibt in diesem Zusammenhang eine Reihe von Berechnungsalgorithmen, die dem Modellierer unterschiedliche Verläufe der Referenzlinie vorschlagen, aus denen der geeignete gewählt wird [Car01, S. 49ff.]
- Topologische Verknüpfung: Einzelne beschriebene Straßenzüge werden automatisch zu einem Verkehrsnetz verknüpft. Dazu werden Schnittpunkte zwischen kreuzenden Straßenzügen ermittelt; an diesen Schnittpunkten erfolgt eine topologische Verknüpfung (Bild 3-3, rechts) [Car01, S. 29].

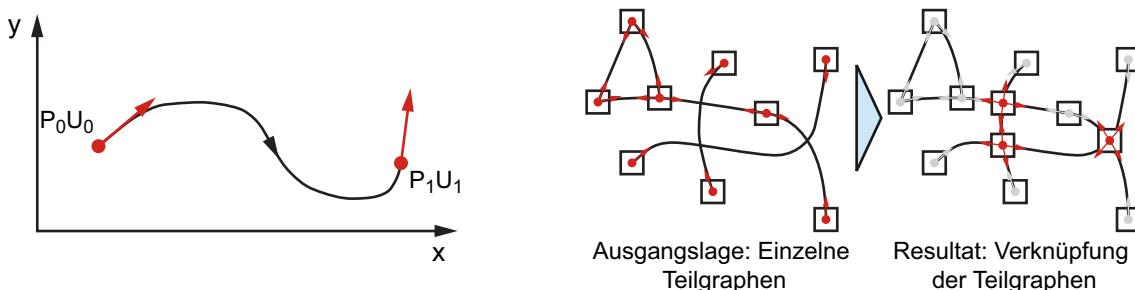


Bild 3-3: Der Modellierer wird bei der Bildung des Straßennetzes unterstützt: Parameterwerte der Gestaltungselemente werden automatisch berechnet (links) [Car01, S. 50]. Die Topologie zwischen kreuzenden Straßenzügen wird automatisch festgelegt (rechts) [Car01, S. 29].

- 2) **Erstellen der Markierungen⁴⁶:** Diese werden manuell erstellt. Der Modellierer profitiert dabei allerdings von einer symbolischen Beschreibung. So muss er zur Definition des Querschnittprofils lediglich Eigenschaften wie die Anzahl der Fahrstreifen eingeben. Die entsprechende Geometrie ist hinterlegt und wird automatisch generiert.
- 3) **Generierung des Graphikmodells:** Das Graphikmodell wird vollständig aus dem Logikmodell generiert. CARLES adressiert dabei drei Aspekte des Graphikmodells [Car01, S. 93ff.]:
- Generieren einzelner Straßenverläufe: Das Graphikmodell einzelner Straßenverläufe wird aus der Referenzlinie und dem Querschnittprofil generiert (Bild 3-4, links).
 - Generieren von Einschnitten und Aufschüttungen: Aus der symbolischen Beschreibung von Einschnitten und Aufschüttungen in der unmittelbaren Umgebung der Straße wird das entsprechende Graphikmodell generiert. Dieses wird zudem in ein gegebenes Geländemodell integriert. CARLES beschreibt in diesem Zusammenhang eine eigene Methode, die zunächst die Kontur der Straßenverläufe ermittelt. Diese Kontur wird anschließend aus dem Geländemodell ausgeschnitten und durch die Straßenverläufe ersetzt (Bild 3-4, mitte).
 - Aufbau des Graphikmodells von Verkehrsknoten: An den Enden einzelner Straßenverläufe werden Graphikmodelle von Verkehrsknoten gebildet. CARLES stellt dazu einen umfangreichen Algorithmus vor, der übereinander liegende Flächen und fehlerhafte Fahrbahnmarkierungen eliminiert. Die Resultate des Algorithmus sind erstklassig, auch wenn einzelne Nacharbeiten notwendig sind [Car01, S. 129] (Bild 3-4, rechts).

Bewertung

Die Arbeiten von CARLES berücksichtigen die spezifischen Anforderungen interaktiver Fahrsimulationen; sie schaffen Grundlagen für die Beschreibung und Trennung von Logik- und Graphikmodell und haben entscheidend zur Standardisierung in diesem Bereich beigetragen [CTH+10]. Die Arbeit beschreibt ferner wichtige Grundlagen in der komplexen Berechnung von Klothoiden. Die ausführliche Darstellung zur automatischen Generierung des Graphikmodells ist ebenso als sehr wichtig einzuschätzen. Insgesamt sind die Arbeiten sehr systematisch und gut nachvollziehbar; sie tragen sicherlich zur Vereinfachung der Modellbildung von Umgebungsmodellen bei. Das gesamte

⁴⁶ Es sind keine Markierungen im eigentlichen Wortsinn gemeint. CARLES verwendet den Begriff Markierungen für Attribute und Objekte entlang der Referenzlinie.

Vorgehen basiert allerdings auf der manuellen Eingabe von Daten; Geodaten werden nicht berücksichtigt.



Bild 3-4: Generierung des Graphikmodells von Straßen, Einschnitten bzw. Aufschüttungen sowie Kreuzungen nach CARLES [Car01, S. 95], [Car01, S. 100] [Car01, S. 126].

3.1.4 Dynamische Szenerien in der Fahrsimulation nach KAUBNER

Experimente zu den Auswirkungen von Medikamenten, psychotropen Substanzen oder Schlafmangel auf das Fahrverhalten im Straßenverkehr werden vorrangig in der sicheren Umgebung eines Simulators durchgeführt [Kau03, S. 7]. Für Langzeitversuche sind entsprechend umfangreiche Umgebungsmodelle mit einem ausgedehnten Straßennetz notwendig. KAUBNER stellt in diesem Zusammenhang einen Ansatz zur Beschreibung und Generierung von Umgebungsmodellen mit sehr großen Verkehrsnetzen vor. Die entstehenden Umgebungsmodelle entsprechen dabei keinen realen Umgebungen; sie sind lediglich *lokal geometrisch konsistent* [Kau03, S. 9] und erstrecken sich nur im Sichtbarkeitsbereich des Fahrers. Das Umgebungsmodell verändert sich zur Laufzeit der Simulation, in Abhängigkeit von Ereignissen im Straßenverkehr oder dem Grad der Aufmerksamkeit des Fahrers. Im Kern erarbeitete KAUBNER eine formale Sprache zur Beschreibung von Fahrversuchen sowie eine Methode zur automatischen Generierung des entsprechenden Graphikmodells [KMK+02], [Kau03], [MKG+04].

Die formale Sprache ist in kontextfreier Grammatik spezifiziert. Sie definiert Fahrversuche, die Verkehrssituationen und das Logikmodell beschreiben. Verschiedene Abstraktionsstufen sind dabei gestaffelt: Der Ablauf eines Versuchs wird durch die situationsabhängige Aneinanderreihung von Modulen festgelegt. Module kapseln inhaltlich abgeschlossene Situationen, bspw. das Durchfahren einer scharfen Kurve unmittelbar hinter einem zu schnell fahrenden Fahrzeug. In einzelnen Modulen werden wiederum Streckenschablonen zusammengefasst und miteinander verknüpft. Streckenschablonen beschreiben Streckenverläufe und deren Verknüpfung zu Ausschnitten des Straßennetzes. KAUBNER unterscheidet dabei zwischen Straßen und Verkehrsknoten [Kau03, S. 35]:

- Straßen sind einzelne Verkehrswege. Diese werden in Anlehnung an Richtlinien für die Anlage von Straßen beschrieben. Die Gestaltungselemente zur Definition des Lageplans sind dementsprechend: Geraden, Kreisbögen und Klothoiden. Der Höhenplan wird mit Segmenten unterschiedlicher Steigung beschrieben [Kau03, S. 45ff.]. Das Querschnittprofil der Straße wird anhand von Regelquerschnitten für einzelne Straßenkategorien festgelegt [Kau03, S. 59ff.].
- Verkehrsknoten verknüpfen Straßen zu einem Straßennetz. Dazu werden Kreuzungen oder Kreisverkehre verwendet. Die von KAUßNER vorgeschlagene Beschreibung von Verkehrsknoten beinhaltet Informationen über Verbindungen einzelner Spuren sowie deren Verläufe [Kau03, S. 50ff.].

Die **bedingte Verknüpfung** von Streckenschablonen innerhalb von Modulen ist ein wesentliches Konzept der Arbeiten von KAUßNER: Dabei wird der Übergang zu einer nachfolgenden Streckenschablone nur unter bestimmten Bedingungen gewährt. Dies ermöglicht, das Streckennetzwerk zur Laufzeit zu verändern und damit dynamisch auf Ereignisse zu reagieren. Bild 3-5 zeigt exemplarisch ein Modul mit folgender bedingter Verknüpfung: Solange das vorausfahrende Fahrzeug einen zu großen Abstand zum Eigenfahrzeug hat, wird in der Schleife zurückgesprungen und das Geradenstück s1, s2 durchfahren. Sobald der Abstand einen Schwellwert unterschreitet wird die scharfe Kurve aktiviert und dem Fahrer die entsprechende Umgebung präsentiert.

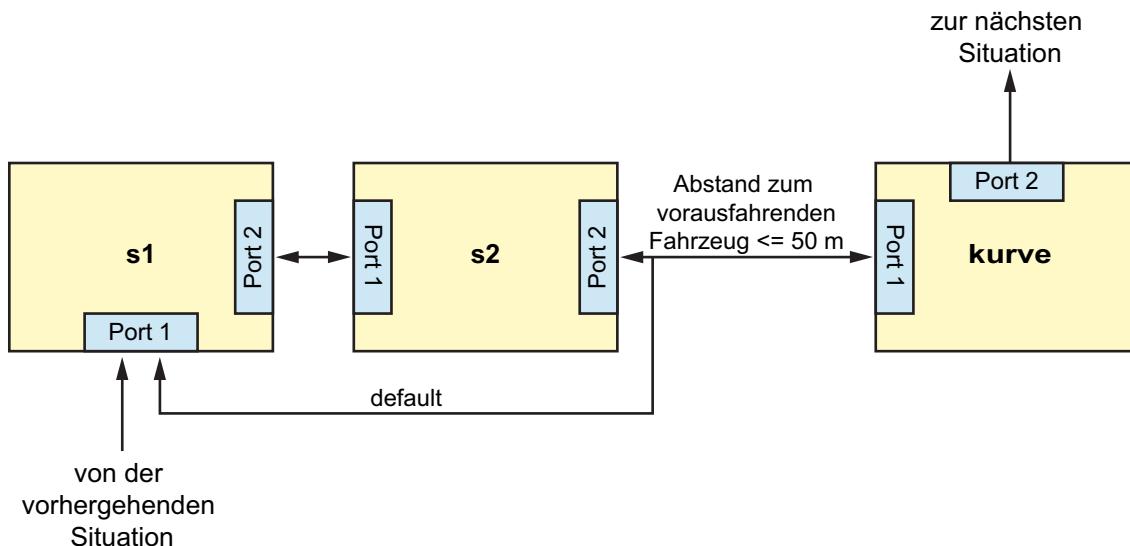


Bild 3-5: Module beschreiben eine abgeschlossene Situation; dazu werden einzelne Streckenschablonen unter Berücksichtigung von Bedingungen miteinander verknüpft [Kau03, S. 43].

Das eigentliche Umgebungsmodell wird auf Basis der formalen Sprache aufgebaut. Der Aufbau gliedert sich dabei in drei Schritte:

- 1) Der Versuchsleiter beschreibt den Fahrversuch in Form einer Textdatei, die syntaktisch der formalen Sprache entspricht. Die modulare Struktur der Sprache ermöglicht dabei das Instanziieren einmal beschriebener Situationen und Straßenverläufe. Darüber hinaus erleichtert ein hohes Abstraktionsniveau die Beschreibung. So müssen bspw. Parameterwerte von Klothoiden nicht angegeben werden [Kau03, S. 28ff.].
- 2) Das Logikmodell wird aus der Versuchsbeschreibung generiert. Dabei bildet die objektorientierte Struktur des Logikmodells die Elemente der formalen Sprache vollständig ab und erweitert diese um Methoden zur Berechnung konkreter Geometrie aus der gegebenen Beschreibung [Kau03, S. 81ff.].
- 3) Das Graphikmodell wird vollständig automatisch aus dem Logikmodell generiert. Das eingesetzte Verfahren generiert dabei zuerst die Straßen [MKG+04]; anschließend wird die Landschaft in der Umgebung generiert. Zum Aufbau der Landschaft werden dabei typische Landschaftstypen eingesetzt, bspw. „bewirtschaftet“, „bewaldet“ oder „bewohnt“; entsprechend dieser Typen werden charakteristische Objekte in der Umgebung verteilt [KMK+02], [Kau03, S. 194].

Bewertung

Der Ansatz berücksichtigt die spezifischen Anforderungen der Fahrsimulation und orientiert sich an den gegebenen Standards zur Beschreibung von Straßennetzen. Ferner wird dargestellt, dass das Logikmodell führend sein sollte. KAUßNER fokussiert insgesamt auf den speziellen Aspekt der Langzeitversuche im Fahrsimulator; in diesem Bereich stellt die Arbeit zweifellos einen wichtigen Beitrag dar. Die Szenarien werden jedoch vollständig manuell beschrieben. Geospezifische Umgebungen werden nicht abgebildet. Insgesamt eignet sich der Ansatz somit nur bedingt zur technischen Evaluierung von Fahrerassistenzsystemen.

3.2 Ansätze zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle auf Basis von Geodaten

Umgebungsmodelle die reale Straßenverläufe und Umgebungen abbilden sind besonders geeignet, um Ergebnisse virtueller Versuchsfahrten mit Ergebnissen realer Testfahrten vergleichbar zu machen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Darüber hinaus stimmen die Lokalisierungsdaten in der Fahrsimulation mit denen realer Navigationssysteme weitgehend überein – ortsbezogene Daten können daher zur Anregung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme verwendet werden (vgl. Abschnitt 2.2.2). Es existieren Ansätze zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle; Geodaten bilden dabei eine wesentliche Grundlage. Im Folgenden werden entsprechende Methoden und Verfahren

beschrieben; Ansätze die nicht über sehr grobe Konzeptionen hinausgehen (bspw. [Hru04]), werden nicht berücksichtigt.

3.2.1 Transformierung von Geodaten in großflächige Umgebungsmodelle für Verkehrssimulationen nach WILKIE et al.

WILKIE et al. stellen einen Ansatz zur automatischen Generierung von großflächigen Umgebungsmodellen für Verkehrssimulationen vor [WSL11]. Die Eigenschaften dieser Modelle überschneiden sich zu Teilen mit denen von Umgebungsmodellen für interaktive Fahrsimulationen. So basieren Verhaltensmodelle einzelner Verkehrsteilnehmer in Verkehrssimulationen üblicherweise auf einem Netzwerk von Fahrstreifen und Verkehrsknoten [Bar10, S. 8ff.]. Die zugrundeliegenden Logikmodelle weisen demzufolge eine große Ähnlichkeit auf. Die entsprechenden Graphikmodelle unterscheiden sich jedoch: Verkehrssimulationen visualisieren den Simulationsstatus typischerweise als Aufsicht; es wird ein weitläufiges Gebiet dargestellt. Einzelne Modelle am Boden werden daher häufig nicht explizit dargestellt oder besitzen einen geringen Detailgrad, der für interaktive Fahrsimulationen ungeeignet ist.

Ziel der Methode von WILKIE et al. ist, ein großflächiges Straßennetz vollständig aus Geodaten abzuleiten. Das dabei entstehende Umgebungsmodell soll zur Simulation und Visualisierung von Verkehrsteilnehmern eingesetzt werden. Die eingesetzten Geodaten sind Straßennetze aus digitalen Karten. Es wird dabei lediglich vorausgesetzt, dass Informationen über die Straßenkategorie vorhanden sind. Die Methode gliedert sich grob in zwei aufeinander folgende Phasen mit jeweils mehreren Berechnungsschritten [WSL11].

Die **topologische Phase** baut auf einem Graph auf, der das Straßennetz repräsentiert. Der Graph wird um Datenstrukturen ergänzt, die charakteristische Aspekte des Straßennetzes abbilden. Aus Sicht der Autoren sind für Verkehrssimulationen Straßen, Fahrstreifen, Verkehrsknoten sowie Unter- bzw. Überführungen relevant. Die wesentlichen Merkmale der entsprechenden Datenstrukturen sowie deren automatischer Aufbau stellen sich wie folgt dar:

- 1) **Straßen** werden als geordnete Liste von Knoten repräsentiert; sie bilden einen Linienzug der Verkehrsknoten miteinander verbindet.

Die eingesetzten Geodaten werden zunächst gefiltert, um Straßen fehlerfrei extrahieren zu können. Dabei werden doppelte Knoten entfernt oder solche, die unmittelbar benachbart sind, zu einem Knoten gebündelt. Anschließend werden die verbliebenen Knoten klassifiziert; das Klassifikationskriterium ist dabei der Grad der Knoten. Dieser kennzeichnet die Anzahl an Kanten mit denen ein Knoten verbunden ist. Teil einer Straße sind sämtliche Knoten, deren Rang zwei ist. Knoten, deren Rang größer zwei ist, kennzeichnen eine Kreuzung oder eine Auffahrt zu einer Schnellstraße. Stichstraßen werden durch Knoten mit Grad eins abgebildet. Aufbauend auf dieser

Klassifikation werden alle Nachbarknoten einzelner Straßen zu einem Linienzug zusammengefasst. Das Straßennetz ist damit topologisch abgebildet und die Referenzlinie geometrisch beschrieben.

- 2) **Fahrstreifen** werden durch Attribute beschrieben: die zugehörige Straße, die Fahrspurbreite, den Abstand zur Referenzlinie sowie Nachbarschaftsbeziehungen zu anderen Fahrstreifen.

In diesem Schritt liefern die Geodaten den Typ einzelner Straßen. Die Attribute der Fahrstreifen werden daraus abgeschätzt; so lässt sich bspw. die Breite von Fahrstreifen einschätzen.

- 3) Innerhalb von **Verkehrsknoten** (hier vorrangig signalgesteuerte Kreuzungen) werden einzelne Fahrstreifen der eingehenden Straßen geometrisch und logisch verknüpft. Dabei werden einfache 1:1 Beziehungen eingesetzt.

Während einer Signalphase wird jeweils ein Straßenpaar miteinander verbunden; sämtliche Fahrstreifen der einen Straße werden mit sämtlichen Fahrstreifen der anderen Straße logisch verknüpft. Kreisbögen werden zur geometrischen Verbindung eingesetzt. Die Straßenpaare wechseln nach jeder Signalphase. In diesem Schritt werden keine Geodaten eingesetzt.

- 4) **Unter- und Überführungen** im Straßenverlauf werden durch ein Attribut gekennzeichnet, das die Ebene einer Straße relativ zu einer anderen festlegt.

Es werden zunächst Schnittpunkte von sich schneidenden Straßenzügen gesucht, die keine gemeinsamen Knoten besitzen. Diese werden als Unter- bzw. Überführung interpretiert. Die Ordnung des Ranges dieser Schnittpunkte legt die Ebenen für einzelne Straßen fest.

Die **geometrische Phase** baut auf den Ergebnissen der topologischen Phase auf. Dabei wird die Geometrie von Fahrstreifen und Verkehrsknoten mathematisch abgebildet und anschließend in ein Graphikmodell überführt (Bild 3-6). Es werden drei Berechnungsschritte durchgeführt [WSL11]:

- 1) Geometrische Annäherung der Referenzlinie: Linienzüge sind zur Beschreibung der Straßengeometrie ungeeignet, da die Fahrdynamik einzelner Fahrzeuge nicht adäquat angeregt werden kann (vgl. Abschnitt 2.3.2.1). Dies gilt auch für relativ einfache Kinematik, die in Verkehrssimulationen berechnet wird [WLS11]. Um einen geometrisch glatten Verlauf der Referenzlinie einer Straße zu beschreiben, schlagen die Autoren eine Sequenz alternierender Geraden und Kreisbögen vor.

Die einzelnen Elemente werden automatisch parametriert. Dazu wird zunächst für jeden Knoten des Linienzugs ein Kreisbogen generiert; deren Radien werden mit einem rekursiven Algorithmus festgelegt. Abschließend werden benachbarte Kreisbögen durch Geraden verbunden.

- 2) Berechnung der Fahrstreifengeometrie: WILKIE et al. fassen Straßen als plane Oberflächen auf; für Verkehrssimulationen ist eine derartige Repräsentation ausreichend. Die Fahrstreifengeometrie wird mit jeweils zwei Linien definiert, die mit einer gegebenen Distanz parallel zur Referenzlinie verlaufen. Die Distanz ergibt sich aus der Breite der jeweiligen Fahrspur.
- 3) Diskrete Approximation der Geometrie: Das Graphikmodell wird auf Basis der Fahrstreifengeometrie approximiert. Dabei werden die jeweils äußeren Linienverläufe als Begrenzungslinien für eine bedingte Triangulierungsmethode verwendet, die das Facettenmodell generiert.

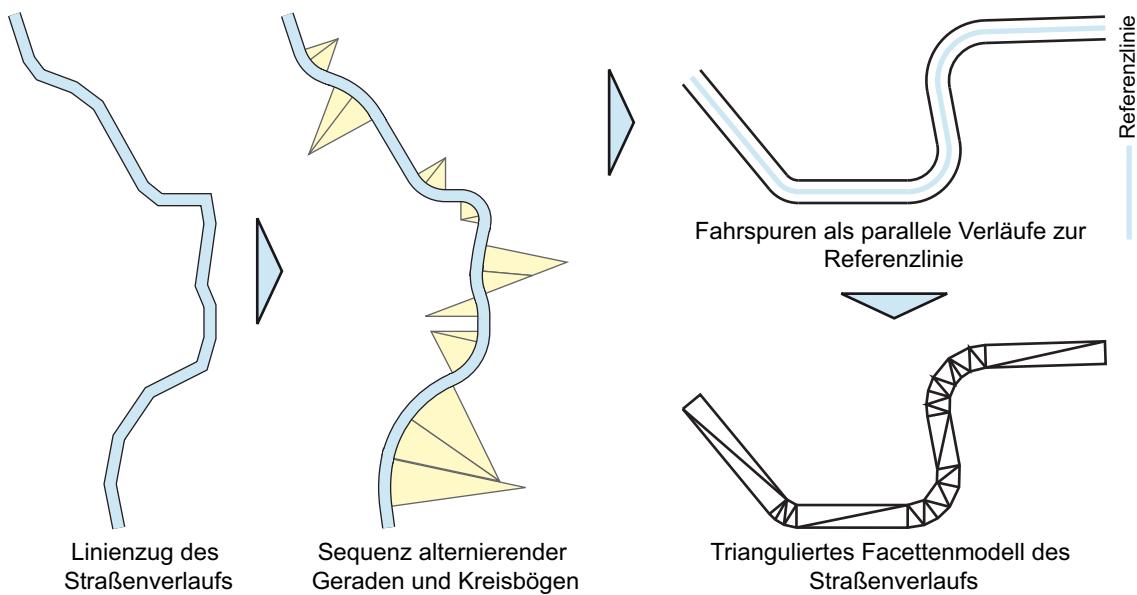


Bild 3-6: Einzelne Schritte der geometrischen Phase nach [WSL11].

Der Ansatz wurde implementiert und exemplarisch mit Geodaten aus OpenStreetMap (vgl. Anhang A2) durchgeführt. Das Erprobungsgebiet beinhaltet zwei benachbarte Städte (Biscoe und Star) in North Carolina. Bild 3-7 zeigt Ausschnitte der generierten Umgebungsmodelle. Ein unterlegtes Satellitenbild veranschaulicht dabei die hohe Genauigkeit der Straßenverläufe (links). Die generierten Graphikmodelle weisen trotz der Darstellung von Überführungen insgesamt einen geringen Detailgrad auf (rechts).

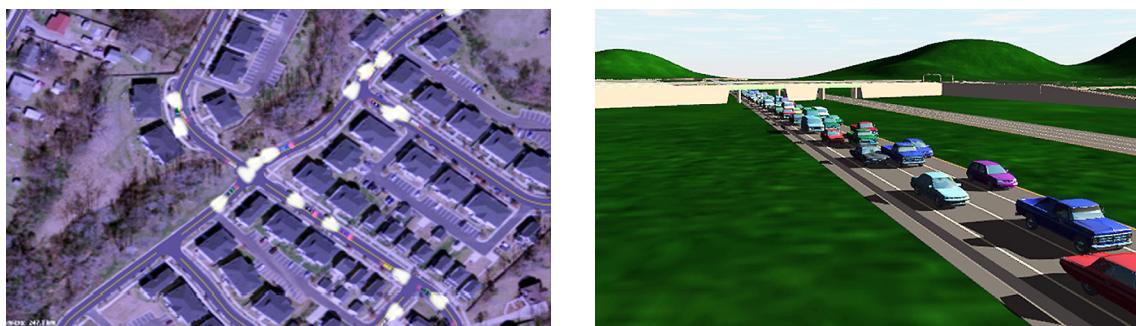


Bild 3-7: Generierte Umgebungsmodelle der Methode von WILKIE et al. [WSL11].

Bewertung

Die Arbeit von WILKIE et al. adressiert die effiziente Bildung geospezifischer Straßennetze für Verkehrssimulationen. Die vorgestellte Methode für diesen Anwendungsbe- reich ist systematisch und generiert Umgebungsmodelle vollständig automatisch, auch wenn dabei keine Klothoiden als Übergangsbögen eingesetzt werden. Die Reihenfolge der Generierung ist dabei sicherlich als richtig einzuschätzen. Die Arbeit beschreibt wesentliche Grundlagen zur Bildung von Verkehrsnetzen zu Simulationszwecken und ist damit insgesamt als sehr wichtig zu bewerten. Die eingesetzten Geodaten sind jedoch unzureichend: Auf ein Geländemodell wird vollständig verzichtet. Das Graphikmodell wird ferner nur sehr rudimentär gebildet; es ist auf Verkehrswege beschränkt. Die entstehenden Umgebungsmodelle eignen sich daher nur bedingt für interaktive Fahrsimula- tionen.

3.2.2 Framework zur bildbasierten Generierung von Straßennetzwerken nach GUO

Zur Identifizierung von Straßen aus Luftbildern existiert eine Vielzahl von Ansätzen; GUO gibt einen Überblick über bestehende Verfahren [Guo05, S. 4ff.]. Die Mehrzahl dieser Verfahren sucht in ganzen Bildern nach Bildpunkten, die zu Straßen gehören. GUO entwickelte eine Methode, die den Suchraum durch Registrierung von Luftbildern mit Straßennetzen deutlich einschränkt. Das übergeordnete Ziel ist, die Begrenzungen von Straßen mit hoher Genauigkeit automatisiert zu ermitteln und daraus Umgebungs- modelle für Fahrsimulationen zu generieren. GUO fasst die notwendigen Schritte in ei- nem Framework zusammen, das aus zwei Modulen besteht: Ein Bildverarbeitungsmodul, um Straßenbegrenzungen aus Bildinformationen zu extrahieren und ein Modellie- rungsmodul, in dem das Umgebungsmodell gebildet wird (Bild 3-8) [GWK04], [Guo05], [GWK+09].

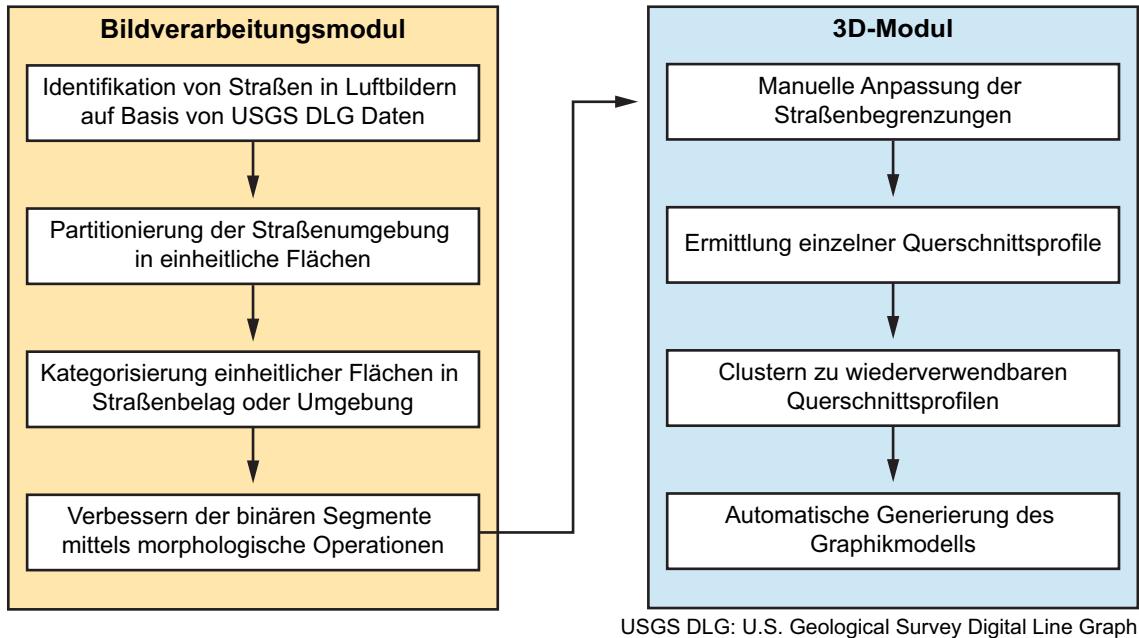


Bild 3-8: Das Framework zur Generierung von Umgebungsmodellen im Überblick nach [GWK+09, S. 821] (übersetzt).

Das Bildverarbeitungsmodul berechnet geometrische Begrenzungen von Straßenverläufen. Bild 3-9 zeigt die Teilergebnisse der dabei eingesetzten Bildverarbeitungstechniken. Diese bewältigen die folgenden Aufgaben [Guo05, S. 69ff.], [GWK+09]:

- **Identifikation von Straßen in Luftbildern:** Objekte algorithmisch in Rasterbildern zu erkennen ist ein bekanntes, komplexes Problem [Tön05, S. 17ff.]. GUO setzt zur Identifikation einzelner Straßenverläufe in Luftbildern das Straßennetz aus der digitalen Karte ein. Dafür wird die digitale Karte zunächst mit den Luftbildern registriert. Daraus ergeben sich Bildbereiche, die Straßen und deren nähere Umgebung darstellen. Eine aufwändige und fehleranfällige Klassifizierung wird dadurch vermieden. Weitere Bildverarbeitungsmechanismen werden nur in diesen Bildbereichen angewandt; die übrigen Bildbereiche werden nicht berücksichtigt.
- **Partitionieren der Straßenumgebung in einheitliche Flächen:** In dem Ansatz von GUO wird der Anteil an manueller Tätigkeit maßgeblich von der Genauigkeit beeinflusst, mit der Straßenbegrenzungen automatisch erkannt werden. Zur Ermittlung einheitlicher Flächen werden die Luftbilder zunächst in das HSI-Farbmodell⁴⁷ transformiert. Anschließend wird der Mean-Shift Algorithmus

⁴⁷ Der HSI-Farbmodell codiert Farbe mit dem Farbton (engl. *hue*), der Farbsättigung (engl. *saturation*) und der Lichtintensität (engl. *intensity*).

[CM97] angewandt, der zusammenhängende Areale in den Histogrammen⁴⁸ der Luftbilder identifiziert. Die entsprechenden Flächen in den Luftbildern sind damit einheitlichen Klassen zugeordnet.

- **Kategorisierung:** Auf Basis der Annahme, dass sich die Farbsättigungen von Straßenbelag und der Umgebung unterscheiden, werden die einheitlichen Klassen des vorangegangenen Schritts kategorisiert. Dabei werden die durchschnittlichen Farbsättigungen der einzelnen Klassen absteigend sortiert. Am Übergang zwischen Farbsättigungen, die Straßenbelag zugeordnet sind und solchen die der Umgebung zugeordnet sind, ist ein signifikanter Wertesprung zu erkennen. Dieser Sprung kategorisiert die einheitlichen Flächen in Straßenbelag oder Umgebung. Es resultieren daher binäre Segmente.
- **Verbessern der binären Segmente:** Die binären Segmente enthalten Fehler. Aufgrund von Bildrauschen existieren falsch kategorisierte Flächen in einzelnen Segmenten. So existieren kleine Objekte in Segmenten, die als Straßenbelag kategorisiert wurden, und Segmente, die als Umgebungen kategorisiert wurden, weisen Lücken auf. Zur Korrektur werden morphologische Operationen⁴⁹ eingesetzt: Durch morphologisches Öffnen (engl. *opening*) werden fehlerhafte Objekte aus den Segmenten entfernt, die als Straßenbelag kategorisiert wurden; die Form und Größe der Segmente bleibt dabei erhalten. Das morphologische Schließen (engl. *closing*) füllt die Lücken in den Segmenten, die als Umgebung kategorisiert wurden. Das Segmentierungsergebnis wird dadurch insgesamt verbessert (Bild 3-9, unten).

⁴⁸ Ein Histogramm ist eine Funktion, die für jeden Intensitätswert in einem Bild angibt, wie häufig dieser vorkommt [Tön05, S. 134]

⁴⁹ Unter Morphologie eines Segments werden Eigenschaften wie die Ausdehnung oder die Anzahl der Löcher zusammengefasst; Morphologie betrifft die Gestalt oder die Form eines Segments. Morphologische Operationen sind Bildverarbeitungsoperationen, die zur Veränderung der Form, zur Suche nach Formen und zur Bestimmung von Merkmalen einer Form eingesetzt werden [Tön05, S. 275ff.].

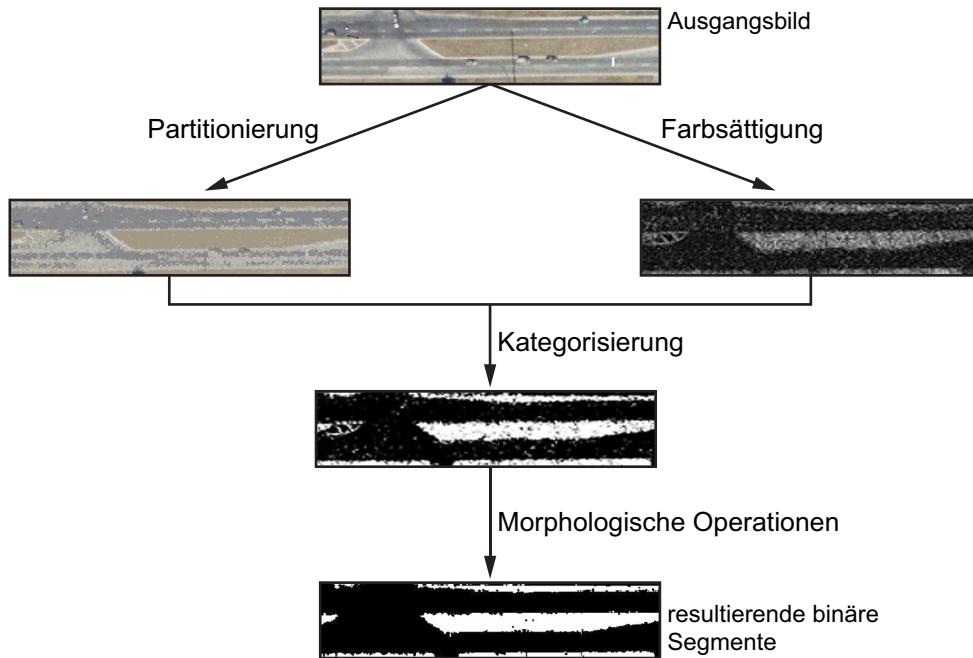


Bild 3-9: Resultierende Bilder der einzelnen Bildverarbeitungsschritte zur binären Segmentierung zwischen Straßenbelag und Umgebung nach [GWK+09, S. 823] (übersetzt).

Der Aufbau des Umgebungsmodells basiert auf den Ergebnissen der Bildverarbeitung und erfolgt teilautomatisiert. Der Ansatz von GUO gliedert sich dabei in vier Schritte [Guo05, S. 69ff.], [GWK+09]:

- **Manuelle Anpassung der Straßenbegrenzungen:** Straßenbegrenzungen werden zwar automatisch aus der binären Segmentierung berechnet, der berechnete Verlauf weicht jedoch teilweise vom realen Verlauf ab. Diese Abweichungen sind manuell auszugleichen: GUO stellt dazu ein Software-Werkzeug vor, das eine einfache Anpassung der Straßenbegrenzung ermöglicht.
- **Ermittlung einzelner Querschnittprofile:** Der Querschnitt von Straßen ist durch einzelne Querschnittprofile entlang der Referenzlinie beschrieben. Die Referenzlinie wird zunächst in definierten Abständen abgetastet. Anschließend werden orthogonal zur Referenzlinie Schnittpunkte mit den Straßenbegrenzungen berechnet, die das Querschnittprofil definieren. Die Schnittpunkte werden in einer Vektordarstellung gespeichert.
- **Clustern zu wieder verwendbaren Querschnittprofilen:** Da aufeinanderfolgende Querschnittprofile häufig sehr ähnlich sind, können diese vereinheitlicht und wiederverwendet werden. Zur Identifikation ähnlicher Querschnittprofilen verwendet der Autor einen bestehenden Cluster-Algorithmus. Die Anzahl möglicher Querschnittprofile wird dadurch verringert. Die entstehende Straßengeometrie wirkt dadurch gleichmäßig. Die Querschnittprofile entlang der Referenzlinie definieren das Logikmodell in dem Ansatz von GUO.

- **Automatische Generierung des Graphikmodells:** Aus den Querschnittprofilen entlang der Referenzlinie wird das Graphikmodell generiert. Da in den eingesetzten Geodaten keine Informationen über Fahrbahnmarkierungen vorhanden sind, leiten die Autoren diese Informationen aus Gestaltungsrichtlinien des Straßenbaus ab. Die typische Fahrstreifenbreite, die typische Breite für Fahrbahnmarkierungen sowie unterschiedliche Fahrbahnmarkierungen werden dabei berücksichtigt. Ferner wird angenommen, dass Fahrbahnen durch Grünflächen getrennt sind. Bild 3-10 zeigt das Vorgehen exemplarisch: Ausgangspunkt sind die Straßenbegrenzungen aus den vorangegangenen Berechnungen. Daraus werden Facettenmodelle generiert und entsprechend der genannten Informationen eingefärbt.

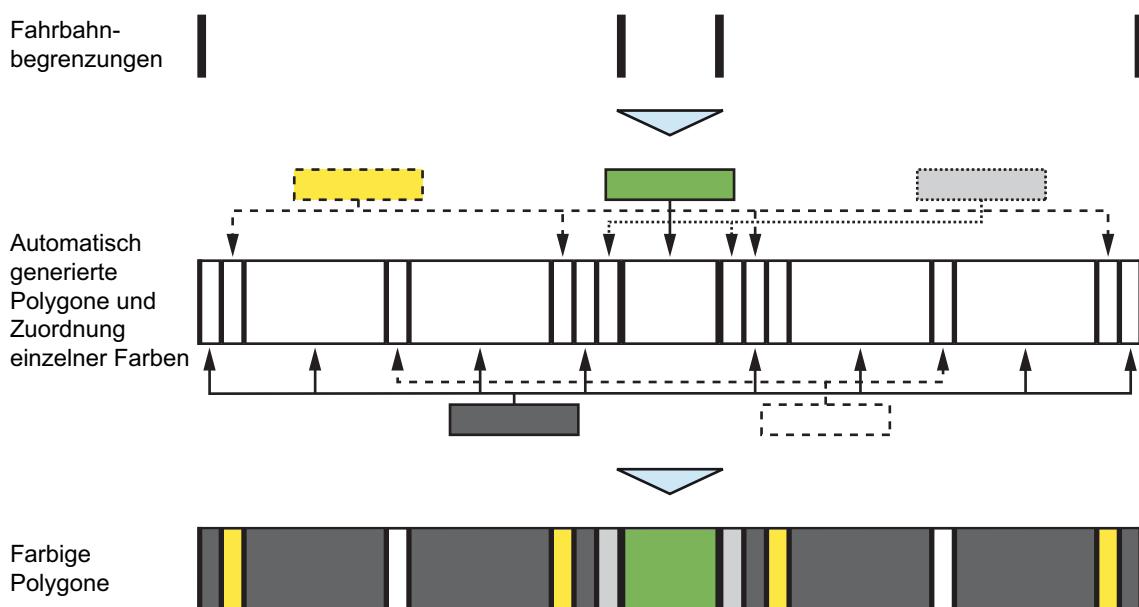


Bild 3-10: Generierung eines farbigen Straßenverlaufs nach [Guo05, S. 68] und [GWK+09, S. 826].

Das Framework wurde für einen Bereich des Campus der University of Central Florida erprobt. Das eingesetzte Straßennetz entstammt der USGS Digital Line Graph (USGS DLG, vgl. Anhang A2). Ferner wurden Orthophotos mit einer Auflösung von 20 cm - 30 cm je Pixel eingesetzt. Verglichen mit manuell angefertigten Straßenbegrenzungen konnte die automatisierte Methode eine durchgängig hohe Genauigkeit erzielen, Abweichungen müssen dementsprechend selten korrigiert werden.

Bewertung

Die Arbeit von GUO adressiert die automatisierte Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle. Die Methode fokussiert dabei die Generierung hochdetaillierter Straßenbegrenzungen aus Luftbildern. Die zu diesem Zweck eingesetzten Geodaten sind sicherlich als korrekt einzuschätzen. Ein wesentlicher Beitrag des Autors ist die Registrierung des Straßennetzes mit Luftbildern, um den Suchraum innerhalb der Luftbilder signifi-

kant einzuschränken. Das Vorgehen ist insgesamt systematisch und läuft zu großen Teilen automatisch. Die Arbeit liefert daher wichtige Grundlagen. Vollständige Umgebungsmodelle zur interaktiven Fahrsimulation werden jedoch nicht gebildet. Die eingesetzten Geodaten sind dafür unzureichend, die entstehenden Teilmodelle dementsprechend einfach gehalten: Detaillierte Fahrdynamiken lassen sich durch das Logikmodell nicht adäquat anregen und das Graphikmodell bleibt auf den Straßenverlauf beschränkt.

3.2.3 Einsatz eines Geo-Informationssystems zur Bildung von Umgebungsmodellen nach HAUNERT et al.

HAUNERT et al. setzen ein kommerzielles Geo-Informationssystem zur *Definition, Administration und Bearbeitung von Simulationsszenarien* ein. Die Autoren unterscheiden zwischen der Simulationswelt und einzelnen Simulationsszenarien. Die Simulationswelt besteht aus einer digitalen Karte, die im Geo-Informationssystem aufgebaut, angezeigt und bearbeitet wird. Dabei werden Navigationsdaten und Stadtmodelle eingesetzt. Die Simulationswelt soll sämtliche Informationen zur Generierung von Simulationsszenarien enthalten. Diese sind Ausschnitte der digitalen Karte: Simulationsszenarien beschreiben ausgewählte Verkehrswege für einzelne Versuchsfahrten im Simulator. Dabei beinhalten Simulationsszenarien sowohl das Umgebungsmodell, als auch Beschreibungen für Ereignisse entlang des Streckenverlaufs [HBN05].

Die Geodaten zum Aufbau der Simulationswelt werden in einem kommerziellen Geo-Informationssystem verarbeitet. Das bestehende System wurde um Softwaremodule erweitert, damit die notwendigen Informationen zur Generierung von Umgebungsmodellen bereitgestellt werden können. Dies umfasst Funktionen zum Extrahieren von Informationen aus Geodaten und Dialoge mit denen ggf. fehlende Informationen manuell eingegeben werden können (Bild 3-11).

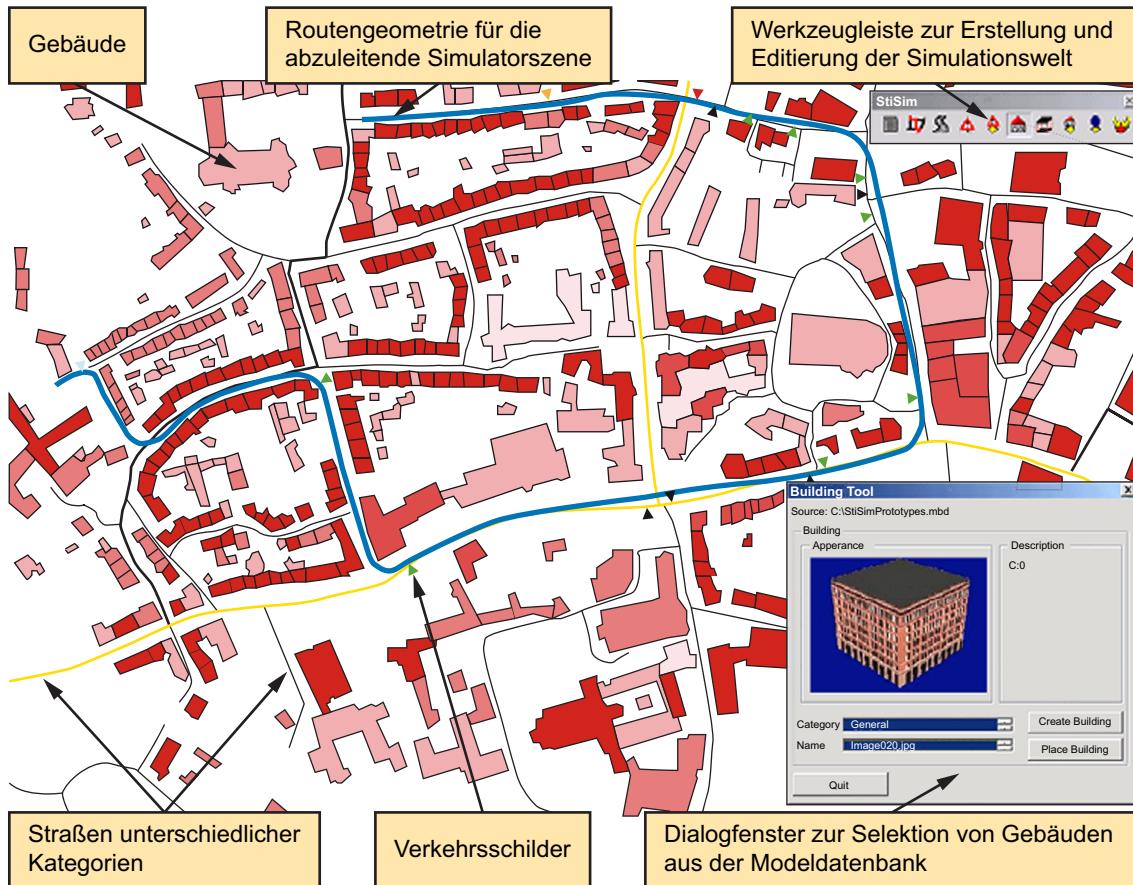


Bild 3-11: Aufbau, Anzeige und Bearbeitung der Simulationswelt in einem kommerziellen Geo-Informationssystem nach [HBN05].

Die Simulationswelt wird in folgenden Schritten aufgebaut [HBN05]:

- 1) **Aufbau des Straßennetzes:** Das Straßennetz wird als Graph repräsentiert. Im GIS wird der Graph entweder manuell aufgebaut oder mit Navigationsdaten weitgehend automatisiert generiert. Das System ermöglicht dabei entsprechende Daten zu laden und zu bearbeiten. So können Attribute von Straßen manuell korrigiert oder ergänzt werden. Für spätere Schritte werden Informationen auch automatisiert abgeleitet. Die Straßenkategorie wird bspw. verwendet, um die Straßenbreite und die Anzahl der Fahrstreifen abzuschätzen.
- 2) **Instanziierung von Standardgebäuden und Beschilderung:** Das Straßennetz wird im zweiten Schritt um Objekte erweitert. Dazu wurde das GIS über eine Schnittstelle an eine Datenbank gekoppelt, die 3D-Standardmodelle von Gebäuden und Verkehrsschildern enthält. Einzelnen Objekten wird dabei manuell eine Position auf der Karte zugewiesen. Die Autoren sprechen dabei von Instanziierung, da der Benutzer jedes Standardmodell beliebig oft verwenden darf. Das System unterstützt den Benutzer zudem bei der Platzierung von Verkehrsschildern entlang der Straße.
- 3) **Integration von Stadtmodellen:** Neben den Standardmodellen für Gebäude können auch Stadtmodelle in die Simulationswelt integriert werden. Dafür wurde ein eifa-

cher Mechanismus implementiert, der Grundrisse von Gebäuden gemäß der Gebäudehöhe extrudiert. Das resultierende 3D-Modell wird in das für das Simulationssystem benötigte Dateiformat exportiert und zusätzlich in der Datenbank gespeichert, um für spätere Simulationswelten zur Verfügung zu stehen.

- 4) **Definition von weiteren Objekten und Ereignissen:** Das Geo-Informationssystem wurde um ein generelles Datenmodell erweitert, um weitere Objekte in der Karte platzieren und spezifische Ereignisse auslösen zu können. Der Benutzer platziert in diesem Schritt beispielsweise statische Objekte wie Bäume und dynamische Ereignisse wie bewegte Fußgänger oder das Aufkommen von Nebel.

Einzelne Simulationsszenarien werden anschließend in drei aufeinanderfolgenden Vorgängen extrahiert [HBN05]:

- 1) **Definition der Fahrstrecke:** Der Benutzer markiert im Geo-Informationssystem die für die Versuchsfahrt gewünschte Fahrstrecke. Das System beschränkt die Auswahl dabei auf eine lineare Route; ein vollständiges Straßennetz kann nicht ausgewählt werden. Die gewählte Route ist als eine Sequenz von Geraden entlang der Kanten des Graphen abgebildet. Auf dieser Basis generiert das System anschließend das Umgebungsmodell.
- 2) **Generierung der Straßengeometrie:** Das eingesetzte Simulationssystem bedingt eine Beschreibung der Straßengeometrie aus einer Kombination von Geraden, Kreisbögen und Klothoiden (vgl. Abschnitt 2.3.2.1). Dementsprechend muss die Sequenz von Geraden durch diese Elemente angenähert werden. HAUNERT et al. stellen dazu ein zweistufiges Verfahren vor: Zuerst werden überflüssige Geraden aus der Sequenz entfernt, die nahezu kollinear verlaufen; DOUGLAS und PEUCKER stellen dafür einen entsprechend Algorithmus bereit [DP73]. Anschließend werden aufeinanderfolgende Geraden mit einer Sequenz aus Klohoide, Kurve und Klohoide verbunden; MEEK und WALTON zeigen, dass dies immer möglich ist und liefern die entsprechende Mathematik zur Berechnung der Parameterwerte der Gestaltungselemente [MW89]. Als Resultat entsteht eine mathematisch definierte Referenzlinie aus einer Folge von Gerade, Klohoide, Kreisbogen, Klohoide und Gerade. Im nächsten Schritt wird die Umgebung entlang des mathematisch definierten Streckenverlaufs generiert.
- 3) **Generierung der Umgebung:** Durch die Annäherung des Straßenverlaufs ist die beschriebene Strecke nicht mehr geometrisch konsistent mit der digitalen Karte. Die Umgebungselemente (Straßenschilder und Gebäude) müssen daher in das lokale Koordinatensystem transferiert werden. Dazu ist eine Registrierung entlang des Straßenverlaufs notwendig. HAUNERT et al. verwenden dabei eine Registrierungsmethode, die alle Objekte im ursprünglichen Abstand orthogonal zum Streckenverlauf platziert.

Bewertung

Die Arbeit von HAUNERT et al. adressiert die effiziente Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für ein spezifisches Simulationssystem. Die Beschreibung konzentriert sich auf Softwaremodule, die an ein bestehendes Geo-Informationssystem gekoppelt sind und spezifische Aufgaben zu Teilen automatisieren. Die Autoren beschreiben in diesem Zusammenhang ein Verfahren zur Approximation von Graphen mit den Gestaltungselementen von Lageplänen. Dies ist als wichtige Grundlagenarbeit einzuschätzen. Ein systematisches Vorgehen zum Aufbau der Umgebungsmodelle ist zu erkennen. Die eingesetzten Geodaten sind für den vollständigen Aufbau von Umgebungsmodellen jedoch unzureichend: Es fehlt zumindest ein Höhenprofil; die generierten Modelle sind plan. Darüber hinaus ist das entstehende Graphikmodell sehr einfach gestaltet und für interaktive Fahrsimulation nur bedingt geeignet.

3.2.4 Bildung von Umgebungsmodellen nach DRESIA, BILDSTEIN und RANDT

Im Kontext der Entwicklung kommerzieller Ausbildungssimulatoren bei der Rheinmetall Defence Electronics GmbH beschreiben DRESIA, BILDSTEIN und RANDT die Bildung von Umgebungsmodellen [Ran03], [DB06b], [RBK07]. Dabei werden verschiedene Quelldaten integriert. Bei Quelldaten wird zwischen 3D-Graphikmodellen aus einer umfassenden Modelldatenbank und Geodaten unterschieden. Die eingesetzten Geodaten sind digitale Karten, Gelände- und Landschaftsmodelle sowie Luft- und Satellitenbilder [Ran03], [DB06b]; 3D-Stadtmodelle gewinnen zunehmend an Bedeutung [RBK07]. Bei der Modellbildung werden zudem Richtlinien zur Anlage von Straßen und die Straßenverkehrsordnung berücksichtigt. Die Tätigkeiten zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulation sind in drei aufeinanderfolgenden Phasen zusammengefasst [Ran03], [RBK07]:

- **Trassengenerierung:** Voraussetzung für die Modellbildung ist, dass das nachzubildende Übungsgebiet definiert ist. Für dieses Gebiet werden die Verkehrswege manuell modelliert. Straßen werden dabei als Vektoren eingegeben und um das Querschnittprofil erweitert. Einzelne Umgebungsmerkmale aus der Modelldatenbank (bspw. Bäume, Verkehrszeichen usw.) werden anschließend ebenfalls manuell in der Umgebung platziert. Der Modellierer wird insgesamt durch unterlegte maßstabsgerechte Karten unterstützt. Aus den eingegebenen Daten wird abschließend das Graphikmodell generiert.
- **Steuerdatenerzeugung:** Aus den Geometriebeschreibungen der vorherigen Phase werden Steuerdaten erzeugt und manuell erweitert. Diese kapseln im Wesentlichen das Logikmodell und Beschreibungen von dynamischen Ereignissen entlang des Streckenverlaufs. Dabei müssen große Teile des Logikmodells (bspw. Abbiegerelationen und Informationen zu Verkehrszeichen) manuell erzeugt werden.

- **Verifikation:** Die entstehenden Teilmodelle werden visuell verifiziert. Dafür wird das Graphikmodell mit den abstrakten Steuerdaten überlagert, um mögliche Fehler und Inkonsistenzen erkennen zu können.

Bewertung

Die Arbeiten adressieren die Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für interaktive Fahrsimulationen. Die grundsätzlich eingesetzten Geodaten sind sicherlich als korrekt einzuschätzen; es fehlen lediglich Navigationskarten, die einen hohen Informationsgehalt für die automatisierte Generierung der Steuerungsdaten bereitstellen könnten. Insgesamt erfolgt die Modellbildung zwar weitgehend systematisch, einzelne Methoden, Verfahren oder Hilfsmittel werden jedoch nicht beschrieben. Es bleibt damit unklar, zu welchem Zweck und wie einzelne Geodaten eingesetzt werden.

3.2.5 SimWorld – Automatische Landschaftsgenerierung für Fahrsimulationen

Das Projekt SimWorld⁵⁰ verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz zur automatisierten Generierung virtueller Landschaftsmodelle für Fahrsimulationen. Ziel ist dabei die Entwicklung eines Verarbeitungsschemas (engl. *processing scheme*), das Geodaten sowie geographische und verkehrstechnische Kenntnisse bei der Bildung virtueller Landschaftsmodelle berücksichtigt. Im Fokus der bisherigen Arbeiten stehen die Identifikation geeigneter Geodaten- und Informationsquellen sowie erste Ansätze zu deren Integration [SFK+07], [RLK09].

Vor dem Hintergrund einer weltweit flächendeckenden Verfügbarkeit identifizieren SPARWASSER et al. vier Typen von Geodaten- und Informationsquellen, die grundsätzlich zur Generierung virtueller Landschaften für Fahrsimulationen geeignet sind [SFK+07]:

- 1) **Topographische Information:** Unter topographischer Information wird hier Höheninformation verstanden. Grundlage des virtuellen Landschaftsmodells ist ein digitales Geländemodell, das im Bereich des Straßenverlaufs geglättet wird. Ein digitales Oberflächenmodell soll zur Ableitung spezifischer Höhenwerte für Gebäude oder andere Objekte eingesetzt werden.
- 2) **Texturinformation:** Unter Texturinformation werden hier Satellitenfotos verstanden. Diese werden lediglich als Informationsquelle eingesetzt, um Details der Umgebung (beispielsweise Umzäunungen) zu identifizieren und entsprechende 3D-

⁵⁰ SimWorld ist ein Verbundprojekt des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums (DLR). Beteiligt ist das Institut für Verkehrssystemtechnik, Automotive Systeme (Braunschweig) sowie das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (Oberpfaffenhofen).

Modelle in der virtuellen Landschaft zu platzieren. Die Autoren bezeichnen diesen Schritt durch den Einsatz von Bildverarbeitungsverfahren als automatisierbar.

- 3) **Geo-Informationssysteme:** Die Verwendung von Geo-Informationssystemen beschränkt sich auf zwei Typen. Erstens, kommerzielle digitale Karten, die zur Fahrzeugnavigation eingesetzt werden. Derartige Karten bieten detaillierte Informationen über das Verkehrsnetz. Zweitens, digitale Landschaftsmodelle, die zur Beschreibung der Landflächennutzung eingesetzt werden. Diese sollen zur Visualisierung großflächiger Regionen eingesetzt werden.
- 4) **Regelwerk:** Dieses soll geographische und verkehrstechnische Kenntnisse in das Verarbeitungsschema integrieren. Diese Regelwerke automatisieren die Auswahl und Platzierung geeigneter 3D-Modelle (Vegetation, Gebäude etc.) in der virtuellen Landschaft. Autobahnen in geringer Entfernung zu Wohngebieten sollen beispielsweise automatisch mit Lärmschutzwänden versehen werden.

Auf Basis dieser grundsätzlich geeigneten Quellen konkretisieren RICHTER et al. die eingesetzten Geodaten (Bild 3-12). Aus diesen Daten werden Umgebungsmodelle gebildet, die sowohl Teilmodelle für Logik, als auch für Graphik beinhalten. Die Umgebungsmodelle erfüllen die spezifischen Anforderungen von Fahrsimulationen. Die prototypische Umsetzung der SimWorld Konzepte wird als Hilfsmittel in einem generischen Prozess zur Entwicklung und Validierung von Assistenzfunktionen im Fahrzeug eingesetzt [RLK09].

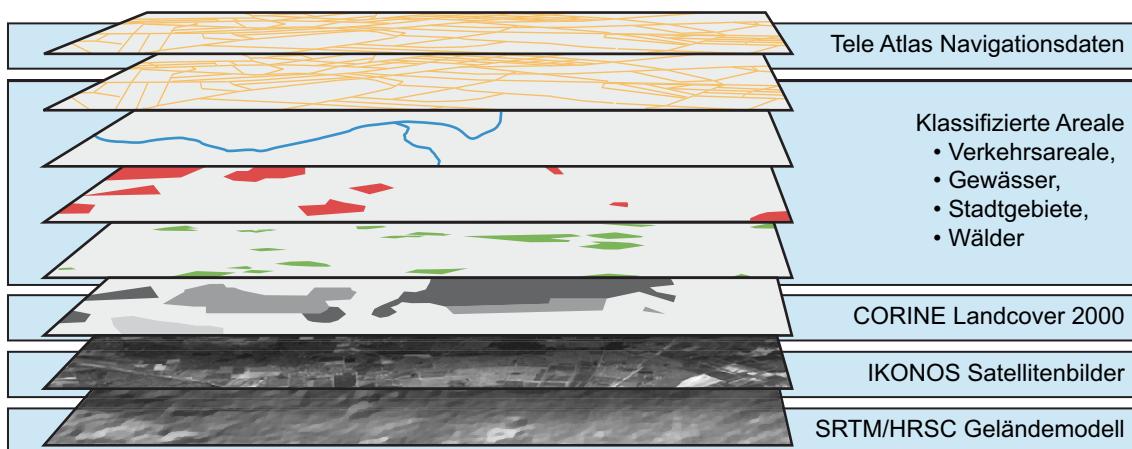


Bild 3-12: Zur Bildung von Umgebungsmodellen integrierte Geodaten nach [RLK09, S. 170].

Bewertung

Die Konzepte in SimWorld adressieren die effiziente Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle, die die spezifischen Anforderungen von Fahrsimulationen berücksichtigen. RICHTER et al. beschreiben ferner allgemeine Ansätze zur Integration von SimWorld in die Entwicklung von Assistenzfunktionen im Fahrzeug.

Die identifizierten Typen von Geodaten- und Informationsquellen sind sicherlich korrekt. Es wird jedoch weder ein Vorgehensmodell zur Generierung der Umgebungsmodelle beschrieben, noch werden konkrete Hilfsmittel oder Methoden zur Geodatenintegration genannt. Darüber hinaus lassen die konkret eingesetzten Geodaten ein hohes Maß manueller Tätigkeiten vermuten, um Umgebungsmodelle zu bilden. Die Auflösung des eingesetzten digitalen Geländemodells (vgl. Anhang A2) ist beispielsweise keinesfalls ausreichend, um den Straßenverlauf adäquat automatisch abzuleiten. Zudem ist eine automatische Ableitung von Informationen aus Satellitenfotos keineswegs trivial und bedürfte detaillierter Beschreibungen. Die konkrete Umsetzung der Konzepte wird lediglich erwähnt; bestehende Standards wurden dabei allerdings berücksichtigt.

3.2.6 Geodaten basierte Modellierung realer Straßen nach DESPINE und BAILLARD

Im Rahmen des Verbundprojekts PlatSim⁵¹ haben DESPINE und BAILLARD auf Basis spezifischer Geodaten eine Methode zur automatisierten Nachbildung realer Straßen entwickelt. Ziel ist, realistische Umgebungsmodelle von Stadtgebieten für Trainings- und Ausbildungssimulationen zu bilden. Im Fokus der Arbeiten stehen eine rein Graph basierte Repräsentation des Umgebungsmodells sowie ein Verfahren zur automatisierten Integration spezifischer Geodaten [DB11].

Verschiedene Graphen repräsentieren das Umgebungsmodell in zueinander konsistenten Schichten. Die wesentlichen Eigenschaften der einzelnen Graphen sind in einer Basisstruktur definiert: Knoten repräsentieren Verknüpfungen; Kanten sind gerichtete Verbindungen zwischen Knoten, ihre Geometrie wird durch Linienzüge beschrieben; Domänen beschreiben Flächen zwischen Kanten, bspw. die Oberflächenstruktur einer Straße. Abgeleitet von dieser Basisstruktur unterscheiden DESPINE und BAILLARD drei Graphen, die jeweils eine Schicht darstellen [DB11]:

- Die **Netzwerkschicht** beinhaltet die Topologie und die einfache Geometrie des Straßennetzes. Lediglich Referenzlinien von Straßen werden geometrisch mittels Linienzügen beschrieben. Zudem werden Attribute, die Verkehrsregeln und Vorfahrtsregeln charakterisieren, an die einzelnen Elemente des Graphen annotiert.
- Die **Verkehrsschicht** liefert Informationen an den Fremdverkehr. Der entsprechende Graph ergänzt die Netzwerkschicht um geometrische und logische Beschreibungen von Fahrstreifen und Verkehrsknoten.
- Die **Graphik- und Physikschicht** liefert Informationen an das Visualisierungssystem und die Fahrdynamik. Diese Schicht beinhaltet dafür texturierte 3D-

⁵¹ PlatSim wird durch das Innovationscluster „Images und Réseaux“ und die Region Bretagne gefördert.

Modelle von Fahrbahnoberflächen, Straßenmöbeln, Gebäuden, Vegetation und weiteren Objekten.

Zur Konsistenzsicherung sind einzelne Elemente der unterschiedlichen Graphen über Schichtgrenzen miteinander verknüpft (Bild 3-13).

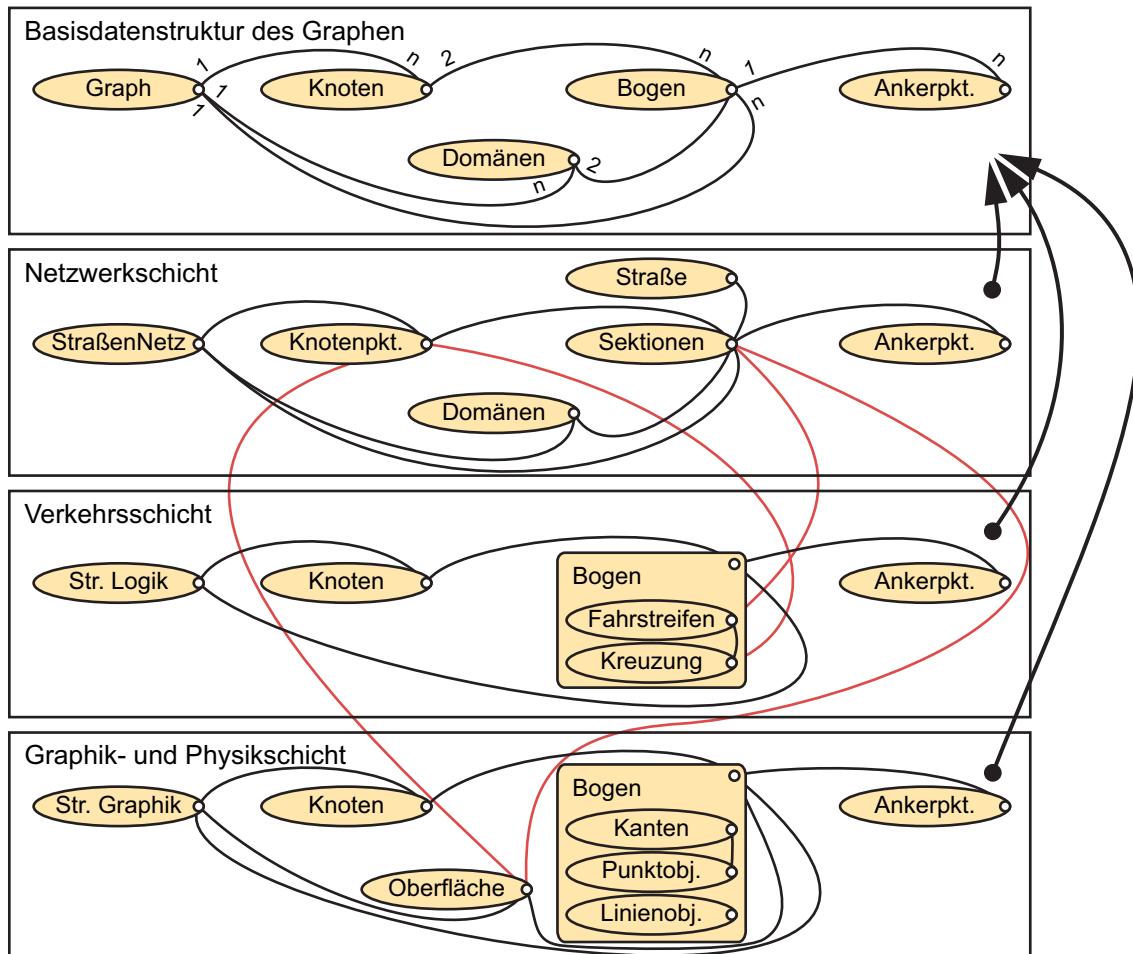


Bild 3-13: Mehrschichtenrepräsentation als Graph und Vererbungsstruktur nach [DB11, S. 437].

Das Umgebungsmodell wird weitgehend automatisch generiert. Die einzelnen Graphen werden dazu auf Basis von spezifischen Geodaten aufgebaut. Dabei werden Navigationsdaten, ein digitales Geländemodell, Gebäudegrundrisse sowie ein digitales Landschaftsmodell eingesetzt. Zur Integration dieser Daten schlagen DESPINE und BAILLARD folgendes Verfahren vor [DB11]:

- 1) **Aufbau des Verkehrsnetzes:** Die Netzwerkschicht wird aus der Navigationskarte und den Straßenverläufen des Landschaftsmodells generiert. Zunächst werden die entsprechenden Daten registriert; Attribute der Navigationsdaten werden dabei dem Straßenverlauf im Landschaftsmodell zugeordnet. Anschließend werden die Attribu-

te interpretiert: Es werden Regeln eingesetzt, um beispielsweise die Anzahl an Fahrstreifen aus der Straßenkategorie und der zulässigen Geschwindigkeit abzuschätzen.

- 2) **Definition und Verknüpfung von Fahrstreifen:** Einzelne Fahrstreifen werden hier durch einfache Regeln geometrisch erzeugt und an Verkehrsknoten topologisch und geometrisch verknüpft.
- 3) **Generierung des Graphikmodells:** Das Graphikmodell wird vollständig aus den Informationen der zwei übergeordneten Schichten generiert. Dabei werden zunächst die Straßenränder durch Polygonmodelle abgebildet, anschließend der Höhenverlauf der Straße aus dem Höhenmodell abgeleitet und Fahrbahnmarkierungen eingefügt. Abschließend werden regelbasiert Objekte wie Verkehrsmobiliar, Gebäude und Vegetation platziert.

Die Methode wurde exemplarisch für einen Stadtteil von Lyon durchgeführt und das entstandene Umgebungsmodell in einem Ausbildungssimulator erprobt.

Bewertung

Die Arbeiten von DESpine und BAILLARD adressieren die effiziente Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle. Die Methode ist systematisch und weitgehend automatisiert. Die eingesetzten Geodaten sind für den Aufbau von Umgebungsmodellen sehr gut geeignet. Insgesamt ist die Arbeit sehr interessant: Die im Groben beschriebene Methode ist sicherlich als richtig einzuschätzen; die Beschreibung der eingesetzten Hilfsmittel bleibt jedoch sehr oberflächlich. Die resultierenden Umgebungsmodelle eignen sich darüber hinaus aufgrund der Repräsentation als Graph nicht zur realistischen Simulation des Fahrzeugverhaltens: Im Unterschied zu bestehenden Standards fehlt eine mathematische Beschreibung der Straße.

3.3 Software-Werkzeuge zur Bildung von Umgebungsmodellen

Zur Modellbildung virtueller Umgebungen ist heute eine Vielzahl von Software-Werkzeugen verfügbar. Einzelne 3D-Modelle werden seit langem mit **klassischen Modellierungswerkzeugen**, wie Autodesk 3ds Max [Aut11-ol], Blender [Ble12-ol] oder Google SketchUp [Goo12-ol], modelliert; dabei wird das Facettenmodell häufig aus vorhandenen CAD-Daten abgeleitet. Klassische Modellierungswerkzeuge fokussieren Graphikmodelle und setzen zu deren Bildung kaum Geodaten ein.

Zur Bildung ausgedehnter virtueller Landschaften (Graphikmodell) existieren ferner spezielle Software-Werkzeuge wie 3D Natures Visual Nature Studio [3DN12-ol] etabliert. Derartige Systeme nutzen selbstverständlich Geodaten und bieten Komfortfunktionen, bspw. zur automatischen Verteilung von Vegetation in der Landschaft. Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen fokussieren jedoch nicht auf ausgedehnte Landschaften sondern auf das Verkehrsnetz und dessen nähere Umgebung.

Dieses Kapitel stellt Software-Werkzeuge vor, die heute explizit zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen eingesetzt werden. Die einzelnen Systeme sind nach Anwendungsschwerpunkten in drei Bereiche geordnet⁵²: Abschnitt 3.3.1 beschreibt zunächst Systeme, die zur Bildung von Umgebungsmodellen für allgemeine interaktive visuelle Simulationen eingesetzt werden. Abschnitt 3.3.2 stellt Systeme vor, deren Anwendungsschwerpunkt explizit auf der interaktiven Fahrsimulation liegt. Schließlich werden Software-Werkzeuge beschrieben, die zur Bildung von Umgebungsmodellen für technische Simulationen in der Fahrzeugentwicklung eingesetzt werden (Abschnitt 3.3.3).

3.3.1 Anwendungsschwerpunkt: Interaktive visuelle Simulationen

Heute werden spezielle Software-Werkzeuge zur Bildung von Umgebungsmodellen mit ausgedehnten Landschaften eingesetzt. Derartige Umgebungsmodelle werden mehrheitlich für interaktive visuelle Simulationen wie Flugsimulationen oder militärische Bodensimulationen benötigt. Die im Folgenden beschriebenen Software-Werkzeuge eignen sich jedoch ebenso zur Bildung von Umgebungsmodellen für interaktive Fahrsimulationen.

Creator (Presagis)

Presagis Creator ist ein Software-Werkzeug zur Bildung von texturierten 3D-Facettenmodellen für interaktive visuelle Simulationen mit dem Schwerpunkt Flugsimulation. In diesem Bereich geht es weit über klassische Modellierungswerkzeuge hinaus: Creator bietet zahlreiche spezielle Funktionen zur effizienten Bildung von 3D-Modellen, die unmittelbar im Simulationssystem verwendet werden können. Dies beinhaltet bspw. die automatische Generierung verschiedener Level of Detail (vgl. Abschnitt 2.3.2.2) oder die Reduzierung der Polygonzahl zur Leistungssteigerung. Darüber hinaus können auf Geodaten basierende Landschaftsmodelle aus einem verwandten Software-Werkzeug von Presagis verarbeitet werden [Pre11-ol].

Zwar liegt der Schwerpunkt von Creator auf der Bildung einzelner 3D-Modelle; durch Erweiterung mit den *Creator Road Tools* können jedoch ebenso vollständige Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen aufgebaut werden. Die Erweiterung bietet dabei Funktionen zum Aufbau von Streckenabschnitten: Durch manuelle Eingabe von Parameterwerten (bspw. Krümmung eines Kreisbogens oder Länge einer Geraden) werden einzelne Streckenabschnitte definiert. Bild 3-14 zeigt die graphische Benutzungsschnitt-

⁵² Aufgrund erheblicher Überschneidungen im Funktionsumfang wird im Rahmen dieser Arbeit auf detaillierte Beschreibungen einzelner Systeme verzichtet. Dazu sei auf die Produktspezifikationen der Hersteller verwiesen. Die in diesem Kapitel eingesetzten Bilder stehen exemplarisch für Systeme eines Bereichs und sollen dem Leser einen Eindruck von Funktionalität und Benutzungsschnittstelle vermitteln.

stelle mit der entsprechenden Eingabemaske. Aus den Parameterwerten der Streckenabschnitte können texturierte 3D-Modelle abgeleitet und automatisch Level of Detail in beliebigem Detailgrad erstellt werden. Ferner werden Funktionen zur automatischen Platzierung sich wiederholender Dekorationsobjekte (bspw. Leitpfosten) angeboten. Steuerdaten wie der Verlauf von Fahrstreifen können aus den Parameterwerten der Strecken in verschiedene Formate ausgeleitet werden [Pre11-ol], [ZNC+10].

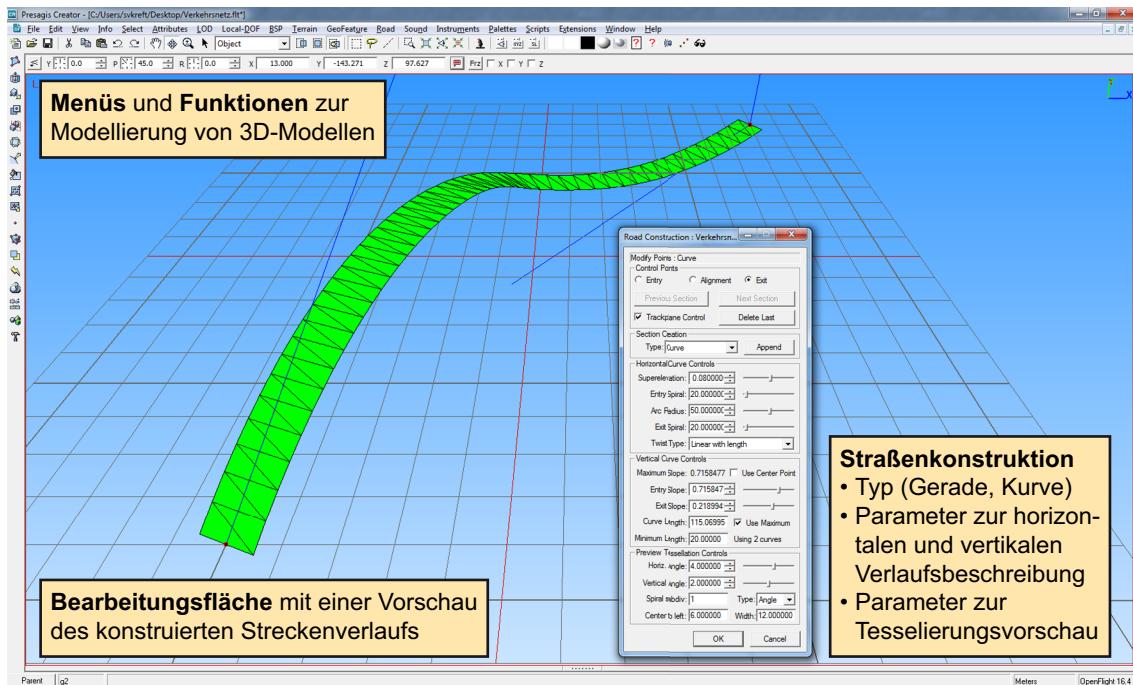


Bild 3-14: Graphische Benutzungsschnittstelle der Creator Road Tools. Die Eingabemaske ermöglicht ein manuelles Eingeben einzelner Parameterwerte.

Trian3D Builder (TrianGraphics)

Trian3D Builder ist ein Software-Werkzeug, das vorrangig zur Modellierung ausgedehnter Landschaften für interaktive visuelle Simulationen eingesetzt wird [KNW09, S. 87]. Es bietet dabei Funktionen zur Verarbeitung vielfältiger Geodaten. Ferner bietet es Spezialfunktionen, bspw. zur Texturierung der Landschaftsoberfläche auf Basis eines gegebenen Landschaftstyps oder zur automatischen Verteilung von Dekorationsobjekten [KNW09, S. 91ff.], [Tri11-ol].

Das Softwaremodul Trian 3D Roads erweitert Trian3D Builder um Funktionen zur Nachbildung von Verkehrsnetzen. Damit lassen sich vollständige Umgebungsmodelle für interaktive Fahrsimulationen bilden. Dariüber hinaus bietet die Software Funktionen zur automatischen Generierung von Verkehrsnetzen aus Geodaten: Straßen und Kreuzungen können dabei aus Navigationsdaten generiert werden; dies ist jedoch zunächst auf das Graphikmodell beschränkt. Zwar bietet Trian 3D Roads Funktionen, die auch den Aufbau eines Logikmodells ermöglichen, dabei werden jedoch keine Geodaten eingesetzt [Tri11-ol].

Bewertung

Creator und Trian3D Builder sind etablierte Software-Werkzeuge zur Bildung von Umgebungsmodellen für interaktive visuelle Simulationen. Geodaten können in verschiedenen Bereich eingesetzt werden, um geospezifische Umgebungsmodelle zu bilden, die weitgehend auch für interaktive Fahrsimulationen geeignet sind. Beide Lösungen bieten umfangreiche Funktionen, die den Benutzer bei der Modellbildung unterstützen. Damit eignen sich diese Werkzeuge sehr gut zur Erstellung und Bearbeitung von Graphikmodellen. Insgesamt liegt der Schwerpunkt dieser Software-Werkzeuge jedoch auf detaillierten Graphikmodellen; die Bildung des Logikmodells wird lediglich in Ansätzen unterstützt. Insgesamt fehlt es zudem an Beschreibungen, wie Umgebungsmodelle mit den einzelnen Software-Werkzeugen systematisch und effizient gebildet werden.

3.3.2 Anwendungsschwerpunkt: Interaktive Fahrsimulation

Dieser Abschnitt behandelt Software-Werkzeuge deren Anwendungsschwerpunkt explizit die Bildung von Umgebungsmodellen für interaktive Fahrsimulationen ist. Im Vergleich zu den bisher beschriebenen Lösungen werden dabei Umgebungsmodelle erstellt, welche die nähere Umgebung der Straße beinhalten; weitläufige Landschaften werden nicht abgebildet. Darüber hinaus sind die nachfolgend dargestellten Software-Werkzeuge mehrheitlich proprietär; sie dienen in erster Linie zur Bildung von Umgebungsmodellen für das entsprechende Simulationssystem des Herstellers.

START (Rheinmetall Defence Electronics)

Das Synthetic Terrain and Road Tool (START) wird bei Rheinmetall Defence Electronics zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulatoren (Straßen- und Schienenfahrzeuge) entwickelt und eingesetzt. Die Software setzt dabei die Methode von DRESIA, BILDSTEIN und RANDT um (vgl. Abschnitt 3.2.4). START besteht aus mehreren Komponenten; Bild 3-15 zeigt den schematischen Aufbau. Im Zentrum steht ein Quelldateneditor, der den Aufbau von Verkehrsnetzen ermöglicht. Dabei können Geodaten und verschiedene Quelldaten aus Standardwerkzeugen (bspw. Adobe Photoshop und Blender, Autodesk 3ds Max oder Presagis Creator) verarbeitet werden [Ran03], [Las09, S. 389ff.], [DB06b].

Die im Quelldateneditor eingegebenen Daten werden im Wesentlichen durch drei ergänzende Software-Komponenten automatisch zu Graphik- und Logikmodell (Steuerdaten) weiterverarbeitet. Der Polygongenerator dient dabei zur Erzeugung des eigentlichen Graphikmodells; dessen Szenengraph wird hinsichtlich einer hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit in der Graphikhardware mittels einer weiteren Komponente optimiert. Die dritte Komponente leitet die Steuerdaten für ein spezifisches Simulationssystem ab; die Steuerdaten sind dabei proprietär. Insgesamt garantiert die automatische Generierung der einzelnen Teilmodelle ein Höchstmaß an Korrelation [Las09, S. 390].

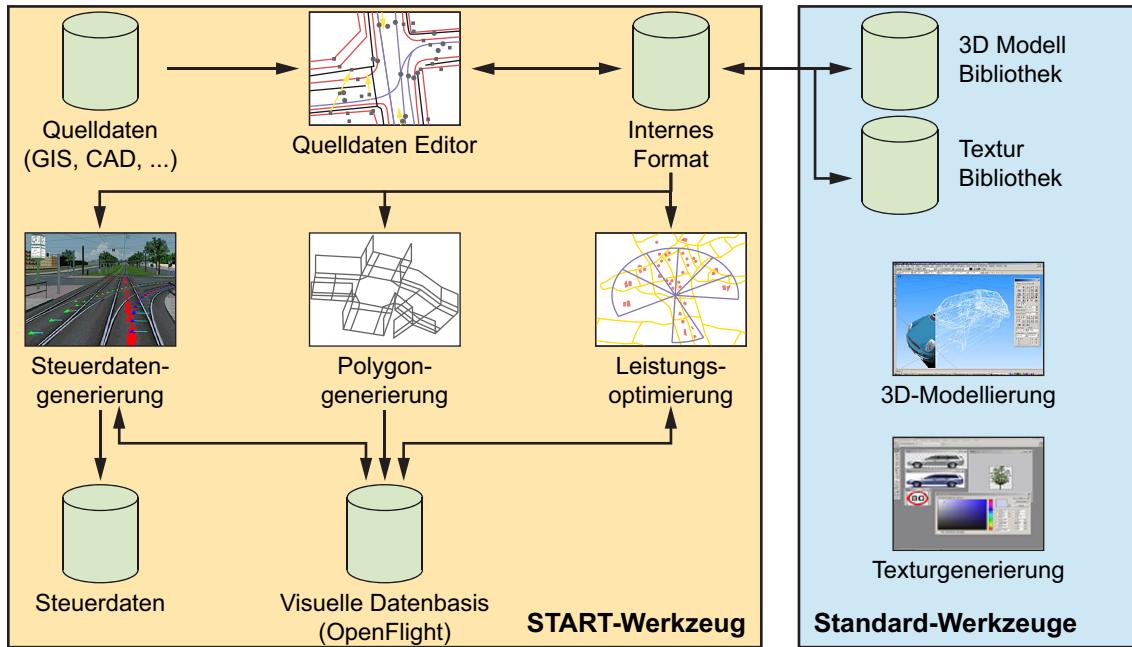


Bild 3-15: Funktionen und Bestandteile von START nach [Las09, S. 390].

SCANeR Studio (Oktal)

SCANeR Studio ist eine integrierte Simulationssoftware, die von Oktal entwickelt und vertrieben wird, um virtuelle Versuchsfahrten für Fahrsimulationen zu definieren. Dies beinhaltet auch eine Komponente zur Bildung von Umgebungsmodellen. Logikmodelle, die mit SCANeR Studio gebildet werden, implementieren die vollständige Spezifikation von RoadXML [Okt11-ol] (vgl. Abschnitt 2.3.2.1).

SCANeR Studio ermöglicht die Bildung von Logik- und Graphikmodell. Die Software stellt dabei umfangreiche Funktionen zur Erstellung und Bearbeitung des Logikmodells von Verkehrsnetzen bereit, die straßenbaulichen Richtlinien entsprechen. Darüber hinaus ermöglicht SCANeR Studio auch die Bearbeitung des Geländes und der Geländeoberfläche im Graphikmodell. Geodaten können von SCANeR Studio grundsätzlich verarbeitet werden [Okt11-ol].

ROD (Vires)

Das Software-Werkzeug ROD wird von Vires entwickelt und eingesetzt, um vollständige Umgebungsmodelle für interaktive Fahrsimulationen zu bilden. Das von ROD generierte Logikmodell setzt dabei die Spezifikation von OpenDRIVE (vgl. Abschnitt 2.3.2.1) vollständig um [Vir06-ol].

ROD sieht vor, zunächst das Logikmodell zu bilden. Die Software bietet dafür eine Vielzahl von Funktionen, um den Lage- und Höhenplan sowie das Querschnittprofil von Strecken entsprechend straßenbaulicher Richtlinien festzulegen. Darüber hinaus können entlang der Streckenverläufe automatisch Dekorationsobjekte platziert werden. Nach Fertigstellung des Logikmodells generiert ROD das Graphikmodell automatisch. Damit wird ein Höchstmaß an Korrelation zwischen den Teilmodellen garantiert. Die

Möglichkeiten von ROD Geodaten zu verarbeiten sind insgesamt jedoch stark eingeschränkt [Vir06-ol].

Road (Chalmers University of Technology)

Road ist eine freie Software, die im Rahmen von KURTEANU und KURTEANU an der Chalmers University of Technology (Göteborg) entwickelt wurde. Road ermöglicht die Bildung von Umgebungsmodellen, deren Logikmodell die Spezifikation von OpenDrive implementiert. Die Software bietet Funktionen zum Erstellen und Bearbeiten der einzelnen Komponenten des Logikmodells und zum automatischen Ableiten des Graphikmodells. Der Aufbau des Verkehrsnetzes erfolgt vollständig durch manuelle Festlegung einzelner Parameterwerte. Geodaten können nicht verarbeitet werden [KK10].

Roads (INRETS)

Die Forschungsabteilung für fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme des INRETS entwickelt eine Software (Roads) zur Bildung von Umgebungsmodellen, deren Logikmodell die Spezifikation von OpenDRIVE implementiert (vgl. Abschnitt 2.3.2.1). Streckenverläufe werden mit Roads manuell modelliert. Zur Unterstützung des Benutzers können dabei geospezifische Umgebungen als Hintergrundbild dargestellt werden; weitere Geodaten werden nicht verarbeitet. Roads ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt ein Entwicklungsprototyp [HGB+10].

Bewertung

Road und Roads sind bisher Software-Prototypen mit geringem Funktionsumfang, die das Logikmodell schließlich vollständig im offenen Format OpenDRIVE beschreiben sollen. Ziel ist, Alternativen zu kommerziellen Software-Werkzeugen wie START, SCAnE R Studio und ROD zu schaffen. Dies sind umfangreiche und ausgereifte Produkte, die zur Bildung von Umgebungsmodellen für interaktive Fahrsimulationen etabliert sind. Sie bieten weitreichende Funktionen, die den Benutzer bei der Modellbildung unterstützen. START und SCAnE R Studio können darüber hinaus Geodaten zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle einsetzen. Insgesamt sind sämtliche Software-Werkzeuge dieses Abschnitts von großer Bedeutung für die vorliegende Arbeit. Ihnen ist jedoch gemein, dass es bisher an einem Vorgehensmodell fehlt, das definiert, in welchen Schritten und mit welchen Geodaten Umgebungsmodelle systematisch und effizient gebildet werden.

3.3.3 Anwendungsschwerpunkt: Simulation von Fahrzeugsystemen

Zur Entwicklung und virtuellen Erprobung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme werden in Abhängigkeit des Entwicklungsfortschritts verschiedene Validierungsmethoden und -technologien eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). Für die frühen SIL- und HIL-Ansätze zur detaillierten **technischen Simulation** von Fahrzeugsystemen werden vorrangig integrierte Entwicklungsumgebungen verwendet, die im Kern hochdetaillierte

Fahrdynamik- und Fahrzeugmodelle bieten. Weitverbreitete Beispiele dafür sind die dSPACE Automotive Simulation Models sowie TESIS DYNAware ve-Dyna.

Derartige Entwicklungsumgebungen werden für einzelne Anwendungen konfiguriert. Dabei können die einzelnen Fahrzeugmodelle parametriert werden, um das Verhalten des virtuellen Prototyps zu beschreiben. Ferner kann mittels Parametern der Versuchsablauf definiert werden. Die Parametrierung erfolgt bei den Produkten von dSPACE und TESIS SYSware jeweils mit eigenständigen Software-Werkzeugen, die eine grafische Benutzungsschnittstelle bieten (dSPACE ModelDesk [dSP11-ol] und TESIS DYNAanimation [TES12-ol]). Diese Software-Werkzeuge ermöglichen ebenso die Bildung von Umgebungsmodellen, deren Streckenverlauf entsprechend straßenbaulicher Richtlinien detailliert modelliert werden kann. Beide Lösungen bieten in diesem Bereich ähnliche Funktionen zur Beschreibung des Umgebungsmodells: Es wird manuell eine Liste aufeinander folgender Segmente definiert und diese parametriert (Bild 3-16). Nach Fertigstellung dieses Logikmodells werden Funktionen zur automatischen Generierung einfacher Graphikmodelle angeboten. Dabei sind die entstehenden Graphikmodelle jedoch überwiegend auf den Streckenverlauf beschränkt [dSP11-ol].

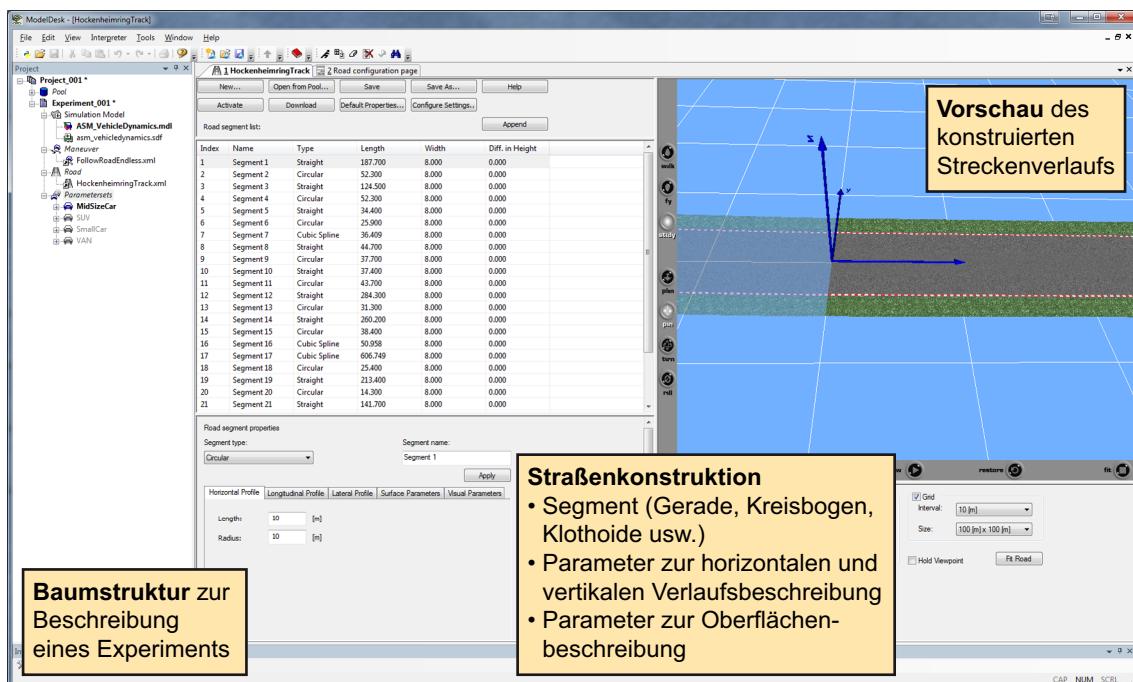


Bild 3-16: Graphische Benutzungsschnittstelle von ModelDesk (dSPACE). Einzelne Segmente des Streckenverlaufs werden über Parameterwerte in einer Tabelle definiert.

Bewertung

ModelDesk und DYNAanimation adressieren in hohem Maße das Virtual Prototyping von Fahrerassistenzsystemen. Derartige Software-Werkzeuge ermöglichen die Bildung von Umgebungsmodellen, bei denen das Logikmodell detailliert aufgebaut ist. Das

Graphikmodell bleibt jedoch auf den Streckenverlauf beschränkt. Die entstehenden Umgebungsmodelle eignen sich daher lediglich eingeschränkt für interaktive Fahrsimulationen. Darüber erfolgt die Modellbildung ohne den Einsatz von Geodaten; geospezifische Umgebungsmodelle zu bilden ist daher nur sehr eingeschränkt möglich.

3.4 Handlungsbedarf

Die Untersuchung des Stands der Technik zeigt, dass die vorhanden Methoden und Software-Werkzeuge zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen zu kurz greifen; Bild 3-17 zeigt die Bewertung der einzelnen Ansätze in der Übersicht. Im Folgenden wird der verbleibende Handlungsbedarf für die Anforderungen aus Abschnitt 2.6 identifiziert:

A1: Ausrichtung auf das Virtual Prototyping von Fahrerassistenzsystemen

Der überwiegende Teil der Methoden und Ansätze zur Bildung von Umgebungsmodellen betrachtet das Virtual Prototyping von Fahrerassistenzsystemen nicht. Dagegen werden Software-Werkzeuge, die zur technischen Simulation von Fahrzeugsystemen eingesetzt werden, naturgemäß für das Virtual Prototyping von Fahrerassistenzsystemen entwickelt. Diese adressieren jedoch vorrangig SIL- und HIL-Ansätze; interaktive Fahrsimulationen sind damit kaum möglich. Diese Software-Werkzeuge greifen daher zu kurz. Es fehlt eine Systematik, die relevante Validierungsmethoden und -technologien für Fahrerassistenzsysteme ganzheitlich berücksichtigt.

A2: Systematische Vorgehensweise

Die frühen Methoden zur Bildung von Umgebungsmodellen sind systematisch und zielgerichtet; es fehlt jedoch die Integration von Geodaten. Die untersuchten Software-Werkzeuge bieten zwar häufig Funktionen zur umfangreichen Verarbeitung von Geodaten, dabei fehlt jedoch ein systematisches Vorgehen. Die Ansätze nach WILKIE et al., GUO sowie DESPINE und BAILLARD stellen die Integration von Geodaten systematisch und in klar definierten Phasen dar; die dabei eingesetzten Methoden und Verfahren sind daher ein wichtiger Baustein und sollten aufgegriffen bzw. erweitert werden.

A3: Durchgängigkeit, Verständlichkeit und Praktikabilität

Keiner der untersuchten Ansätze erfüllt diese Anforderung zufriedenstellend. CARLES beschreibt die Bildung von Umgebungsmodellen zwar umfänglich und liefert wichtige Grundlagentechniken, Geodaten werden dabei jedoch nicht integriert. Insgesamt fehlt es an einem Vorgehen, das alle Schritte und Hilfsmittel mit einer hinreichenden Beschreibungstiefe darstellt.

A4: Hohes Potential zur Automatisierung

Einige Ansätze des untersuchten Stands der Technik sind vollautomatisch, die meisten bieten ein hohes Potential zur Automatisierung; der überwiegende Teil der Software-

Werkzeuge bietet Funktionen, die Aufgaben automatisiert erledigen. Daher gilt, diese Vorarbeiten ggf. zu erweitern und in den Gesamtkontext der zu entwickelnden Systematik zu integrieren.

A5: Nachbildung realer Umgebungen

Mit Ausnahme der Methode von KAUBNER lassen sich alle untersuchten Ansätze zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle einsetzen. Die Methoden zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulation sowie einzelne Software-Werkzeuge (vgl. Abschnitte 3.3.2 und 3.3.3) setzen dabei jedoch keine Geodaten ein. Sie sind daher kaum geeignet, geospezifische Umgebungsmodelle effizient zu bilden.

A6: Korrelierende Teilmodelle für Logik und Graphik

Nahezu sämtliche Ansätze im Stand der Technik erfüllen diese Anforderung. Dabei unterscheidet sich jedoch die Ausprägung stark: Die einzelnen Bestandteile des Logikmodells sind dabei häufig auf ein Minimum reduziert und auf ein spezielles Simulationssystem beschränkt. Die Techniken von CARLES sowie KURTEANU und KURTEANU zur automatischen Generierung des korrelierenden Graphikmodells sind dabei ein wesentlicher Beitrag und sollten daher für die zu entwickelnde Systematik berücksichtigt werden.

A7: Spezifische Ausrichtung auf interaktive Fahrsimulation

Sämtliche Methoden zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen sowie die spezialisierten Software-Werkzeuge erfüllen diese Anforderung. Die dabei eingesetzten Methoden müssen daher in der zu entwickelnden Systematik berücksichtigt werden.

A8: Offene und erweiterbare Systemarchitektur

Kommerzielle Software-Werkzeuge sind mehrheitlich nicht offen. Die Auswahl und Integration künftiger Geodaten bleibt damit den Software-Herstellern vorbehalten. Darüber hinaus bieten nur wenige der untersuchten Ansätze Einblicke in die zugrundeliegende Systemarchitektur. Die Weiterentwicklung bestehender Methoden ist daher erschwert. Diese ist jedoch vor dem Hintergrund stetig wachsender Geodatenbestände zwingend notwendig. Es fehlt insgesamt eine Architekturbeschreibung, die auch künftige Geodaten einschließen kann und gleichzeitig Grundlage der Entwicklung neuer Methoden zur Integration von Geodaten in Umgebungsmodelle ist.

A9: Kompatibilität zu bestehenden Standards

Sämtliche Methoden, die Geodaten einsetzen, berücksichtigen vorhandene Datenformate und Spezifikationen. Die Beschreibungen des Logik- und Graphikmodells sind jedoch bei der Mehrzahl der untersuchten Ansätze proprietär. Insgesamt müssen diese Standards jedoch bei der Konzipierung und Implementierung berücksichtigt werden.

Fazit:

Keiner der untersuchten Ansätze im Stand der Technik erfüllt die Anforderungen aus Abschnitt 2.6 vollumfänglich. Die Mehrzahl der Ansätze und Software-Werkzeuge stellen lediglich Teillösungen zur Verfügung; deren Integration zu einer Gesamtlösung ist jedoch nicht trivial. Die ganzheitlichen Ansätze greifen zu kurz; es fehlt an Beschreibungstiefe und hinreichender Umsetzung. Die Software-Werkzeuge stellen zwar ein weites Spektrum an Funktionen bereit, deren Kombination sicherlich zu sehr brauchbaren Lösungen führen würde, diese sind jedoch aufgrund der proprietären Systeme nicht kombinierbar.

Insgesamt fehlt ein ganzheitlicher Ansatz, der einzelne Methoden und Verfahren integriert, diese ggf. erweitert und ganzheitlich durch ein Software-Werkzeug abbildet. Es besteht daher ein Handlungsbedarf zur Erarbeitung *einer Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen*.

Bewertung der untersuchten Ansätze hinsichtlich der gestellten Anforderungen an eine Systematik zu effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle.		Anforderungen								
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
Methoden zur Bildung von UM für Fahrsim.	Prozeduraler Ansatz zur Definition von Verkehrsszenarien nach ALLEN et. al									
	Bildung von Umgebungsmodellen mit vorgefertigten Kacheln									
	Automatisierte Bildung von Umgebungsmodellen nach CARLES									
	Dynamische Szenerien in der Fahrsimulation nach KAUFNER									
Ganzheitl. Ansätze zur Bildung geospezif. UM auf Basis von Geodaten	Transformierung von Geodaten in großfl. UM für Verkehrssim. nach WILKIE et. al									
	Framework zur bildbasierten Generierung von Straßennetzwerken nach Guo									
	Einsatz eines Geo-Informationssystems zur Bildung von UM nach HAUNERT et. al									
	Bildung von Umgebungsmodellen nach DRESIA, BILDSTEIN und RANDT									
	SimWorld – Automatische Landschaftsgenerierung für Fahrsimulationen									
	Geodaten-basierte Modellierung realer Straßen nach DESpine und BAILLARD									
Software-Werkzeuge zur Bildung von UM	Creator (Presagis Inc.), Trian3D Builder (TrianGraphics GmbH)									
	START (Rheinmetall Defence Electronics GmbH), SCANeR Studio (Oktal Sarl)									
	Roads (INRETS), Road (Chalmers Univ. of Technology), ROD (Vires GmbH)									
	Model Desk (dSPACE GmbH), DYNAanimation (Tesis GmbH)									

Bild 3-17: Übersicht der Bewertung einzelner Ansätze des Stands der Technik. Software-Werkzeuge die im gleichen Anwendungsgebiet sehr ähnliche Funktionalität bieten, sind zu Gruppen zusammengefasst.

4 Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen

Dieses Kapitel bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Es beschreibt die *Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen*. Die Systematik hat den Anspruch, den Anforderungen aus der Problemanalyse zu genügen und dem aufgezeigten Handlungsbedarf aus dem Stand der Technik gerecht zu werden. Bild 4-1 gibt einen Überblick über die Grundlagen und Bestandteile der Systematik und deren Zuordnung zu den einzelnen Kapiteln der vorliegenden Arbeit.

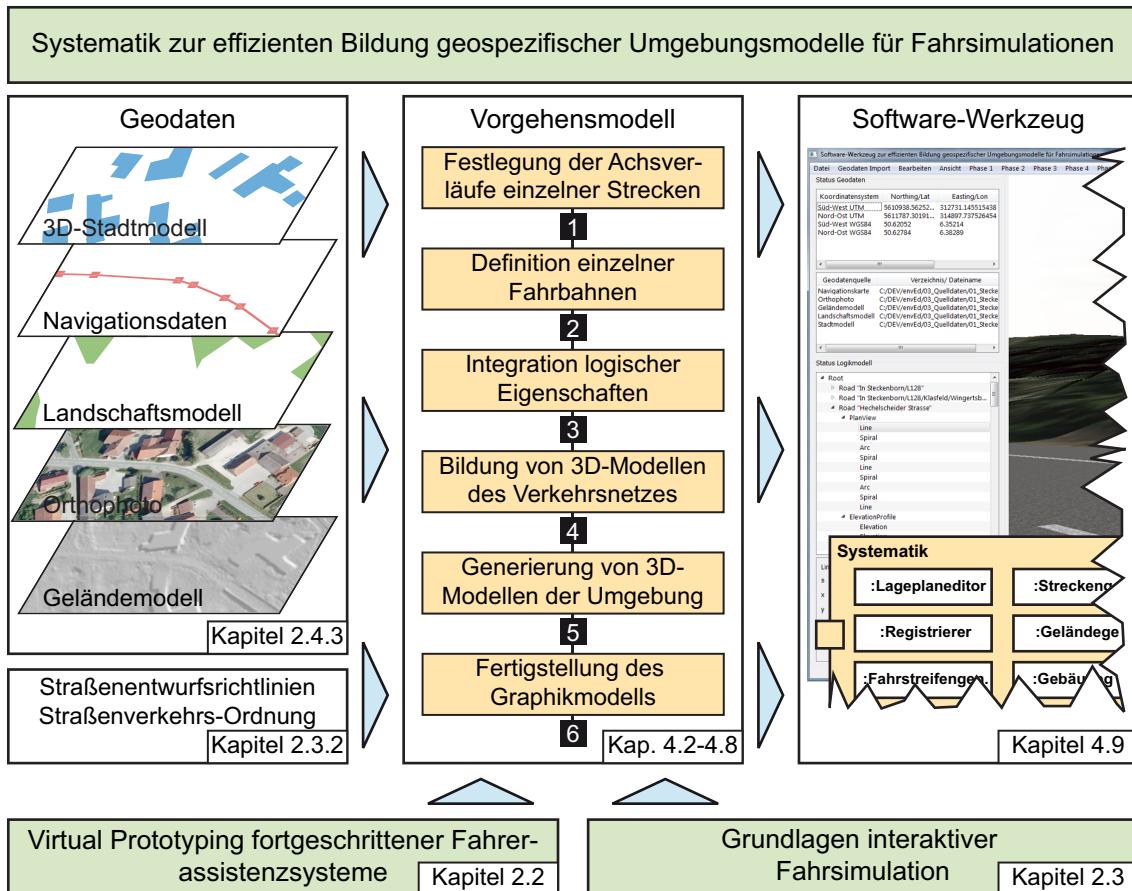


Bild 4-1: Grundlagen, Aufbau und Bestandteile der Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist, geospezifische Umgebungsmodelle effizient zu bilden. Die dafür entwickelte Systematik berücksichtigt Anforderungen und technische Randbedingungen, die beim Virtual Prototyping fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme auftreten und solche, die aus den Grundlagen interaktiver Fahrsimulationen resultieren. Die Systematik integriert ferner öffentliche Richtlinien des Straßenentwurfs ([RAL95], [RAS06], [RAA08]), Auszüge der Straßenverkehrs-Ordnung [StVo10] sowie jene Geo-

daten, die in Abschnitt 2.4.3 als geeignet identifiziert wurden. Im Einzelnen besteht die Systematik aus folgenden Bestandteilen:

- Ein **Vorgehensmodell** strukturiert die erforderlichen Tätigkeiten zur Bildung der einzelnen Teilmodelle des Umgebungsmodells. Dedizierte Geodaten und Vorschriften aus den genannten Richtlinien werden dabei in unterschiedlichen Phasen des Vorgehensmodells eingesetzt. Zur Verarbeitung dieser Geodaten werden notwendige **Hilfsmittel** – Methoden, Verfahren usw. – systematisch in die einzelnen Tätigkeiten des Vorgehensmodells integriert. Dies beinhaltet sowohl bestehende Hilfsmittel, als auch solche, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt bzw. weiterentwickelt wurden.
- Ein prototypisch implementiertes **Software-Werkzeug** setzt das Vorgehensmodell softwaretechnisch um. Es verarbeitet die eingesetzten Geodaten und ermöglicht Entwicklern die Bildung vollständiger Umgebungsmodelle, die in einem Fahrsimulationssystem eingesetzt werden können.

Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile der Systematik beschrieben. Abschnitt 4.1 beschreibt das Vorgehensmodell mit den wesentlichen Phasen und Meilensteinen zunächst im Überblick. Die einzelnen Tätigkeiten innerhalb der Phasen werden anschließend in den Abschnitten 4.2 bis 4.7 erläutert; dies beinhaltet detaillierte Beschreibungen der eingesetzten Hilfsmittel sowie der jeweiligen Resultate. Insgesamt beschreiben diese Abschnitte die Bildung vollständiger Umgebungsmodelle. Da für den effektiven Einsatz einzelner Validierungsmethoden fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme vollständige Umgebungsmodelle nicht immer sinnvoll sind, werden in Abschnitt 4.8 Möglichkeiten zur anwendungsspezifischen Adaptierung des Vorgehensmodells dargestellt. Abschnitt 4.9 stellt schließlich das im Rahmen dieser Arbeit prototypisch implementierte Software-Werkzeug vor.

Das vorliegende Kapitel beschreibt die Systematik aus methodisch konzeptioneller Sicht. Dabei werden zur Veranschaulichung vereinzelt Ausschnitte und Geodaten verwendet, die einer realen Umgebung entsprechen (Validierungsumgebung Rüthen, vgl. Abschnitt 5.1). In Kapitel 5 erfolgt schließlich die durchgängige Anwendung der gesamten Systematik am Beispiel einer zweiten Validierungsumgebung.

4.1 Vorgehensmodell

Das Vorgehensmodell ist der Kern der *Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen*. Es enthält die methodischen Grundlagen der Systematik und schafft damit die Voraussetzung, Dritte in die Lage zu versetzen, zielgerichtet und letztlich erfolgreich geospezifische Umgebungsmodelle zu bilden.

Durch das Vorgehensmodell werden Iterationsschleifen bei der Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle möglichst klein gehalten; es berücksichtigt sämtliche technische

Abhängigkeiten der beteiligten Teilmodelle. Das Vorgehensmodell beschreibt die Bildung vollständiger Umgebungsmodelle; es ist damit zunächst losgelöst von anwendungsspezifischen Einschränkungen hinsichtlich der Ausprägung einzelner Teilmodelle, die beim Einsatz unterschiedlicher Validierungsmethoden und -technologien für Fahrerassistenzsysteme auftreten.

Die Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle ist in sechs Phasen gegliedert. Bild 4-2 zeigt das Vorgehensmodell als Phasen/Meilenstein-Diagramm mit den einzelnen Phasen, den durchzuführenden Tätigkeiten und den jeweiligen Resultaten. Generell wird als erstes das Logikmodell gebildet; es ist daher im Rahmen der entwickelten Systematik das führende Teilmodell. Darauf aufbauend wird anschließend ein zum Logikmodell konsistentes Graphikmodell erarbeitet.

Der Aufbau des Logikmodells beginnt mit der **Festlegung der Achsverläufe einzelner Strecken**. Dabei werden zunächst die zur Modellierung relevanten Strecken identifiziert. Für jede Strecke wird anschließend der Lageplan definiert. Die resultierende Referenzlinie bildet die Grundlage der folgenden zwei Tätigkeiten: Zum einen wird der Höhenplan ermittelt, zum anderen sind der Lageplan und die Navigationsdaten zu registrieren. Das Ergebnis dieser Phase ist die Topologie des Verkehrsnetzes sowie Referenzlinien, welche die Streckenverläufe in drei Dimensionen abbilden.

Zur **Definition einzelner Fahrbahnen** werden Fahrstreifen entlang der jeweiligen Strecke generiert und mit einem Querschnittprofil versehen. Die Geometrie der Fahrbahn ist damit vollständig beschrieben. Diese ist Grundlage der anschließenden Spezifikation von Oberflächeneigenschaften.

Das Logikmodell wird in der dritten Phase durch die **Integration logischer Eigenschaften** komplettiert. Die einzelnen Strecken und Fahrstreifen sind mittels Abbiegerationen und Abbiegepfaden miteinander zu verknüpfen und mit verkehrsrelevanten Attributen (bspw. der zulässigen Höchstgeschwindigkeit) zu versehen. Abschließend sind sonstige Objekte im Logikmodell zu hinterlegen.

Die **Bildung von 3D-Modellen des Verkehrsnetzes** ist der Ausgangspunkt zur Erarbeitung des Graphikmodells. Auf Basis der geometrischen Beschreibungen der Fahrbahnen im Logikmodell werden zunächst 3D-Modelle einzelner Strecken generiert. Darauf aufbauend sind die komplexen 3D-Modelle einzelner Knotenpunkte zu modellieren. Das Resultat ist ein Graphikmodell, welches das Verkehrsnetz beinhaltet.

Durch die **Generierung von 3D-Modellen der Landschaft** wird das Verkehrsnetz um 3D-Modelle der Umgebung erweitert. Dazu wird zunächst ein 3D-Modell des Geländes aufgebaut, in der Folge mit dem bestehenden Verkehrsnetz zusammengeführt und um Verkehrsmobiliar (bspw. Leitpfosten, Verkehrsschilder und Lichtsignalanlagen) erweitert. Schließlich werden Gebäude und Baumformationen in der Szene platziert.

Die **Fertigstellung des Graphikmodells** erfolgt in der letzten Phase. Während in den vorherigen Phasen vorrangig Geodaten zu integrieren sind, wird das Graphikmodell hier

weitgehend manuell fertiggestellt. Dabei sind insbesondere Individualisierungen und die Modellierungen von Details an einzelnen 3D-Modellen vorzunehmen, welche die grafische Anmutung der Szene für den Benutzer realistischer erscheinen lassen. Darüber hinaus ist die Komplexität einzelner 3D-Facettenmodelle zu reduzieren, um das Grafikmodell für die effektive Verarbeitung im Fahrsimulationssystem vorzubereiten.

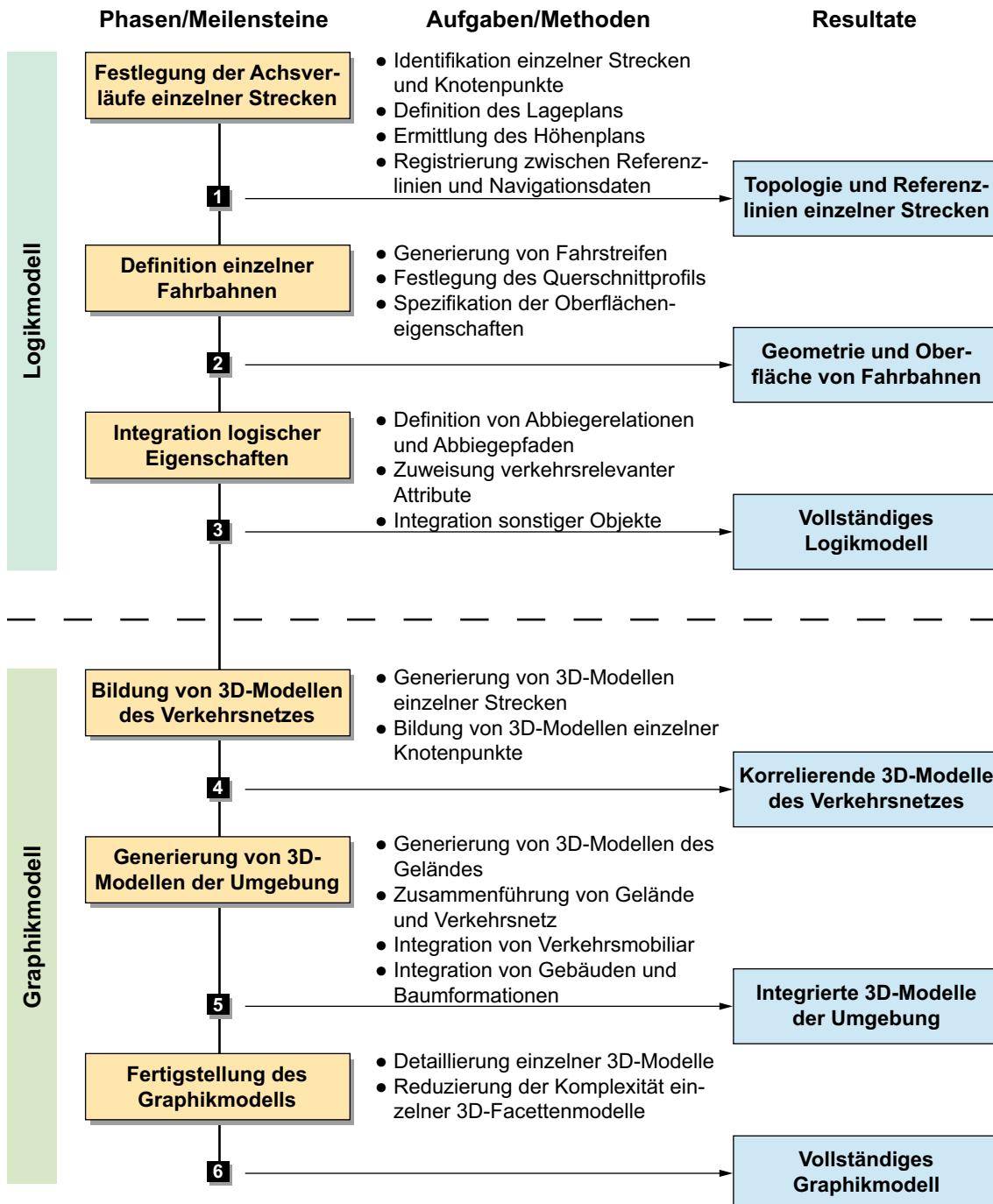


Bild 4-2: Vorgehensmodell zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen.

Die einzelnen Tätigkeiten innerhalb der Phasen und die eingesetzten Hilfsmittel werden in den folgenden Abschnitten ausführlich erläutert. Die Erläuterungen basieren dabei auf der Annahme, dass zwei Voraussetzungen erfüllt sind: Erstens müssen die eingesetzten Geodaten aus dem jeweiligen geodätischem Koordinatenreferenzsystem in ein lokales euklidisches Koordinatensystem transformiert⁵³ sein. Zweitens müssen 3D-Modelle vorhanden sein, die regelmäßig vorkommende Objekte im Straßenverkehr nachbilden, bspw. Verkehrsmobiliar.

4.2 Festlegung der Achsverläufe einzelner Strecken

Ziel der ersten Phase ist, die Topologie des Verkehrsnetzes und den Achsverlauf einzelner Strecken im Logikmodell abzubilden. In Abschnitt 4.2.1 werden dafür zunächst einzelne Strecken und deren Verbindung in Knotenpunkten identifiziert; damit ist die grundsätzliche Topologie des Verkehrsnetzes definiert. Für einzelne Strecken wird anschließend der Lageplan definiert (Abschnitt 4.2.2) und der entsprechende Höhenplan ermittelt (Abschnitt 4.2.3). Abschnitt 4.2.4 beschreibt schließlich die notwendige Registrierung zwischen Referenzlinien des Lageplans und Knoten der Navigationsdaten.

4.2.1 Identifikation einzelner Strecken und Knotenpunkte

Die Topologie des Verkehrsnetzes wird im Logikmodell als Graph abgebildet. Dabei sind Strecken die Kanten und Knotenpunkte die Knoten des Graphen; Strecken verbinden Knotenpunkte (vgl. Abschnitt 2.3.2.1). Die Topologie bildet das Grundgerüst des Verkehrsnetzes und wird daher im ersten Schritt gebildet. Konkret werden im Logikmodell Knotenpunkte, Strecken und deren Verbindungen hinterlegt; ferner werden einzelnen Strecken der entsprechende Straßename und die -kategorie zugeordnet (Bild 4-3).

Der Graph des Verkehrsnetzes in Navigationsdaten beinhaltet die notwendigen Informationen über Strecken und Knotenpunkte (vgl. Abschnitt 2.4.3). Die zur Modellierung vorgesehenen Straßenzüge sind dabei zunächst aus dem Gesamtdatenbestand zu extrahieren. Die eigentliche Identifikation einzelner Strecken und Knotenpunkte erfolgt anschließend in Anlehnung an WILKIE et al. [WSL11, S. 5f.] (vgl. Abschnitt 3.2.1) und ZHANG [Zha09, S. 25f.].

⁵³ Anhang A1.2 beschreibt entsprechende Transformationen, die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt werden.

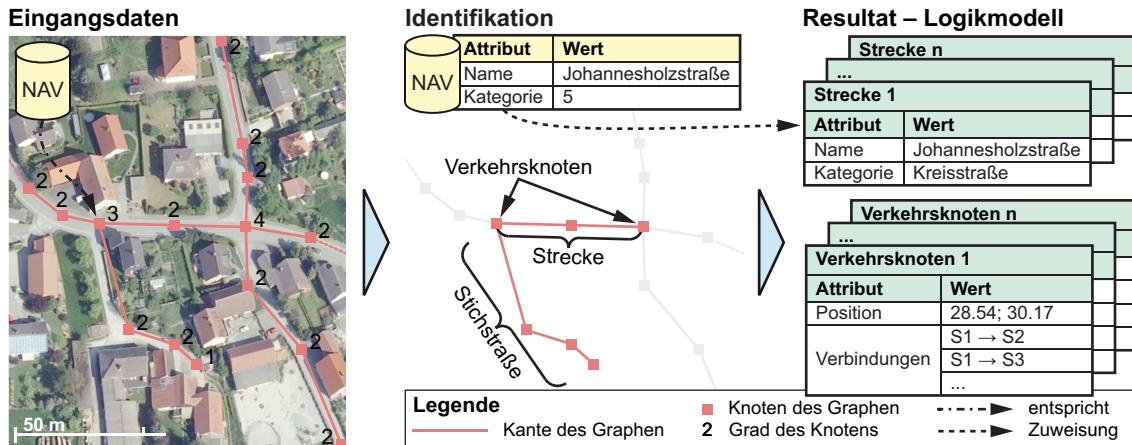


Bild 4-3: Identifikation einzelner Strecken und Knotenpunkte auf Basis von Navigationsdaten⁵⁴.

Zunächst wird der gesamte Graph des Verkehrsnetzes durchlaufen⁵⁵ und die einzelnen Knoten klassifiziert. Der Grad jedes Knotens⁵⁶ ist dabei entscheidend: Knoten mit Grad eins werden als Stichstraßen klassifiziert. Knoten mit Grad zwei sind Teil einer Strecke; derartige Knoten werden in Navigationsdaten eingesetzt, um den Verlauf der Strecke und Änderungen der Streckencharakteristika zu beschreiben, bspw. das Ende eines Fahrstreifens. Ist der Grad eines Knotens größer zwei, so wird dieser als Verkehrsknoten klassifiziert.

Auf Basis dieser Klassifikation werden einzelne Knoten zu Strecken zusammengefasst: Zwischen zwei Knotenpunkten, bzw. von einem Knotenpunkt bis zum Ende einer Stichstraße, wird eine Strecke als Folge miteinander verbundener Knoten beschrieben. An Verkehrsknoten werden ferner Beziehungen zwischen den ein- und ausgehenden Strecken hergestellt. Diese Beziehungen definieren, welche Straßen innerhalb eines Verkehrsknotens miteinander verbunden sind. Das Verkehrsnetz ist somit topologisch beschrieben. Schließlich werden Strecken mit Straßennamen und -kategorie versehen; diese liegen als Attribut in den Navigationsdaten vor. Bild 4-3 zeigt einen Ausschnitt des Resultats im Logikmodell.

⁵⁴ Eingangs- und Geodaten werden in den folgenden Bildern als Datenbanksymbol mit einem Kürzel der jeweiligen Daten (vgl. Abschnitt 2.4.2.4, bzw. Kapitel 7) gekennzeichnet.

⁵⁵ Durchlaufen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass jeder Knoten des Graphen mindestens einmal besucht wird [TT06, S. 394ff.]. In der Graphentheorie wird dafür häufig die Bezeichnung Traversierung verwendet.

⁵⁶ Grad des Knotens (auch Valenz): Anzahl der vom Knoten ausgehenden Kanten [TT06, S. 383].

4.2.2 Definition des Lageplans

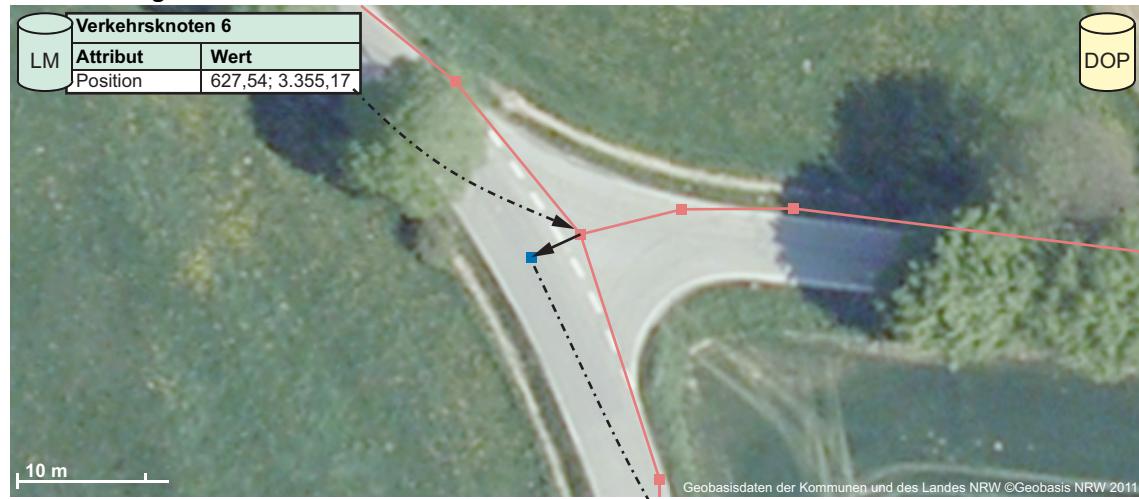
Der Lageplan ist die Basis der geometrischen Beschreibung von Verkehrswegen. Er besteht aus Referenzlinien, die jeweils den horizontalen Verlauf einzelner Strecken mittels mathematischer Funktionen beschreiben. Dabei werden die Elemente Gerade, Kreisbogen und Klohoide verwendet (vgl. Abschnitt 2.3.2.1.). Diese Elemente gilt es für jede der identifizierten Strecken im Logikmodell zu hinterlegen, so dass der reale Streckenverlauf bestmöglich nachgebildet wird. Dabei sollte die Abweichung vom realen Verlauf nicht mehr als einen Meter betragen. Dies ist zum einen eine Anforderung aus der Entwicklung fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme (vgl. Abschnitt 2.3.3); zum anderen würden größere Abweichungen die spätere Zusammenführung von Strecken und Gelände (Abschnitt 4.6.2) verhindern.

Grundsätzlich beinhalten das digitale Landschaftsmodell, digitale Orthophotos sowie Navigationsdaten Informationen über Streckenverläufe (vgl. Abschnitt 2.4.3). So bildet der Graph der Navigationsdaten die Geometrie der Strecken zwar ab, die Lagegenauigkeit einzelner Knoten ist jedoch unzureichend (Abweichung ± 3 m), die Anzahl der Knoten ist ferner zu gering, um den Verlauf hinreichend genau wiederzugeben; letztlich wird die Geometrie zudem als Linienzug beschrieben. Das digitale Landschaftsmodell beschreibt die Geometrie ebenso als Linienzug, wenngleich deutlich genauer (Abweichung ± 1 m). Die höchste Genauigkeit bieten in diesem Zusammenhang digitale Orthophotos, die eine Auflösung von 20 cm je Pixel besitzen. Sie werden daher als Grundlage zur Modellierung des Lageplans eingesetzt.

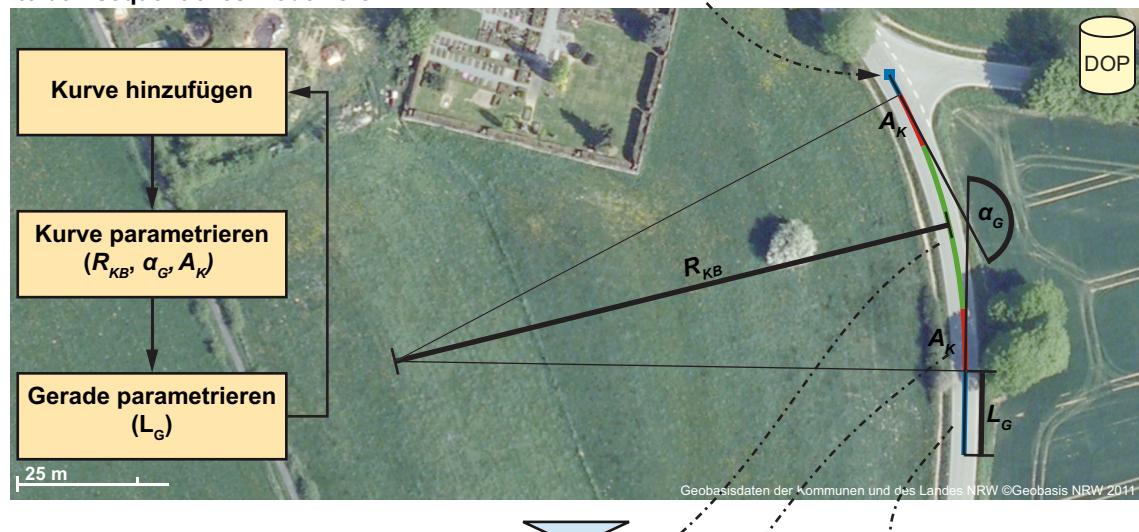
Die Abbildung des Lageplans erfolgt im Rahmen dieser Arbeit automatisiert: Dabei werden einzelne Elemente zwar generell manuell platziert; in Anlehnung an CARLES [Car01, S. 49ff.] (vgl. Abschnitt 3.1.3) und HAUNERT et al. [HBN05, S. 5ff.] (vgl. Abschnitt 3.2.3) werden dabei jedoch Methoden eingesetzt, welche die Parameterwerte der einzelnen mathematischen Funktionen automatisch berechnen. Für jede im Logikmodell hinterlegte Strecke wird der Lageplan in folgenden Schritten aufgebaut (Bild 4-4):

Zunächst wird die **Strecke initialisiert**. Dabei ist für sämtliche Strecken im Logikmodell die exakte Lage der Start- und Endpunkte festzulegen. Dies sind die einer Strecke zugeordneten Verkehrsknoten im Logikmodell. Als erste Näherung wird deren geometrische Lage aus den Navigationsdaten verwendet, die den Verkehrsknoten in der vorangegangen Phase zugeordnet wurde. Die Lage der einzelnen Start- und Endpunkte wird dann manuell korrigiert. Konkret werden die Eckpunkte vor dem Hintergrund des Orthophotos korrekt platziert (Bild 4-4, oben).

Initialisierung der Strecke



Iterativ sequentielles Modellieren



Resultat – Logikmodell

Kreisbogen

s	16,99
x	632,49
y	3.340,04
Länge	35,23
Orientierung	-68,41
Radius	115,34

Klothoide

s	52,22
x	640,27
y	3.305,82
Länge	12,80
Orientierung	-154,35
Eingangsrad.	115,34
Ausgangsrad.	0,0

Gerade

s	65,03
x	640,70
y	3.293,03
Länge	6,58
Orientierung	-204,43

Lageplan (Strecke n)

Funktion	s	...	Ausgangsr.
Gerade	0,0	...	-
Klothoide	4,19	...	115,34
Kreisb.	16,99	...	-
Klothoide	52,22	...	0,0
Gerade	65,03	...	-
...

Legende

- Kante des Graphen
- Knoten des Graphen
- Streckenstart bzw. -ende
- Translation
- entspricht
- Zuweisung

40 m

Bild 4-4: Definition des Lageplans durch iterativ sequentielles Modellieren vor dem Hintergrund des digitalen Orthophotos.

Sind die Start- und Endpunkte hinreichend genau platziert wird der jeweilige Lageplan einer Strecke durch **iterativ sequentielles Modellieren** gebildet. Dabei sind die Parameterwerte einzelner Streckenabschnitte festzulegen. Ziel ist, den Startpunkt einer Strecke mittels Sequenzen aus Geraden, Kreisbögen und Klothoiden mit dem jeweiligen Endpunkt zu verbinden und dabei den realen Streckenverlauf hinreichend genau abzubilden. Ohne Einschränkung der Allgemeinheit wird angenommen, dass eine Strecke mit einer Geraden beginnt⁵⁷. Ausgehend von dieser Geraden werden folgende Schritte iterativ durchlaufen (Bild 4-4, zentral):

- 1) **Kurve hinzufügen:** Die jeweils letzte Gerade wird um eine Sequenz von Klohoide, Kreisbogen, Klohoide und Gerade ergänzt, was einer Kurve mit anschließender Geraden entspricht. Insgesamt werden dabei zwei aufeinanderfolgende Geraden mittels Klohoide, Kreisbogen, Klohoide verbunden. MEEK und WALTON [MW89, S. 76ff.] zeigen, dass dies mathematisch immer möglich ist. Die Elemente werden vorübergehend mit vordefinierten Parameterwerten versehen. Da der daraus resultierende Kurvenverlauf jedoch selten dem realen Streckenverlauf entspricht, sind die Kurven manuell zu parametrieren.
- 2) **Kurve parametrieren:** Zu Parametrieren sind der Radius des Kreisbogens (R_{KB}), der Schnittwinkel der zwei Geraden (α_G) sowie der charakteristische Klohoidenparameter (A_K ⁵⁸). Diese werden so lange variiert, bis die Kurve den realen Streckenverlauf hinreichend genau abbildet. Im Einzelfall ist es dafür notwendig die Länge der vorhergehenden Geraden anzupassen.
- 3) **Gerade parametrieren:** Die festgelegten Parameterwerte für die Kurve definieren gleichzeitig die Orientierung der zweiten Geraden. Deren Länge L_G wird in diesem Schritt angepasst, um dem realen Streckenverlauf zu entsprechen. Schließlich wird der Geraden eine weitere Kurve hinzugefügt, wenn der Endpunkt der Strecke bisher nicht erreicht wurde.

Die drei Schritte werden so häufig iteriert, bis der Lageplan den realen Streckenverlauf hinreichend genau nachbildet. Zusammengefasst beruht diese Modellierungstechnik auf der manuellen Anpassung von den vier Parametern: R_{KB} , α_G , A_K und L_G .

Sämtliche verbleibende Parameterwerte (bspw. Länge, Position und Orientierung des Kreisbogens) werden automatisch bestimmt. Dabei sind zur Berechnung der Parameterwerte einzelner Klothoiden die Fresnel Integrale

⁵⁷ Im Einzelfall kann die Länge dieser Geraden auf wenige Zentimeter beschränkt werden; sie ist damit für den Verlauf der Strecke nicht relevant.

⁵⁸ Straßenbauliche Richtlinien schreiben für den Klohoidenparameter A_K den Wertebereich $\frac{R_{KB}}{3} \leq A_K \leq R_{KB}$ vor [RAL95, S. 16].

$$x = \int_0^{L_K} \cos \frac{L_K^2}{2A_K^2} dL_K; y = \int_0^{L_K} \sin \frac{L_K^2}{2A_K^2} dL_K$$

zu lösen [Hin99, S. 12ff.]; x und y sind dabei jeweils Koordinaten entlang des Verlaufs der Klothoiden; L_K ist deren Länge. Da eine geschlossene Lösung für diese Integrale bisher nicht bekannt ist, wird im Rahmen dieser Arbeit in Anlehnung an KURTEANU und KURTEANU [KK10, S. 31ff.] auf eine offene Softwarebibliothek [Mos12-ol] zur Näherung der Lösung zurückgegriffen.

Die Berechnung der übrigen Parameterwerte der Elemente erfolgt auf Basis simpler geometrischer, geschlossen lösbarer Geometrie. HINTERSEHER liefert in diesem Zusammenhang umfassende Berechnungsbeispiele [Hin99, S. 46ff.].

Als Resultat ist im Logikmodell für jede Strecke ein Lageplan hinterlegt, der die einzelnen Parameter der Elemente Gerade, Klothoide und Kreisbogen beinhaltet (Bild 4-4, unten).

4.2.3 Ermittlung des Höhenplans

Der Höhenplan beschreibt den vertikalen Verlauf einzelner Verkehrswege mittels einer mathematisch definierten Referenzlinie, die im Wesentlichen aus einem Polygonzug mit Polygonen dritten Grades besteht (vgl. Abschnitt 2.3.2.1.). Diese Sequenz ist für jede Strecke im Logikmodell abzubilden.

Ausgangspunkt ist der Lageplan einer Strecke sowie das digitale Höhenmodell, welches Höhenwerte des Geländes beinhaltet (vgl. Abschnitt 2.4.3). Der Höhenplan einzelner Strecken wird im Rahmen dieser Arbeit in folgenden Schritten ermittelt (Bild 4-5):

- 1) **Abtasten der Höhenwerte:** Entlang des Streckenverlaufs s werden einzelne Höhenwerte aus dem digitalen Geländemodell gelesen (Bild 4-5, links). Dazu werden zunächst die Koordinaten einer Position entlang des Streckenverlaufs ermittelt und für diese Koordinaten der entsprechende Höhenwert bestimmt. Bild 4-5 (Mitte) zeigt die resultierenden Höhenpunkte in einem s - z -Diagramm für einen exemplarischen Streckenabschnitt.
- 2) **Mathematische Interpolation:** Zur Bestimmung der Funktionsparameterwerte von Polynomen dritten Grades bieten sich Verfahren der mathematischen Spline⁵⁹-Interpolation an. Der Höhenplan wird daher in dieser Arbeit mittels natürlichen kubischen Splines [HSZ03, S. 1126] beschrieben. Zur Berechnung der Parameterwerte

⁵⁹ Ein Spline ist eine Funktion, die stückweise aus Polynomen (im vorliegenden Fall) dritten Grades zusammengesetzt ist. An den Stoßstellen zweier Polynome sind dabei Nebenbedingungen zu erfüllen, etwa eine stetige Differenzierbarkeit [HSZ03, S. 1125ff.].

einzelner Funktionen wird eine Interpolation auf Basis der Methode der kleinsten Quadrate eingesetzt: Gewichtete penalisierte Spline-Regression (engl. *penalized regression spline*) [Kho07, S. 14ff.], [ALG12-ol]. Derartige Splines bestechen durch ihre *numerische Stabilität, ausreichende Flexibilität und durch ihre einfache Implementierungsmöglichkeit* [Kho07, S. 15]. Darüber hinaus bieten diese Splines den Vorteil, lediglich von zwei Parametern beeinflusst zu werden [ALG12-ol]: M_{PRS} legt die Anzahl an Funktionen fest, ρ_{PRS} ist der Penalisierungsfaktor, der die entstehenden Funktionen glättet. Der Benutzer variiert die Parameterwerte, bis der berechnete Höhenverlauf dem realen Höhenverlauf hinreichend genau entspricht. Bild 4-5 (Mitte) zeigt den Höhenplan. Zwar weicht dieser von den einzelnen Höhenpunkten ab, die entstehende Funktion spiegelt den realen, kontinuierlichen Verlauf jedoch hinreichend genau wieder.

Die resultierenden Funktionsparameter aus der mathematischen Interpolation werden schließlich in das Logikmodell übertragen (Bild 4-5, rechts). Insgesamt sind mit Abschluss dieser Tätigkeit die Referenzlinien einzelner Verkehrswege vollständig mathematisch in drei Dimensionen beschrieben.

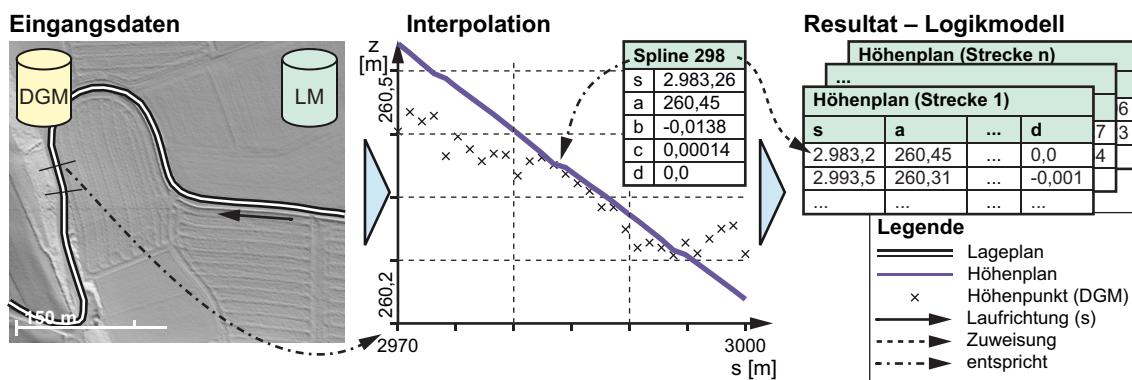


Bild 4-5: Ermittlung des Höhenplans auf Basis des Lageplans und des digitalen Geländemodells⁶⁰.

4.2.4 Registrierung zwischen Referenzlinien und Navigationsdaten

Navigationsdaten enthalten eine Vielzahl von Attributen, die für das Logikmodell relevant sind (vgl. Abschnitt 2.4.3). In den folgenden Phasen werden diese Attribute einzelnen Streckenabschnitten entlang des definierten Lageplans zugeordnet. Eine Registrierung zwischen den entstandenen Referenzlinien und den Knoten der Navigationsdaten ist dafür eine notwendige Voraussetzung. Das Ziel ist daher, jedem Knoten der Naviga-

⁶⁰ Der interpolierte Höhenplan weicht in dem Bild zum Teil deutlich sichtbar von den Höhenwerten des digitalen Geländemodells ab. Tatsächlich ist die Abweichung jedoch gering und nur auf die unterschiedliche Skalierung der Achsen zurückzuführen.

tionsdaten eine Position s entlang des Streckenverlaufs zuzuordnen und damit eine bidirektionale logische Verknüpfung zu schaffen⁶¹.

Die Registrierung erfolgt in dieser Arbeit auf Basis der geographischen Distanz, die in diesem Zusammenhang einen zielgerichteten Ansatz darstellt [YT99, S. 3f.], [Zha09, S. 10]: Ist die Distanz zwischen einem Knoten der Navigationsdaten und einer Position entlang des Lageplans minimal so ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass der Knoten auch in der Realität dieser Streckenposition zugeordnet ist. Für jeden Knoten der Navigationsdaten wird daher die minimale euklidische Distanz

$$d_e = \sqrt{(x_K - x_L)^2 + (y_K - y_L)^2}$$

ermittelt. x_K und y_K sind dabei die Position des Knotens der Navigationsdaten, x_L und y_L die Streckenposition für die Laufweite s . Der kleinste Abstand spiegelt die Registrierung wider, die als relationale Beziehung hinterlegt wird (Bild 4-5).

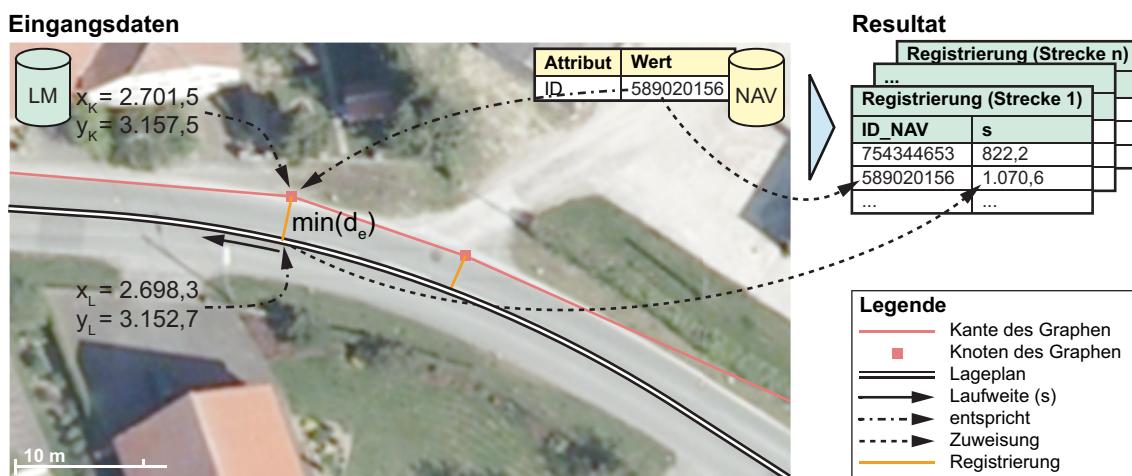


Bild 4-6: Registrierung zwischen Referenzlinie und Navigationsdaten: Die kleinste euklidische Distanz zwischen Knoten der Navigationsdaten und Punkten entlang des Lageplans definieren eine bidirektionale Verknüpfung.

4.3 Definition einzelner Fahrbahnen

Ziel dieser Phase ist, einzelne Strecken hinsichtlich der Geometrie und Oberflächeneigenschaften ganzheitlich zu beschreiben. Dafür werden die bislang im Logikmodell hinterlegten Referenzlinien um ein laterales Profil erweitert. Das laterale Profil setzt sich aus der Fahrbahn- bzw. Fahrstreifenbreite und dem Querschnittprofil zusammen.

⁶¹ Diese bidirektionale Verbindung wird im weiteren Verlauf der Systematik **ausnahmslos** eingesetzt, wenn Attribute der Navigationsdaten in das Logikmodell transferiert werden. Auf den Einsatz der Registrierung wird daher im Folgenden nicht weiter hingewiesen.

In dieser Phase sind zunächst Werte für die Anzahl und die jeweilige Breite von Fahrstreifen entlang des Streckenverlaufs zu generieren (Abschnitt 4.3.1). Darauf aufbauend ist das Querschnittprofil der Fahrbahnen festzulegen (Abschnitt 4.3.2). Schließlich werden auf Basis der Fahrbahngeometrie Oberflächeneigenschaften spezifiziert (Abschnitt 4.3.3).

4.3.1 Generierung von Fahrstreifen

Die Anzahl und Breite von Fahrstreifen entlang einer Strecke ist maßgebend für das laterale Profil. Diese Parameter definieren die Gesamtbreite der Fahrbahn – und damit die Ausdehnung der Trasse. Sie sind in diesem Schritt für einzelne Abschnitte sämtlicher Strecken im Logikmodell festzulegen.

Zur Generierung von Fahrstreifen werden in dieser Arbeit der bestehende Lageplan und die Navigationsdaten eingesetzt. Diese Daten werden durch straßenbauliche Richtlinien ergänzt. Fahrstreifen werden auf dieser Grundlage wie folgt generiert (Bild 4-7):

- 1) **Anzahl der Fahrstreifen bestimmen:** Ausgangspunkt sind die Referenzlinien einzelner Strecken aus dem Logikmodell. Die Anzahl an Fahrstreifen entlang dieser Referenzlinien (Laufweite s) wird aus den Navigationsdaten extrahiert. Im Logikmodell werden anschließend Sektionen entlang der Referenzlinie definiert; Sektionen beschreiben dabei Streckenabschnitte mit gleichbleibender Anzahl an Fahrstreifen.
- 2) **Fahrstreifenbreite und Fahrbahnmarkierungen festlegen:** Navigationsdaten liefern Informationen zur Straßenkategorie, den Fahrbahnmarkierungen inklusive evtl. vorhandener baulicher Trennungen sowie der Fahrtrichtung je Fahrstreifen. Die entsprechenden Daten werden in das Logikmodell überführt. Es sind zwar ebenso Attribute zur Breite von Fahrstreifen in Navigationsdaten vorgesehen, konkrete Werte sind gegenwärtig jedoch nur sehr selten eingetragen. Zur Festlegung der Fahrstreifenbreite wird daher auf straßenbauliche Richtlinien zurückgegriffen. Über die aktuelle Straßenkategorie und die Anzahl an Fahrstreifen lassen sich Standardwerte des Straßenbaus für den Querschnitt⁶² (vgl. [RAA08, S. 21ff.]) ableiten. Für einspurige Landesstraßen ist beispielsweise eine Mindestfahrstreifenbreite von 3,00 m einzuhalten. Ferner wird die Fahrbahn von einem Randstreifen (Breite: 0,25 m) und einem Bankett (Breite: 1,00 m) ummantelt. Die relationalen Beziehungen zwischen Straßenkategorie, Anzahl der Fahrstreifen und deren jeweilige Breite sind exemplarisch in Bild 4-7 dargestellt.

⁶² Anhang A3.1 zeigt die im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingesetzten Regelquerschnitte.

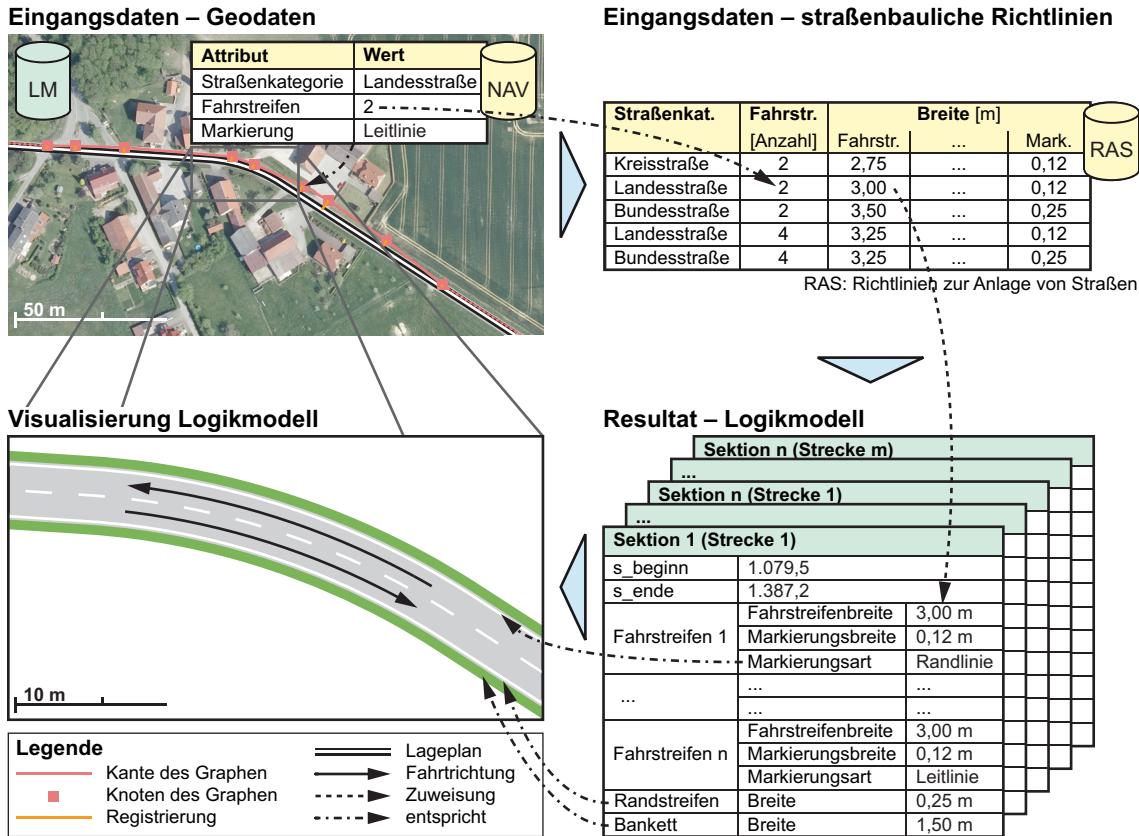


Bild 4-7: Generierung von Fahrstreifen auf Basis des Lageplans einzelner Strecken, Navigationsdaten und strassenbaulichen Richtlinien.

Als Resultat wird das Logikmodell in diesem Schritt um Fahrstreifensektionen, die Anzahl an Fahrstreifen, Randstreifen und Bankett, deren Breite sowie Fahrbahnmarkierungen ergänzt. Bild 4-7 zeigt exemplarisch Parameterwerte und eine entsprechende Tabelle.

4.3.2 Festlegung des Querschnittprofils

Reale Fahrbahnen sind mit einer Querneigung versehen (vgl. [RAL95, S. 27ff.]). Diese Querneigung dient zum einen der Straßenentwässerung, zum anderen zur Steigerung von Sicherheit und Komfort in Kurvenfahrten. Im Logikmodell wird die Querneigung durch eine mathematische Funktion definiert, die Querneigungswinkel in Abhängigkeit zur Laufweite s der Referenzlinie festlegt. In diesem Schritt ist ein sprungfreier Werteverlauf für die Querneigungswinkel θ_Q zu definieren.

Voraussetzung zur Festlegung des Querschnittprofils sind der Lageplan und die Fahrbahnbreite, der Höhenplan sowie das digitale Geländemodell. Auf Basis dieser Daten wird das Querschnittprofil durch sequentielles Modellieren festgelegt (Bild 4-8):

Ausgehend vom Startpunkt einer Strecke wird der Lageplan schrittweise in beliebiger Genauigkeit entlang der Laufweite s abgetastet. An jeder Position s wird ein $z-t$ -Diagramm dargestellt. Dieses beinhaltet die Höhenwerte des digitalen Geländemodells,

die orthogonal zur Referenzlinie verlaufen; das Querschnittprofil wird damit dargestellt. Für dieses Profil sind die Querneigungswinkel θ_{Q1} und θ_{Q2} manuell festzulegen.

Das Resultat ist ein sprungfreier Verlauf der Querneigungswinkel. Diese werden im Logikmodell als Funktionsparameter einer Geraden abgelegt (vgl. Bild 4-8).

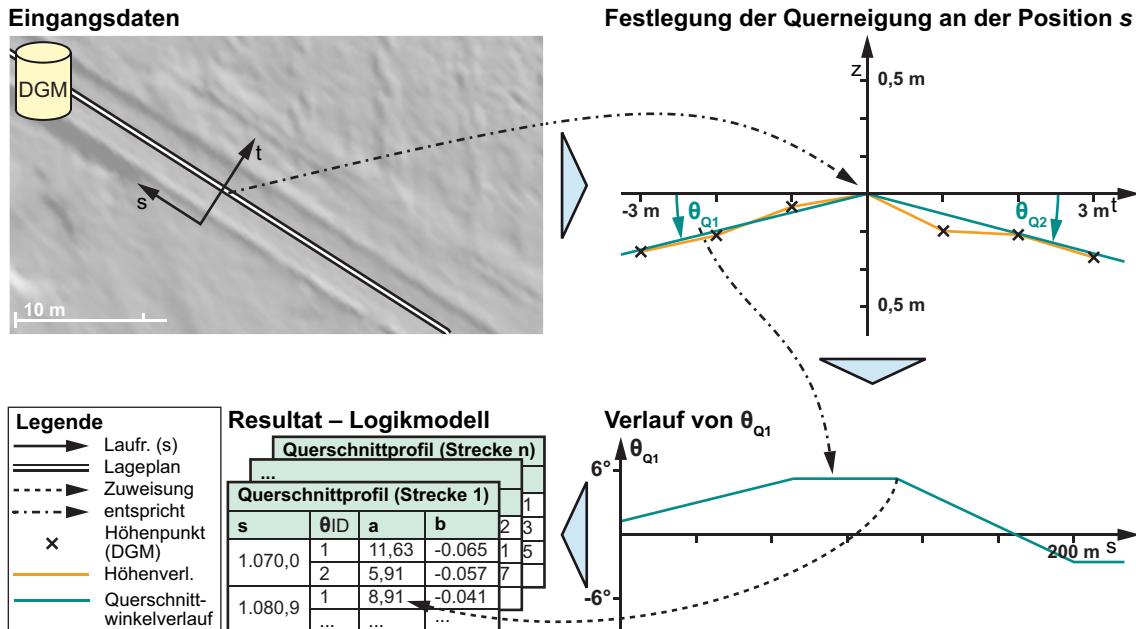


Bild 4-8: Festlegung des Querschnittprofils auf Basis des Lageplans und des digitalen Geländemodells.

4.3.3 Spezifikation der Oberflächeneigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften sind im Logikmodell als Reibungskoeffizienten abgebildet (vgl. Abschnitt 2.3.2.1). Sie sind die wesentliche Schnittstelle zwischen Umgebungsmodell sowie Fahrdynamik- und Reifenmodell. Die Struktur der Oberfläche ist ferner eine Eingangsgröße des Akustikmodells (vgl. Abschnitt 2.3.2.3). In diesem Schritt sind die Reibungskoeffizienten und die Körnung des Asphaltes entlang des Streckenverlaufs zu spezifizieren.

Gegenwärtig verfügbare Geodaten beinhalten kaum Informationen über Oberflächeneigenschaften. Mit Hilfe von Orthophotos kann zwar zwischen Fahrbahn und Umgebung unterschieden werden [Guo05] (vgl. Abschnitt 3.2.2), Angaben zur Oberflächenstruktur sind damit jedoch lediglich grob abzuschätzen. Navigationsdaten unterscheiden hinsichtlich der Oberflächeneigenschaften zwischen befestigter und unbefestigter Fahrbahn. Diese Information wird in dieser Arbeit verwendet und im Logikmodell einzelnen Fahrstreifen entlang der Referenzlinie zugeordnet.

Bild 4-9 stellt die Übertragung der Attribute schematisch dar. Entlang einer Strecke werden die Attribute aus den Navigationsdaten gelesen und an der entsprechenden Position s im Logikmodell hinterlegt. Die Reibungskoeffizienten und Körnungen für befest-

tigte und unbefestigte Fahrbahnen entsprechen dabei exemplarisch Richtwerten aus einer Wertetabelle für physikalische Eigenschaften [Kuc01, S. 607].

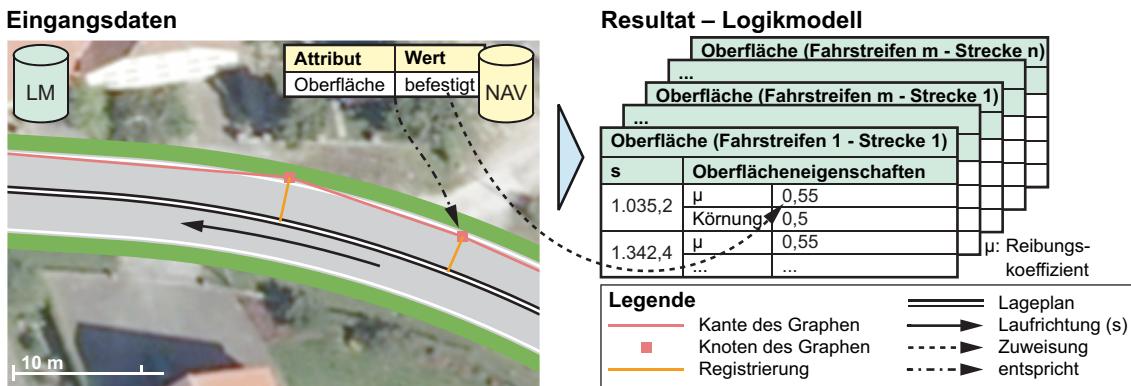


Bild 4-9: Spezifikation der Oberflächeneigenschaften auf Basis des Lageplans und der Navigationsdaten.

Mit Abschluss dieser Tätigkeit beinhaltet das Logikmodell einzelne Strecken mit vollständiger geometrischer und physikalischer Beschreibung.

4.4 Integration logischer Eigenschaften

Ziel dieser Phase ist, das Logikmodell zu vervollständigen. Dazu werden logische Eigenschaften integriert, die vorrangig für Verhaltensmodelle des Fremdverkehrs sowie Sensor- und Assistenzsystemmodelle wichtig sind (vgl. Abschnitt 2.3.2.3). Dies beinhaltet die Definition von Abbiegerelationen und Abbiegepfaden (Abschnitt 4.4.1) und die Zuweisung verkehrsrelevanter Attribute (Abschnitt 4.4.2) ebenso wie die Integration sonstiger Objekte (Abschnitt 4.4.3).

4.4.1 Definition von Abbiegerelationen und Abbiegepfaden

Abbiegerelationen verknüpfen einzelne Fahrstreifen eingehender Strecken in Verkehrsknoten, sofern ein Abbiegen möglich bzw. erlaubt ist. Abbiegepfade beschreiben für eine Abbiegerelation eine geometrische Route durch den Knotenpunkt (vgl. Abschnitt 2.3.2.1). Während Vorschriften hinsichtlich möglicher Fahrrichtungen (Abbiegerelationen) auch für den menschlichen Fahrer relevant sind, gelten Abbiegepfade ausschließlich für die Verhaltensmodelle des Fremdverkehrs. Jeder Verkehrsknoten im Logikmodell ist mit diesen Informationen zu versehen.

Ausgangspunkt dieses Schritts sind der Lageplan sowie die im Logikmodell hinterlegten Verkehrsknoten. Navigationsdaten beinhalten darüber hinaus Informationen über Abbiegerelationen in Verkehrsknoten (vgl. Abschnitt 2.4.3). Eine Analyse der Daten offenbart jedoch, dass diese Daten nur vorliegen, sofern Einschränkungen hinsichtlich möglicher Fahrrichtungen vorliegen. Andernfalls wird angenommen, dass Abbiegen in sämtliche Richtungen erlaubt ist. An solchen Stellen sind die Vorschriften der Straßen-

verkehrs-Ordnung maßgebend, die daher in diesem Schritt explizit berücksichtigt werden.

Die Navigationsdaten unterscheiden im Wesentlichen zwei Kategorien von Verkehrsknoten: Kreuzung und Kreisverkehr. Zwar existieren darüber hinaus Sonderfälle, bspw. Kreuzungen mit Anschluss zu Einbahnstraßen, die grundsätzlichen Charakteristika dieser Verkehrsknoten sind jedoch sehr ähnlich. Sonderfälle werden daher im Folgenden nicht näher beschrieben. Abbiegerelationen und Abbiegepfade werden in dieser Arbeit wie folgt generiert (Bild 4-10):

- 1) **Fallunterscheidung:** Zunächst wird zwischen Kreuzung und Kreisverkehr unterschieden (Bild 4-10, oben). Für jeden Verkehrsknoten im Logikmodell wird der entsprechende Knoten in den Navigationsdaten aufgerufen. Da die Kategorie des Verkehrsknotens ein Attribut der Kanten der Navigationsdaten ist, werden sämtliche Kanten, die mit dem jeweiligen Knoten verbunden sind, überprüft. Beinhaltet eine Kante dabei die Kategorie Kreisverkehr, so wird der Verkehrsknoten als solcher behandelt, andernfalls wird von einer Kreuzung ausgegangen.
- 2) **Abbiegerelationen erstellen:** In Abhängigkeit des jeweiligen Falls werden logische Abbiegerelationen spezifiziert (Bild 4-10, zentral):
 - Bei **Kreuzungen** werden die Kanten der Navigationsdaten nach möglichen Einschränkungen bzgl. der möglichen Fahrrichtungen durchsucht. Dabei werden explizite Verbote ebenso berücksichtigt wie implizite Verbote durch die Straßenverkehrs-Ordnung⁶³. Unter Berücksichtigung der Fahrrichtung einzelner Fahrstreifen werden nun die einzelnen Fahrstreifen verknüpft. Wenn die genannten Bedingungen ein Verknüpfen nicht ausschließen, werden dabei sämtliche eingehenden Fahrstreifen mit allen ausgehenden Fahrstreifen verknüpft.
 - Die Abbiegerelationen eines **Kreisverkehrs** sind vergleichbar mit denen einer Kreuzung, in die Einbahnstraßen münden: In jeden Knotenpunkt eines Kreisverkehrs mündet eine Einbahnstraße – die Kreisfahrbahn. Die Abbiegerelationen werden dementsprechend angelegt. Jeder Fahrstreifen des Kreisverkehrs wird mit den ausgehenden Fahrstreifen einzelner Strecken verbunden. Eingehende Fahrstreifen werden mit dem äußersten Fahrstreifen der Kreisfahrbahn verbunden.
- 3) **Abbiegepfade definieren:** Grundlage der Definition von Abbiegepfaden ist die geometrische Beschreibung der Fahrstreifenverläufe, die bereits im Logikmodell

⁶³ Es werden bspw. keine ausgehenden Abbiegerelationen zu eingehenden Fahrstreifen einer Einbahnstraße generiert.

hinterlegt ist. Logisch verknüpfte Fahrstreifen werden sowohl in der Kreuzung, als auch im Kreisverkehr mittels Kreisbögen mit vordefiniertem Radius R_{AP} geometrisch miteinander verknüpft. Es ist dabei sicherzustellen, dass die Tangente des Kreisbogens im Anschlusspunkt an den Fahrstreifen mit dessen Tangente übereinstimmt (vgl. Bild 4-10).

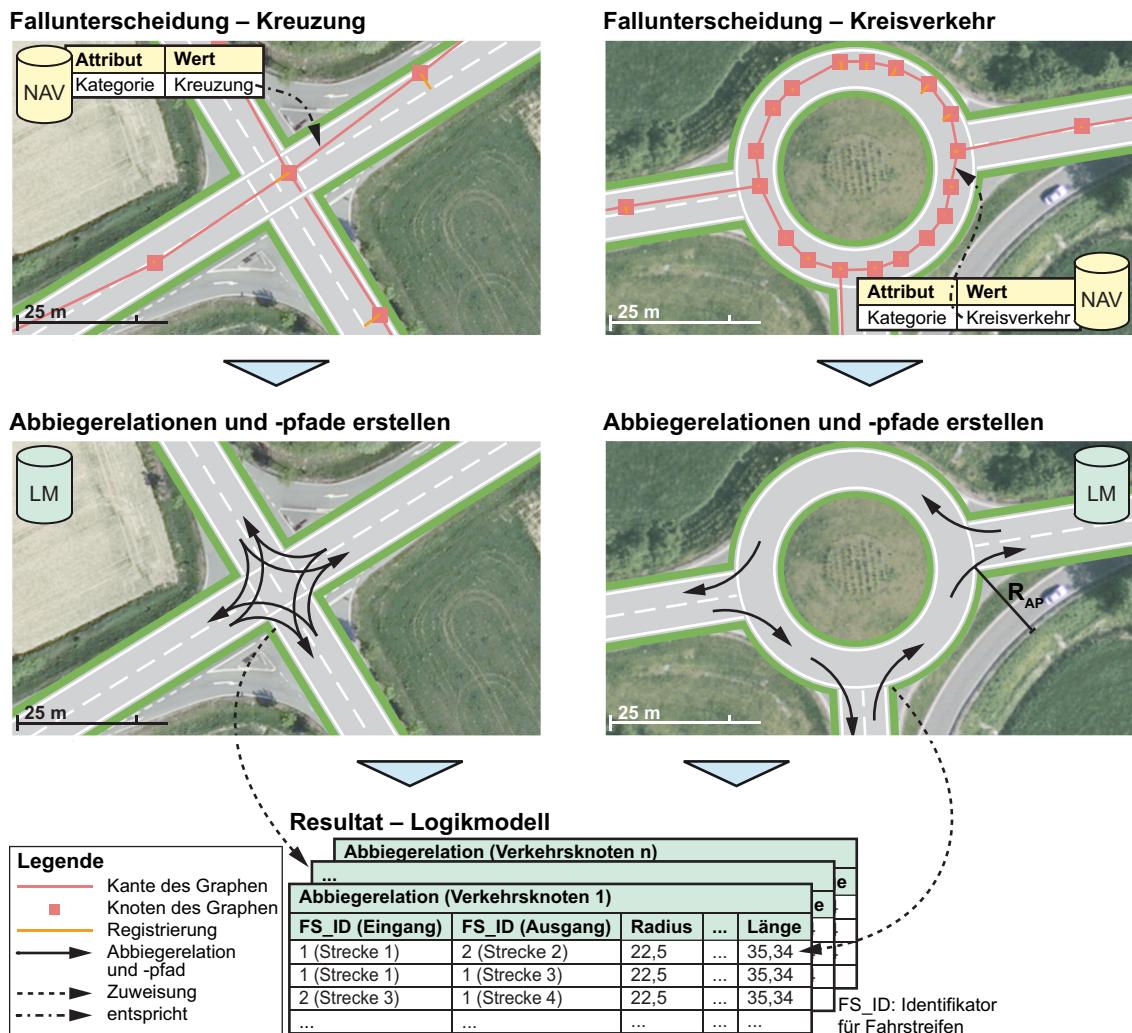


Bild 4-10: Definition von Abbiegerelationen und Abbiegepfaden auf Basis des Strecken im Logikmodell und der Navigationsdaten.

Die entsprechenden logischen Verknüpfungen und die geometrischen Funktionswerte werden in das Logikmodell übertragen (Bild 4-10). Insgesamt beinhaltet das Logikmodell nach dieser Tätigkeit ein vollständig beschriebenes Verkehrsnetz, das im nächsten Schritt um verkehrsrelevante Attribute ergänzt wird.

4.4.2 Zuweisung verkehrsrelevanter Attribute

Durch die Zuweisung verkehrsrelevanter Attribute wird das Logikmodell für das Verkehrsnetz komplettiert. Diese Daten sind vorrangig für die Verhaltensmodelle des

Fremdverkehrs relevant (vgl. Abschnitt 2.3.2.3), werden jedoch ebenso zur Generierung des Graphikmodells eingesetzt (vgl. Abschnitt 4.6.3). Dafür sind bspw. Vorschriften für die zulässige Höchstgeschwindigkeit entlang der Streckenverläufe oder Positionen und Typen von Verkehrszeichen in das Logikmodell zu überführen.

Die Definition von Fahrstreifen entlang des Lageplans, die Navigationsdaten und die Straßenverkehrs-Ordnung bilden den Ausgangspunkt in diesem Schritt. Bild 4-11 zeigt die Zuweisung schematisch:

- 1) Es werden zunächst einzelne Streckenabschnitte mit **verkehrsrelevanten Attributen**⁶⁴ versehen. So wird bspw. die zulässige Höchstgeschwindigkeit aus den Knoten der Navigationsdaten extrahiert und mit Hilfe der Registrierung an die entsprechende Position s der Fahrstreifen übertragen. Gegensinnig verlaufende Fahrstreifen erhalten dabei den gleichen Wert eines spezifischen Attributs. Es wird dabei davon ausgegangen, dass eine zulässige Höchstgeschwindigkeit für beide Fahrrichtungen gilt.
- 2) Im Anschluss werden die **Positionen einzelner Verkehrszeichen** im Logikmodell abgelegt. Ausgangspunkt ist die Fahrbahnbreite, die an der entsprechenden Stelle um einen vordefinierten Versatz vergrößert wird.

Die Zuweisung von Lichtsignalanlagen erfolgt analog. Bild 4-11 zeigt die im Logikmodell hinterlegten Daten.

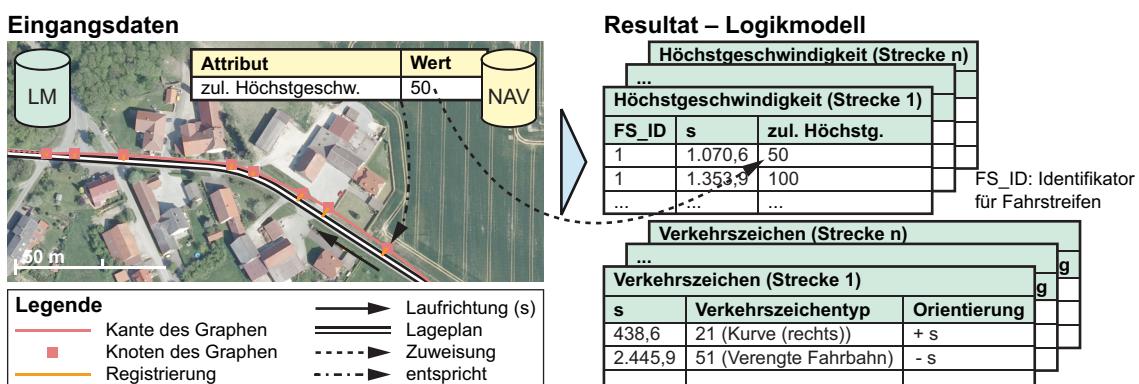


Bild 4-11: Zuweisung verkehrsrelevanter Attribute auf Basis der Navigationsdaten.

4.4.3 Integration sonstiger Objekte

Das Logikmodell des Verkehrsnetzes kann optional um Beschreibungen weiterer Objekte ergänzt werden. Derartige Erweiterungen sind dem letztlichen Anwendungszweck

⁶⁴ Anhang A3.3 listet die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Attribute.

der eigentlichen Fahrsimulation und den daraus resultierenden Anforderungen unterworfen: So können Gebäudegrundrisse bspw. zur Simulation von Abstandssensoren eingesetzt werden. Im Allgemeinen kann das Logikmodell an dieser Stelle um beliebige Objekte erweitert werden. Bild 4-12 zeigt in diesem Zusammenhang exemplarisch die Integration von Gebäudegrundrissen in das Logikmodell. Grundlage dieser Integration ist das digitale 3D-Stadtmodell.

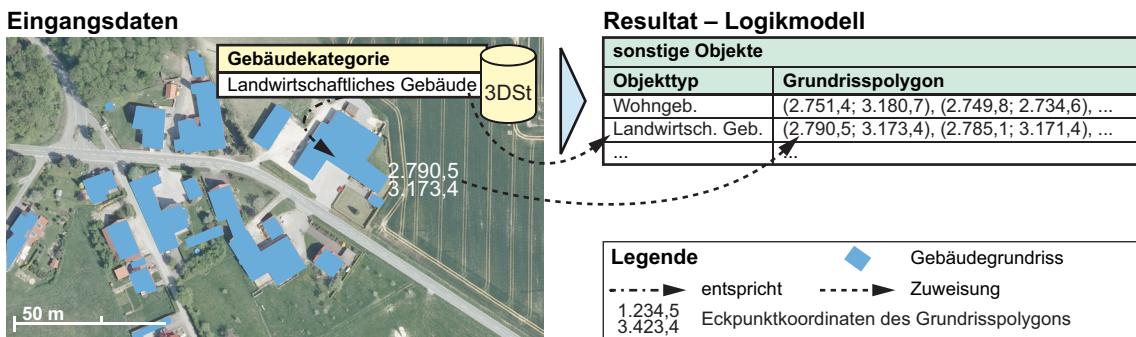


Bild 4-12: Integration sonstiger Objekte am Beispiel des 3D-Stadtmodells.

Mit Abschluss dieser Phase ist das Logikmodell vollständig und umfänglich beschrieben. Resultierende Logikmodelle beinhalten die notwendigen Daten, um Verhaltensmodelle für Fremdverkehr, Akustik-, Fahrdynamik- und Reifenmodelle sowie Sensor- und Assistenzsystemmodelle (vgl. Abschnitt 2.3.2.3) adäquat zu beliefern. Die Logikmodelle erfüllen damit die technischen Randbedingungen der Fahrsimulation und sind geeignet interaktive Fahrsimulationen mit einer Verkehrssimulation durchzuführen.

4.5 Bildung von 3D-Modellen des Verkehrsnetzes

Auf Basis des vollständigen Logikmodells, ausgewählter Geodaten und einer Datenbank mit 3D-Modellen⁶⁵, wird in den folgenden Phasen ein zum Logikmodell korrelie rendes Graphikmodell gebildet. Im Kern wird dabei eine computergraphische Szene aufgebaut, die eine Vielzahl einzelner 3D-Modelle beinhaltet. Die einzelnen Modelle werden dafür in einem Szenengraphen organisiert (vgl. Abschnitt 2.3.2.2). Im Rahmen dieser Arbeit wird der Szenengraph dabei thematisch organisiert: Strecken werden bspw. unter einem gemeinsamen Gruppenknoten zusammengefasst. Die Optimierung und Balancierung des Szenengraphen, bspw. hinsichtlich einer hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit in dem Graphiksystem des Rechners wird dabei nicht betrachtet. Derartige Optimierungen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Dazu sei bspw. auf [Mat05, S. 41f.] verwiesen.

⁶⁵ In diesem Zusammenhang sind 3D-Modelle gemeint, die im Verkehrsbild wiederkehrende Objekte abbilden, bspw. Verkehrsschilder, Leitpfosten und Schutzplanken.

In dieser Phase werden zunächst auf Basis der einzelnen Beschreibungen des Verkehrsnetzes im Logikmodell entsprechende 3D-Modelle des Verkehrsnetzes gebildet. Zuerst werden dafür 3D-Modelle einzelner Strecken generiert (Abschnitt 4.5.1). Darauf aufbauend werden 3D-Modelle der verbindenden Knotenpunkte modelliert (Abschnitt 4.5.2).

4.5.1 Generierung von 3D-Modellen einzelner Strecken

Der Straßenverlauf und dessen unmittelbare Umgebung sind für interaktive Fahrsimulationen von besonderer Bedeutung; ein hoher Detailgrad des Straßenverlaufs ist dementsprechend entscheidend für eine realitätsnahe Abbildung (vgl. Abschnitt 2.3.2). Dies betrifft insbesondere die Darstellung des Asphalt und der Fahrbahnmarkierungen, da sie aus geringer Entfernung aus dem virtuellen Fahrzeug betrachtet werden [SFK+07, S. 3].

Der Achsverlauf einzelner Strecken (vgl. Abschnitt 4.2) sowie deren laterales Profil (vgl. Abschnitt 4.3) sind Grundlage der Generierung entsprechender 3D-Modelle. Ziel ist, für jede im Logikmodell hinterlegte Strecke ein vollständig korrelierendes, texturiertes 3D-Modell des Streckenverlaufs zu erstellen. Geodaten werden dabei nicht eingesetzt. In dieser Arbeit werden die 3D-Modelle für jede Strecke in vier Schritten aufgebaut (vgl. Bild 4-13):

- 1) Die **Diskretisierung** erfolgt auf Basis der Einträge im Logikmodell: Ausgangspunkte sind dabei die Beschreibung der Referenzlinien und des lateralen Profils. Die kontinuierliche Referenzlinie wird dafür zunächst in einem vordefinierten Abstand Δs abgetastet, um Stützpunkte für die weitere Diskretisierung zu erhalten. Für jeden Fahrstreifen im lateralen Profil werden anschließend Eckpunkte (engl. *vertices*) für die Fahrstreifen und, falls vorhanden, für die Fahrbahnmarkierung erstellt. Die x - y -Position ergibt sich dabei jeweils aus der Fahrstreifenbreite und der Breite der Fahrbahnmarkierung. Die z -Koordinate (Höhe) jedes Punkts ergibt sich aus der Ausgangshöhe z_0 , die dem Höhenplan entnommen wird, den Querneigungswinkeln sowie der Fahrbahnbreite. Das Resultat der Diskretisierung ist je Fahrstreifen bzw. Fahrbahnmarkierung eine Liste von Punkten, die als Eckpunkte der Geometrie gelten.
- 2) Im Rahmen der **Triangulierung** werden die Eckpunkte zu einer Geometrie zusammengefasst, die aus Polygonen (Dreiecke) besteht. Dafür werden je Punktliste Dreieckbänder (engl. *triangle strip* [NDW93, S. 37]) generiert. Das Verfahren ist einfach: Jeweils drei aufeinander folgende Punkte der geordneten Punktliste werden im Uhrzeigersinn miteinander verbunden, wobei die letzten zwei Eckpunkte des Vorgängerdreiecks jeweils die ersten beiden Eckpunkte des aktuellen Dreiecks sind. Das Ergebnis der Triangulierung ist je Fahrstreifen eine Folge von Dreiecken, die zusammen ein Dreieckband beschreiben. Insgesamt ist die Fahrbahnoberfläche damit geometrisch approximiert.

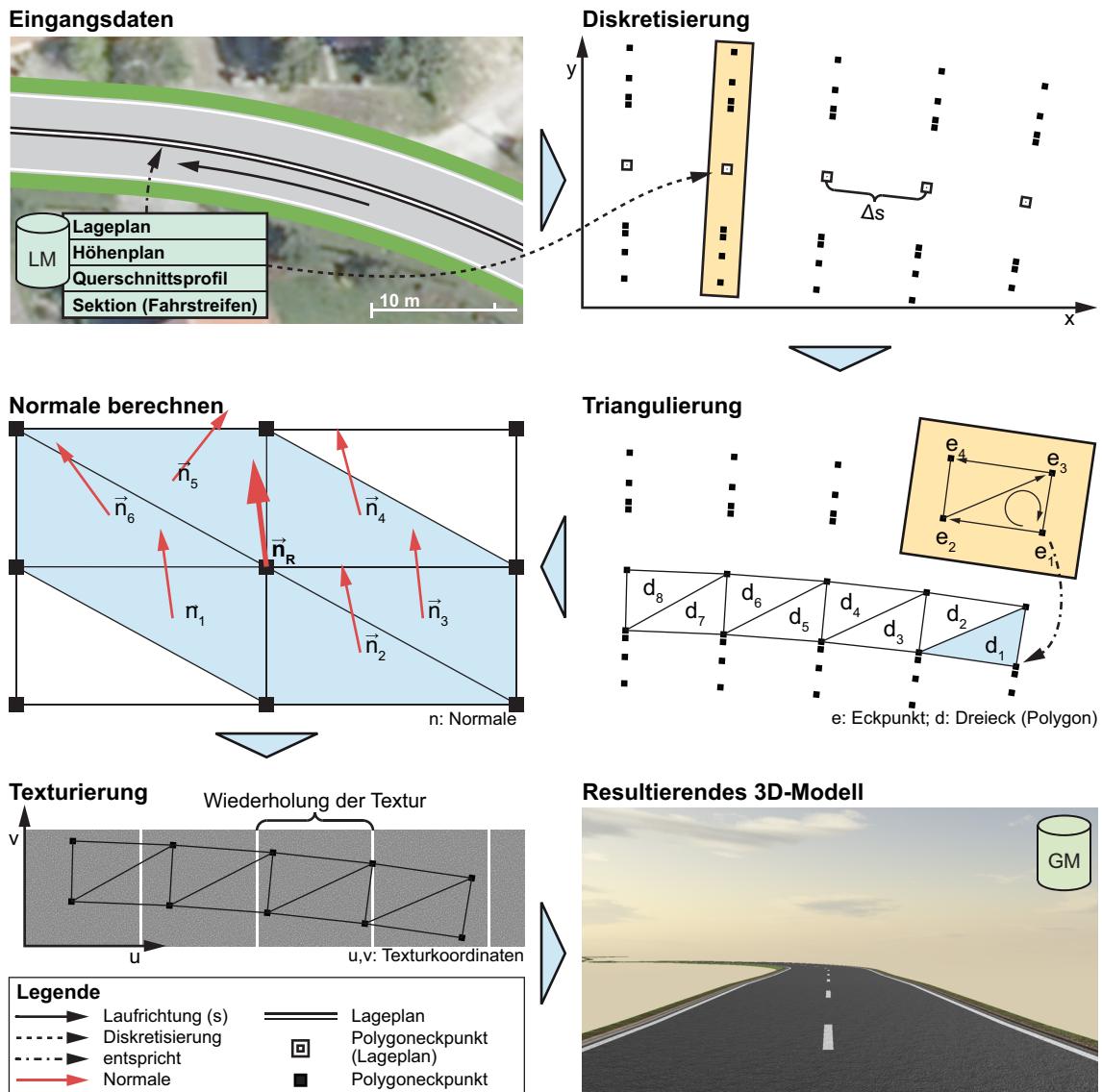


Bild 4-13: Generierung von 3D-Modellen einzelner Strecken auf Basis des Logikmodells.

- 3) Zur realitätsnahen Darstellung der Geometrie unter simulierter Beleuchtung sind **Normale⁶⁶ festzulegen** [NDW93, S. 52ff.]. Auch hier ist das Verfahren unkompliziert: Zunächst werden sämtliche Dreiecke ermittelt, für die der aktuelle Eckpunkt einen Eckpunkt darstellt. Für diese Dreiecke wird jeweils die Normale berechnet. Die resultierende Normale \vec{n}_R für den gegenwärtigen Eckpunkt ist schließlich der normalisierte Vektor der Summe aller Einzelnormalen.

⁶⁶ Normale stehen senkrecht auf einer Fläche [HSZ03, S. 816]. Im vorliegenden Fall wird eine Fläche durch ein einzelnes Polygon beschrieben.

- 4) Die **Texturierung** ermöglicht schließlich eine realitätsnahe Darstellung der Oberflächen einzelner Polygone (vgl. Abschnitt 2.3.2.2). Für Fahrstreifen und Fahrbahnmarkierungen werden in dieser Arbeit hochauflösende Texturen mit wiederkehrendem Muster eingesetzt. Diese garantieren einen nahtlosen Übergang an Texturgrenzen. Die Zuweisung der Textur erfolgt auf Basis von Texturkoordinaten, die den Eckpunkten eines Polygons zugeordnet werden. Randlose Texturen ermöglichen dabei die einfache Zuordnung über eine simple Dreisatzrechnung.

Mit Abschluss der Texturierung sind die 3D-Modelle der Strecken vollständig als texturierte 3D-Facettenmodelle beschrieben und können somit in einem Bildgenerator verarbeitet werden. Bild 4-13 zeigt exemplarisch einen Streckenabschnitt des resultierenden 3D-Modells.

4.5.2 Bildung von 3D-Modellen einzelner Knotenpunkte

Knotenpunkte werden im Logikmodell vorrangig durch Abbiegerelationen und Abbiegepfade repräsentiert (vgl. Abschnitte 2.3.2.1 und 4.4.1). Komplexe, weitgehend individuell gestaltete Fahrbahnmarkierungen (bspw. für Fußgängerüberwege oder einzelne Abbiegefahrstreifen) werden dabei nicht berücksichtigt. Diese sind jedoch für eine realitätsnahe Darstellung des Verkehrsknotens notwendig. Ziel ist daher, Graphikmodelle von Verkehrsknoten zu bilden, die dem realen Vorbild weitgehend entsprechen. Die Bildung dieser 3D-Modelle erfolgt in einem gesonderten Schritt, da mit Ausnahme des Orthophotos keine Informationen hinsichtlich des Aussehens und der Geometrie vorliegen und die entsprechenden 3D-Modelle daher weitgehend manuell modelliert werden müssen.

Auf Basis der generierten 3D-Modelle des vorherigen Schritts werden die 3D-Modelle für Verkehrsknoten grundsätzlich in drei Schritten modelliert. Dieses Verfahren erfolgt in Anlehnung an KURTEANU und KURTEANU [KK10, S. 37ff.]. Bild 4-14 zeigt das Vorgehen exemplarisch für eine Kreuzung:

- 1) **Ermitteln der Eckpunkte:** Ausgehend vom Kreuzungsmittelpunkt werden in einer vordefinierten Laufweite Δs entlang sämtlicher eingehender Strecken Eckpunkte der Kreuzungsfläche ermittelt, die an den Fahrbahnranden liegen (e_1 bis e_8 in Bild 4-14). Diese Schnittpunkte werden anschließend mit weiteren Eckpunkten verbunden, die einen Linienzug darstellen, der jeweils einen Kreisbogen approximiert.
- 2) **Generierung der Kreuzungsfläche:** Die berechneten Eckpunkte beschreiben die Kreuzungsfläche. Diese Fläche wird mit Hilfe einer Delaunay-Triangulierung [Che89] in ein 3D-Modell überführt. Diese Triangulierung liefert gleichzeitig die notwendigen Normalen und Texturkoordinaten, so dass die Fläche gleichzeitig mit einer Asphalttextur belegt werden kann. Als Resultat entsteht dabei ein texturiertes 3D-Facettenmodell der Kreuzungsfläche.

- 3) **Modellierung und Texturierung der Fahrbahnmarkierungen:** Da Informationen vorliegen, müssen die Fahrbahnmarkierungen im letzten Schritt manuell modelliert und texturiert werden. Bild 4-14 zeigt exemplarisch ein resultierendes Graphikmodell einer Kreuzung.

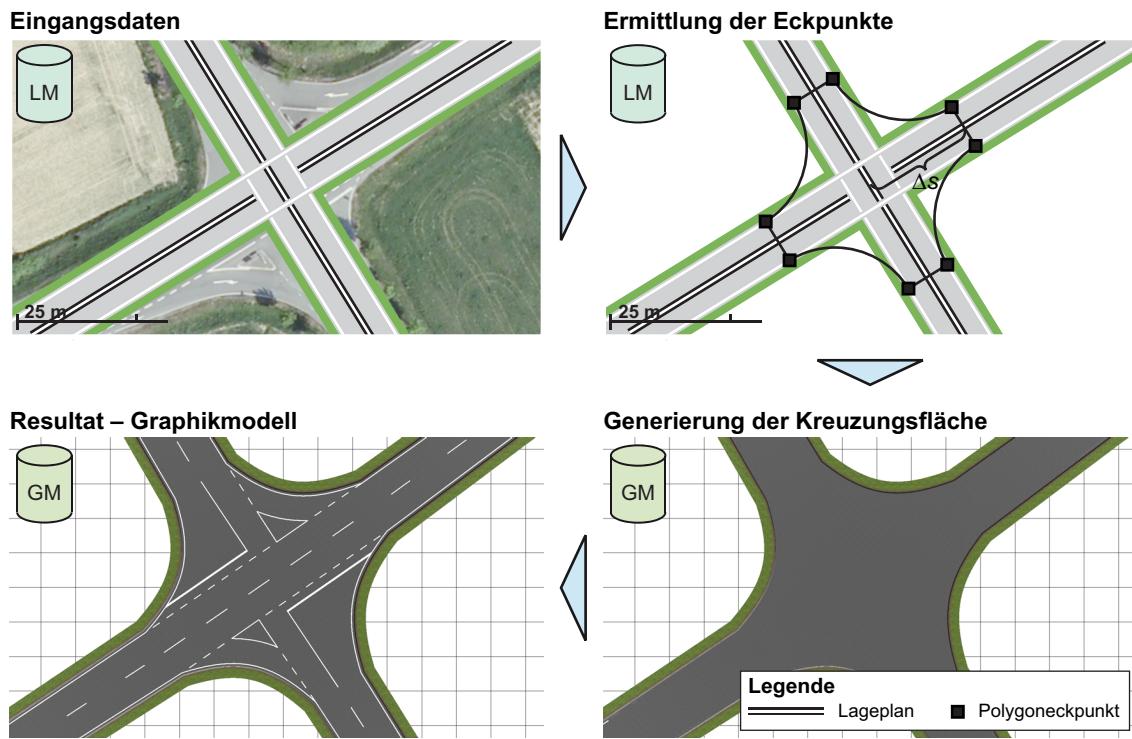


Bild 4-14: Bildung von 3D-Modellen einzelner Knotenpunkte: Die Eckpunkte der Kreuzungsfläche werden generiert, die Modellierung der Fahrbahnmarkierungen erfolgt manuell.

Insgesamt ist das Resultat dieser Phase ein vollständiges Graphikmodell des Verkehrsnetzes, welches jedoch keine Umgebung beinhaltet (vgl. Bild 4-13). Grundsätzlich ist dieses Modell dennoch geeignet, um einfache Versuchsfahrten durchzuführen und die Resultate zu visualisieren.

4.6 Generierung von 3D-Modellen der Umgebung

Das Graphikmodell wird in dieser Phase um eine virtuelle Umgebung erweitert. Ziel ist, dem Benutzer der virtuellen Versuchsfahrt ein weitgehend realistisches Abbild der näheren Umgebung des Verkehrsnetzes zu bieten. Für das Präsenzempfinden und die Selbstlokalisierung sind dabei besonders das Gelände sowie markante Landmarken wie Gebäude und Vegetation relevant [AB01, S. 5f.].

Die Szene wird zunächst um ein 3D-Modell des Geländes erweitert (Abschnitt 4.6.1), das anschließend mit dem Verkehrsnetz der vorherigen Phase zusammengeführt wird (Abschnitt 4.6.2). Darüber hinaus sind Verkehrsmobiliar (Abschnitt 4.6.3) sowie Gebäude und Baumformationen (Abschnitt 4.6.4) in die Szene zu integrieren.

4.6.1 Generierung von 3D-Modellen des Geländes

Für interaktive Fahrsimulationen ist der unmittelbare Nahbereich der Strecken von entscheidender Bedeutung (vgl. Abschnitt 2.3.2). In erster Linie gehört dazu auch das umgebende Gelände. Ziel dieser Tätigkeit ist daher, ein Graphikmodell des Geländes im Nahbereich des Verkehrsnetzes zu generieren.

Grundlage der Generierung einzelner 3D-Modelle des Geländes ist das im Logikmodell hinterlegte Verkehrsnetz, das digitale Geländemodell sowie digitale Orthophotos. Das digitale Geländemodell beschreibt ein regelmäßiges Raster mit Höhenwerten des Geländes. Digitale Orthophotos bilden die Landschaft als Rastergraphik ab (vgl. Abschnitt 2.4.3).

Das 3D-Modell des Geländes⁶⁷ wird in dieser Arbeit in mehrere 3D-Modelle geteilt, die jeweils Kacheln relativ geringer geographischer Ausdehnung beschreiben. Diese Unterteilung ermöglicht erstens das Graphikmodell auf den Nahbereich des Verkehrsnetzes zu begrenzen, zweitens begünstigen einzelne Kacheln die Verarbeitung des Graphikmodells im Bildgenerator des Fahrsimulators (vgl. [Ber05, S. 104f.]) und drittens kann ein simples Verfahren zur Triangulierung und Texturierung des Geländes eingesetzt werden.

Das 3D-Geländemodell wird in folgenden sechs Schritten gebildet (Bild 4-15):

- 1) **Kachelung der Gesamtfläche:** Ausgangspunkt ist der bestehende Lageplan im Logikmodell. Zunächst werden die zwei Randpunkte des Lageplans bestimmt, deren geographische Lage am weitesten im Süd-Westen bzw. im Nord-Osten liegt. Diese beschreiben eine rechteckige Fläche, die den Lageplan vollständig enthält. Die rechteckige Fläche wird anschließend in gleichmäßig verteilte, quadratische Kacheln unterteilt.
- 2) **Definition der Nahbereichsfläche:** Der Straßenverlauf ist der primäre Konstruktionsfaktor (vgl. Abschnitt 2.3.2). Der für das Graphikmodell relevante Bereich liegt in der unmittelbaren Umgebung, da die Sichtweite in der Umgebung selten größer als 200 m ist. In diesem Schritt wird daher die für das Graphikmodell relevante Fläche ermittelt. In Anlehnung an CARLES [Car01, S. 102ff.] wird dazu entlang des Lageplans in einem vordefinierten Abstand eine geschlossene Kontur berechnet, die den relevanten Bereich beinhaltet.

⁶⁷ Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Begriff 3D-Geländemodell verwendet, um das 3D-Modell des Geländes als Teilmодell des Graphikmodells zu beschreiben. Dieses ist von dem digitalen Geländemodell (DGM) zu unterscheiden.

- 3) **Identifikation relevanter Kacheln:** Die Nahbereichsfläche und die einzelnen Kacheln der Gesamtfläche werden überlagert. Wenn eine Kachel von der Kontur geschnitten wird, so wird diese Kachel als relevant markiert, andernfalls verworfen.
- 4) **Bestimmung des Geländeprofiles:** Für jede als relevant markierte Kachel wird das Geländeprofil bestimmt. Dazu werden sämtliche Höhenwerte aus dem digitalen Geländemodell extrahiert, die innerhalb der Kachelkoordinaten vorhanden sind. Das Ergebnis ist eine Matrix⁶⁸ mit Höhenwerten.
- 5) **Generierung der Geländetexturen:** Für sämtliche Kacheln sind einzelne Texturen zu generieren. Diese werden entsprechend der Randkoordinaten der Kacheln aus dem digitalen Orthophotos extrahiert.
- 6) **Triangulierung und Texturierung:** Die einzelnen 3D-Modelle der Landschaftskacheln werden schließlich auf Basis des Geländeprofils und der Einzeltexturen gebildet. Dafür wird zunächst das 3D-Facettenmodell generiert und anschließend mit Texturkoordinaten versehen. Die Triangulierung (inkl. der Berechnung von Normalen) und Texturierung erfolgt analog zur Technik, die bereits zur Generierung von 3D-Modellen einzelner Strecken (Abschnitt 4.5.1) eingesetzt wurde.

Bild 4-15 zeigt das resultierende 3D-Geländemodell für die gesamte Validierungsumgebung Rüthen in der Übersicht. Da nur der Nahbereich der Strecke im Graphikmodell abgebildet wird, wurde ein großes Gebiet im Zentrum der Strecke nicht als 3D-Modell abgebildet.

⁶⁸ Unter einer Matrix wird ein *rechteckiges Schema von Zahlen* verstanden [HSZ03, S. 633].

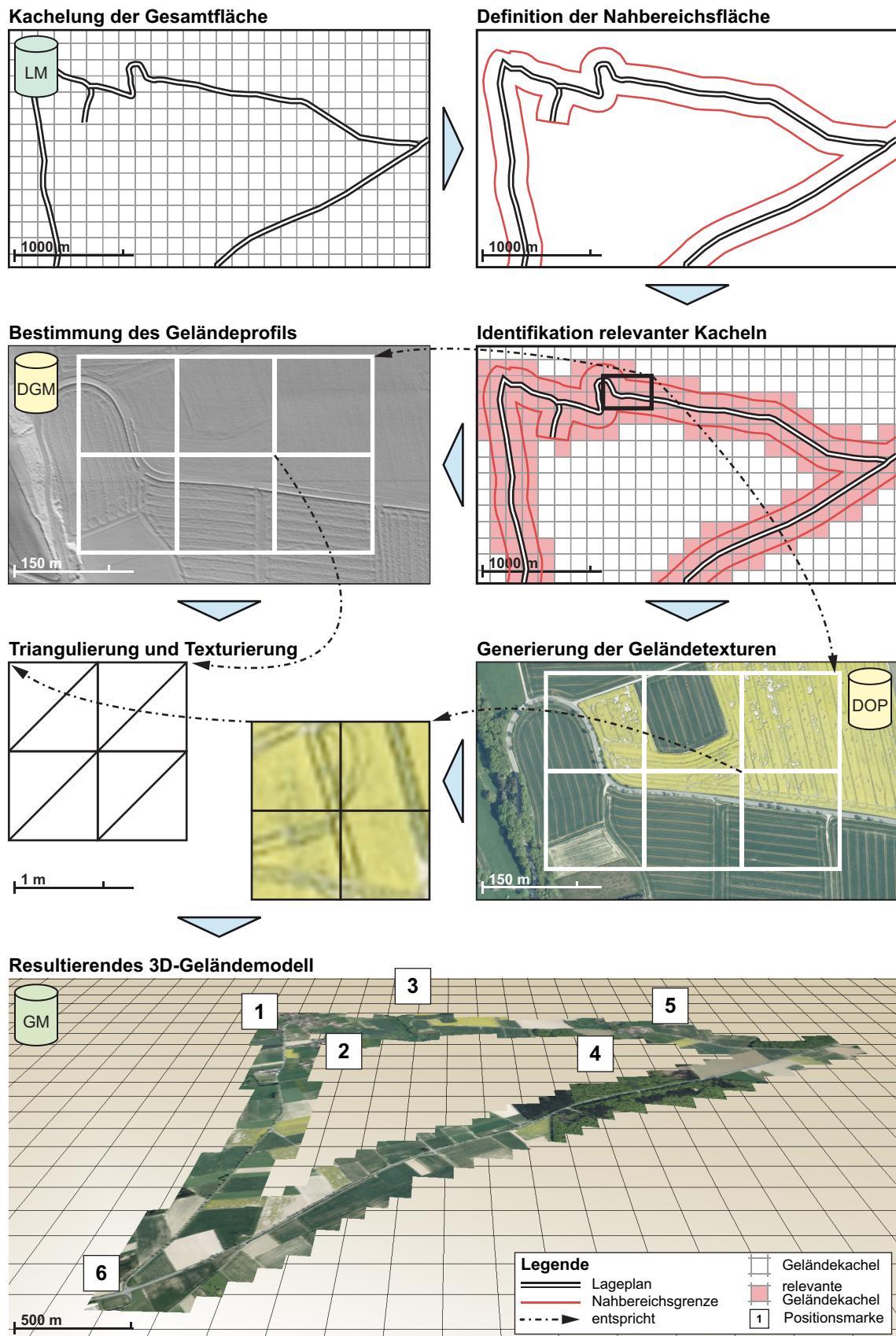


Bild 4-15: Generierung von 3D-Modellen des Geländes auf Basis des Logikmodells, des digitalen Geländemodells sowie der digitalen Orthophotos.

4.6.2 Zusammenführung von Gelände und Verkehrsnetz

Die 3D-Modelle des Verkehrsnetzes und der umgebenden Landschaft wurden bis hierhin weitgehend unabhängig voneinander generiert. Die entstehenden 3D-Modelle korrelieren zwar generell in der geographischen Lage – letztlich basieren sie auf den gleichen Geodaten – geringe Abweichungen erfordern jedoch das Zusammenführen von 3D-Geländemodell mit den 3D-Modellen des Verkehrsnetzes. So führt bspw. insbesondere die Interpolation des Höhenplans auf Basis verrauschter Höhenwerte im digitalen Geländemodell (vgl. Abschnitt 4.2.3) zu Darstellungsfehlern, wenn die 3D-Modelle von Gelände und Verkehrsnetz zugleich dargestellt werden.

Bild 4-16 stellt die Ausgangsposition im Graphikmodell und als schematischen Fahrbahnquerschnitt dar: Die Abweichung in den Höhenwerten haben zur Folge, dass das 3D-Modell der Strecke an einigen Stellen von dem darunterliegenden 3D-Geländemodell durchstoßen wird. An den Rändern der Fahrbahn treten ferner vereinzelt Lücken auf. Zur fehlerfreien Darstellung wird in Anlehnung an CARLES [Car01, S. 79ff.] sowie KURTEANU und KURTEANU [KK10, S. 48ff.] ein ergebnisorientiertes Verfahren eingesetzt:

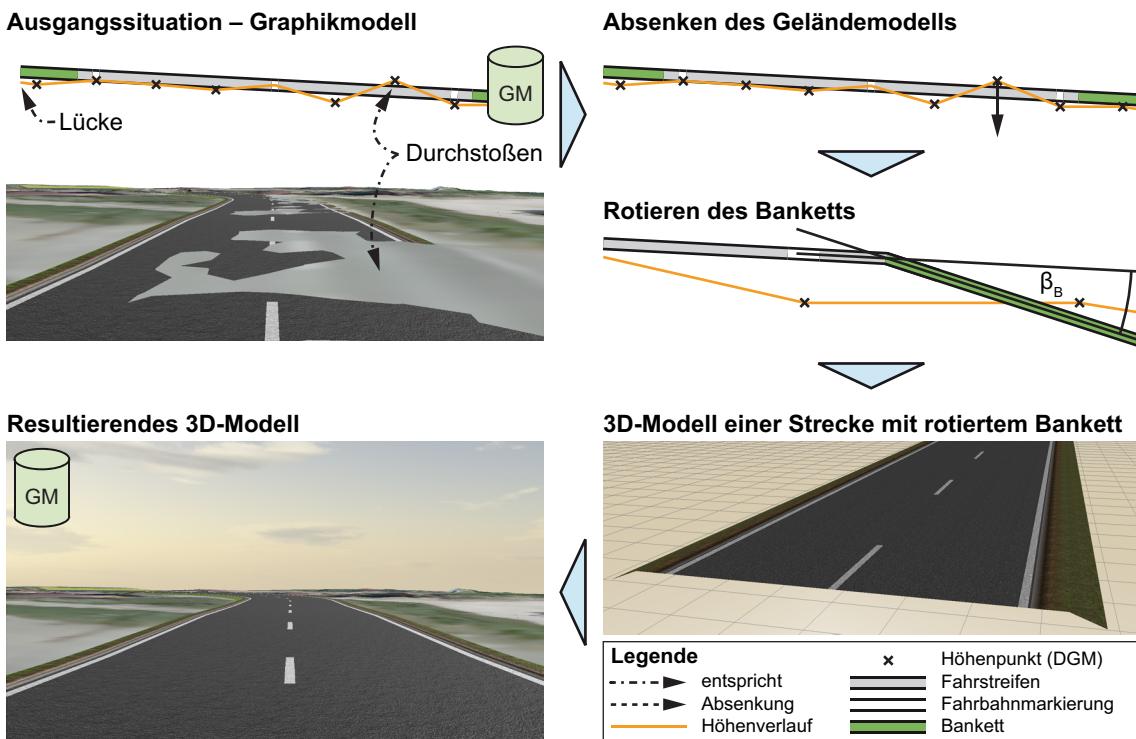


Bild 4-16: Zusammenführung von Gelände und Verkehrsnetz durch Absenken des Geländemodells und Rotation des an die Straße grenzenden Banketts.

Zunächst wird das 3D-Geländemodell unter dem Verkehrsnetz abgesenkt, um ein Durchstoßen zu verhindern. Die dabei auftretende Verfälschung des 3D-Geländemodells ist irrelevant, da der Benutzer das 3D-Modell der Straße wahrnimmt und das Fahrdynamik- und Reifenmodell der Fahrzeugsimulation ohnehin auf dem Lo-

gikmodell operiert (vgl. Abschnitt 2.3.2.3). Anschließend wird das 3D-Modell des Banketts etwas rotiert. Das texturierte Bankett wirkt dabei wie eine Blende; sie schließt auftretende Lücken am Fahrbahnrand und ermöglicht damit eine fehlerfreie Darstellung. Bild 4-16 zeigt exemplarisch das Resultat.

4.6.3 Integration von Verkehrsmobiliar

Die bestehenden 3D-Modelle von Verkehrsnetz und Umgebung sind um 3D-Modelle des Verkehrsmobiliars zu erweitern. Die dabei eingesetzten Verkehrszeichen, Leitpfosten usw. erhöhen den Realitätsgrad der Szene; sie dienen vorrangig dem menschlichen Benutzer der interaktiven Fahrsimulation.

Ausgangspunkt sind die im Logikmodell hinterlegten verkehrsrelevanten Attribute (vgl. Abschnitt 4.4.2), die Datenbank mit 3D-Modellen wiederkehrender Objekte im Verkehrsbild sowie das digitale Geländemodell und die digitalen Orthophotos.

Auf Basis der genannten Eingangsdaten werden die entsprechenden 3D-Modelle entweder automatisch oder manuell, funktionsunterstützt platziert. Bild 4-17 zeigt beide Vorgehen am Beispiel von Verkehrszeichen bzw. Leitpfosten.

- Für sämtliche verkehrsrelevanten Attribute im Logikmodell werden entsprechende Verkehrszeichen in der Szene platziert. Die Position in x - y -Koordinaten ist dabei ebenso im Logikmodell hinterlegt wie die Art des Verkehrszeichens sowie dessen Orientierung entgegen der Fahrtrichtung. Die z -Koordinate wird aus dem digitalen Geländemodell extrahiert und das 3D-Modell schließlich an der entsprechenden Position in der Szene platziert.
- Verkehrsmobiliar, das nicht im Logikmodell beschrieben ist (bspw. Leitpfosten oder Schutzplanken) muss manuell in der Szene platziert werden. Das Logikmodell dient hier dennoch als Grundlage: Einzelnes Mobiliar kann manuell als Eigenschaft der Strecke definiert werden und in einem vorgegebenen Abstand d_V zur Referenzlinie positioniert werden. Die Positionierung erfolgt dabei funktionsunterstützt. Ferner ist eine vollständig manuelle Platzierung von Einzelmobiliar auf Basis des Orthophotos möglich. Die letztliche Platzierung der entsprechenden Modelle in der Szene erfolgt analog zur Platzierung von Verkehrsschildern.

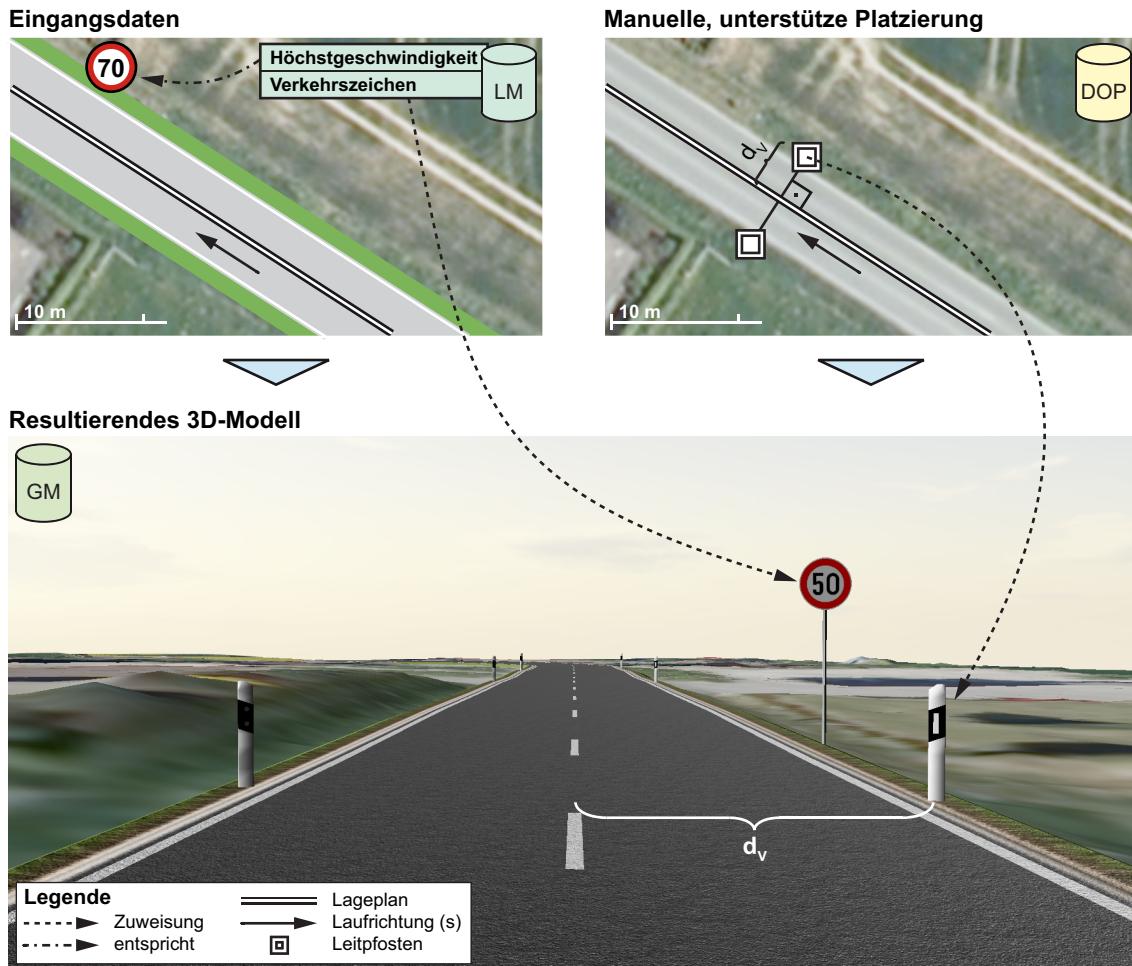


Bild 4-17: Integration von Verkehrsmobilien auf Basis des Logikmodells und durch manuelles, funktionsunterstütztes Platzieren.

4.6.4 Integration von Gebäuden und Baumformationen

Die Abbildung von Gebäuden und Wäldern in der virtuellen Szene erhöht den Realitätsgrad signifikant: Als prominente Landmarken unterstützen sie den Fahrer bei der Selbstlokalisierung; sie tragen damit maßgeblich dazu bei, dass der Fahrer die virtuelle Umgebung der realen Umgebung zuordnen kann [AB01, S. 5f.]. In diesem Schritt sind daher Gebäude und Baumformationen in die Szene zu integrieren.

Das digitale 3D-Stadtmodell beinhaltet Lagekoordinaten und den Grundriss einzelner Gebäude sowie Attribute, die dem jeweiligen Gebäude zugeordnet sind, bspw. die Gebäudehöhe. Das digitale Landschaftsmodell beschreibt topographische Objekte inklusive der Objektart; dies beinhaltet die Kennzeichnung von Waldflächen (vgl. Abschnitt 2.4.2.4). Diese Geodaten sind zusammen mit der bisher gebildeten Szene Grundlage der Integration von Gebäuden und Baumformationen. Die automatische Verteilung einzelner Bäume orientiert sich dabei an der entsprechenden Funktion im Trian3D Builder [KNW09, S. 91ff.] (vgl. Abschnitt 3.3.1). Es werden folgende Schritte durchgeführt (Bild 4-18):

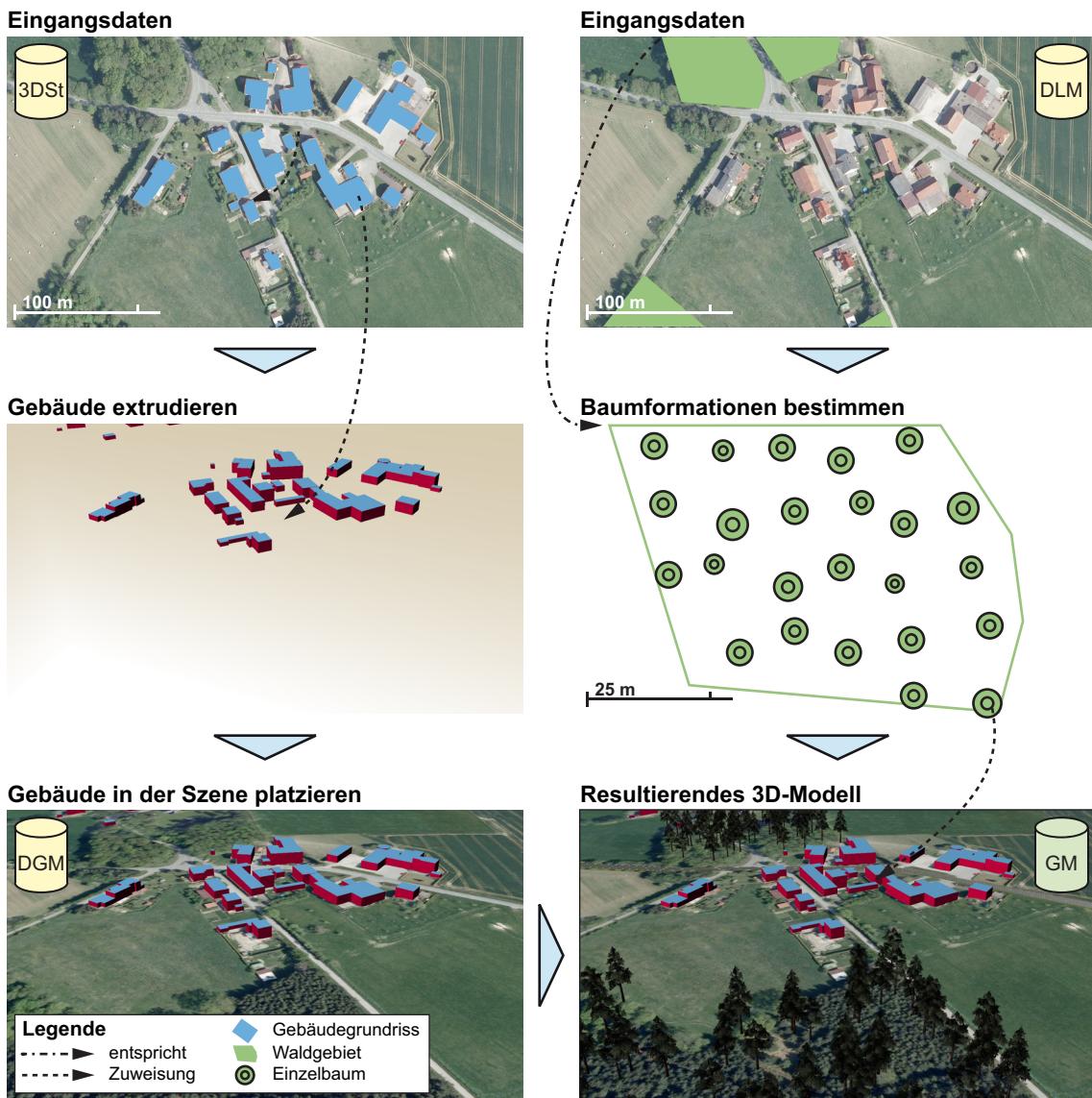


Bild 4-18: Integration von Gebäuden und Baumformationen auf Basis des digitalen 3D-Stadtmodells und des digitalen Landschaftsmodells.

- 1) **Gebäude extrudieren:** Für einzelne Gebäude wird der Grundriss aus dem 3D-Stadtmodell extrahiert; die Geometrie liegt dabei als Polygonzug vor. Ferner wird jeweils das Attribut der Gebäudehöhe ausgelesen. Auf Basis dieser Daten wird der Grundriss zu einem 3D-Facettenmodell extrudiert.
- 2) **Gebäude in der Szene platzieren:** Die extrudierten 3D-Facettenmodelle werden auf Basis der Lagekoordinaten des Gebäudes und einem Höhenwert aus dem digitalen Geländemodell in der Szene platziert.
- 3) **Waldflächen identifizieren:** Sämtliche als Wald gekennzeichnete Flächen werden aus dem digitalen Landschaftsmodell ausgelesen. Die Geometrie der Flächen wird dabei ebenfalls als Polygonzug beschrieben.

- 4) **Baumformationen in der Szene platzieren:** Innerhalb der identifizierten Waldflächen werden Baumformationen berechnet. Dabei wird eine zufällige Verteilung der Position, Orientierung und Größe einzelner Bäume vorgenommen. Für diese Parameter werden anschließend entsprechende 3D-Modelle einzelner Bäume auf dem 3D-Geländemodell in der Szene platziert.

Bild 4-18 zeigt das resultierende 3D-Modell der gesamten Szene mit den extrudierten Gebäuden und einzelnen Bäumen.

Das Resultat dieser Phase ist ein Graphikmodell, welches das Verkehrsnetz inkl. Verkehrsmobiliar, ein texturiertes 3D-Facettenmodell des Geländes sowie Gebäudegrundrisse und Baumformationen enthält. Bild 4-19 zeigt eine Impression dieses geospezifischen Graphikmodells, das weitgehend automatisiert auf Basis von Geodaten generiert wird. Die erzielte visuelle Qualität variiert dabei zwischen den einzelnen Teilmodellen: Während die Straßenverläufe hochdetailliert dargestellt werden und die Landschaft ebenfalls eine gute visuelle Qualität bietet, sind Gebäude bisher lediglich als nicht texturierte Quader vorhanden, da die notwendige Fassadentextur in gegenwärtigen Geodaten nicht zur Verfügung steht. Die zugrundeliegenden Geodaten ermöglichen gegenwärtig keine detailliertere Darstellung.

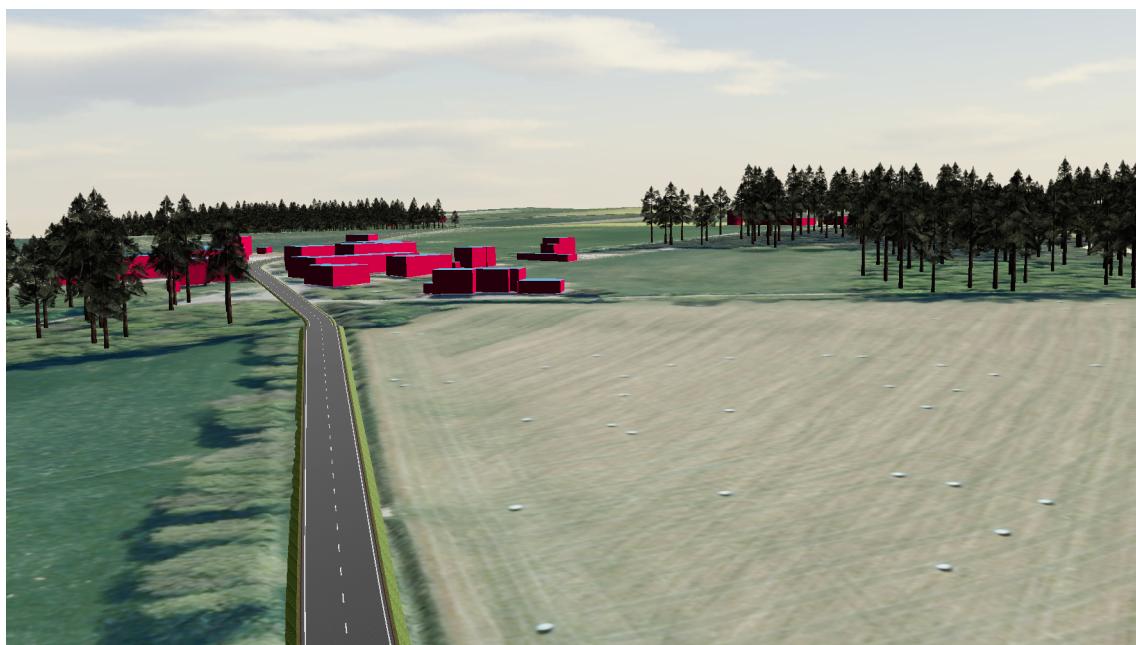


Bild 4-19: Impression eines geospezifischen Graphikmodells, das auf Basis der eingesetzten Geodaten weitgehend automatisiert gebildet wurde.

4.7 Fertigstellung des Graphikmodells

In der letzten Phase des Vorgehensmodells ist das Graphikmodell fertigzustellen. Dabei soll die visuelle Qualität einzelner 3D-Modelle gesteigert und das Graphikmodell auf den Einsatz in einem Bildgenerator vorbereitet werden. Die dafür notwendigen Model-

lierungstätigkeiten liegen außerhalb des Fokus der vorliegenden Arbeit, weil dabei keine Geodaten eingesetzt werden und die visuelle Qualität des Graphikmodells nicht unmittelbar zum Virtual Prototyping von Fahrerassistenzsystemen beiträgt. Dennoch sind diese Tätigkeiten erforderlich, um vollständige Umgebungsmodelle zu bilden, die für interaktive Fahrsimulationen eingesetzt werden können. Zur Durchführung der im Folgenden skizzierten Modellierungstätigkeiten wurde im Rahmen dieser Arbeit auf die Funktionen von Presagis Creator (vgl. Abschnitt 3.3.1) zurückgegriffen. Zunächst werden die generierten 3D-Modelle detailliert (Abschnitt 4.7.1), anschließend wird die Modellkomplexität einzelner 3D-Facettenmodelle reduziert (Abschnitt 4.7.2).

4.7.1 Detaillierung einzelner 3D-Modelle

Der Detailgrad einzelner 3D-Modelle bestimmt maßgeblich die Darstellungsqualität der Szene. Hochdetaillierte 3D-Modelle steigern den Realitätsgrad der virtuellen Versuchsfahrt. Sie erfordern jedoch gleichzeitig ein hohes Maß an Modellierungsaufwand. Der zu erstrebende Detailgrad der 3D-Modelle ist daher anwendungsspezifisch festzulegen. Interaktive Fahrsimulationen im technischen Umfeld besitzen in diesem Zusammenhang häufig eine deutlich geringere Darstellungsqualität als bspw. kommerzielle Computerspiele mit Fahrzeugbezug – der immens hohe Modellierungsaufwand zur Erstellung derartig detailreicher Modelle ist für das technische Umfeld schlicht zu hoch.

Geodaten bieten gegenwärtig sicherlich nicht den notwendigen Detailgrad für vollständige Graphikmodelle interaktiver Fahrsimulationen. Zwar ermöglichen hochauflöste digitale Geländemodelle und Orthophotos die Generierung qualitativ hochwertiger 3D-Geländemodelle (vgl. Abschnitt 4.6.1), flächendeckende Geodaten, die texturierte Gebäude oder gar Dekorationsobjekte beinhalten sind gegenwärtig jedoch nicht verfügbar. Es bleiben daher weitere Modellierungstätigkeiten erforderlich. Dabei ist die Geometrie einzelner Objekte auszustalten und mit entsprechenden Texturen zu versehen. Diese Tätigkeiten können, je nach Anforderung an die Darstellungsqualität, sämtliche 3D-Modelle einer Szene betreffen.

Bild 4-4 zeigt Beispiele der manuellen Detaillierung einzelner 3D-Modelle, die zunächst auf Basis von Geodaten generiert wurden. Diese Beispiele verdeutlichen auch die Bandbreite unterschiedlicher Detailgrade: Während die Integration von Fahrbahnmarkierungen in die Kreuzungsgeometrie ein sehr feines Detail der gesamten Szene darstellt, ist die manuelle Ausgestaltung einzelner Gebäude eine Voraussetzung für eine realitätsnahe Abbildung der Umgebung.

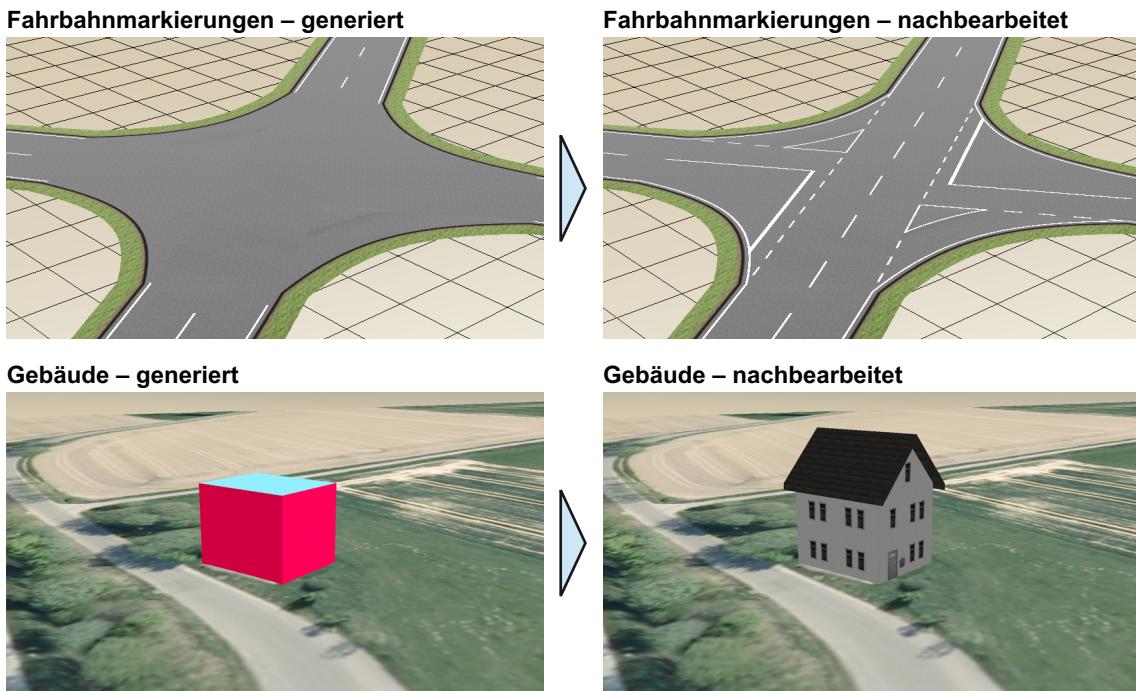


Bild 4-20: Detaillierung einzelner 3D-Modelle am Beispiel von Fahrbahnmarkierungen und einzelnen Gebäuden.

Mit der Detaillierung einzelner 3D-Modelle ist die Bildung des Graphikmodells abgeschlossen. Sämtliche 3D-Modelle sollten mit Abschluss dieser Tätigkeit in der angestrebten visuellen Qualität vorliegen.

4.7.2 Reduzierung der Komplexität einzelner 3D-Facettenmodelle

Der Bildgenerator der interaktiven Fahrsimulation muss zwingend eine Bildwiederholrate von mehr als 30 Bildern pro Sekunde erreichen, damit für das menschliche Auge der Eindruck einer bewegten Szene entsteht (vgl. Abschnitt 2.3.1). Die Komplexität der 3D-Facettenmodelle ist dabei ein wesentlicher Faktor: Je mehr Facetten ein 3D-Modell beinhaltet, desto weniger Bilder pro Sekunde können dargestellt werden. Die Anzahl an Facetten ist daher für jedes 3D-Modell weitest möglich zu reduzieren; gleichzeitig ist dabei jedoch die visuelle Qualität zu erhalten.

Zur Reduzierung der Modellkomplexität und zur Generierung unterschiedlicher Level of Detail (vgl. Abschnitt 2.3.2.2) wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf die Funktionalität des Presagis Creator zurückgegriffen. Bild 4-21 zeigt einen Geländeauschnitt vor und nach der Modellreduzierung.

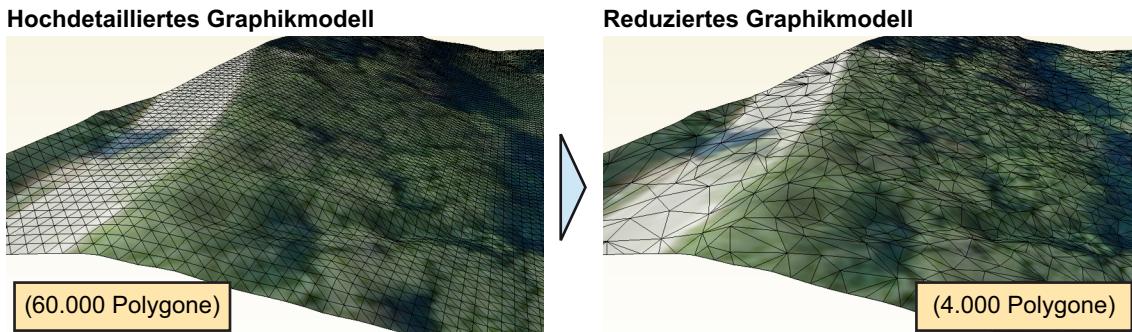


Bild 4-21: Reduzierung der Komplexität einzelner 3D-Facettenmodelle am Beispiel eines Geländeausschnitts.

Mit der letzten Phase sind sowohl Logik- als auch Graphikmodell zueinander korrelierend, systematisch und umfassend erarbeitet. Insgesamt ist damit die vollständige Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für interaktive Fahrsimulationen abgeschlossen.

4.8 Anwendungsspezifische Adaptierung des Vorgehensmodells

Die Abschnitte 4.2 bis 4.7 beschreiben die Bildung vollständiger geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen. In Anbetracht unterschiedlicher Validierungsmethoden und -technologien für Fahrerassistenzsysteme (vgl. Abschnitt 2.2.3.2) ergeben sich jedoch unterschiedliche Anforderungen an die Ausprägung der eingesetzten Umgebungsmodelle. Es sind nicht für jeden Anwendungsfall der Fahrsimulation das komplette Vorgehensmodell zu durchlaufen und sämtliche Elemente im Umgebungsmodell zu erstellen.

Der vorliegende Abschnitt beschreibt daher die Adaptierung des Vorgehensmodells, um anwendungsspezifisch ausgeprägte Umgebungsmodelle zu generieren. Dabei wird angenommen, dass der zu erzielende Detailgrad einzelner Elemente des Umgebungsmodells im Vorfeld definiert wird. Dies umfasst bspw. Toleranzwerte für die Genauigkeit des Streckenverlaufs oder die Festlegung von Detaillierungsgraden für einzelne 3D-Modelle im Graphikmodell.

Ein Anwendungsbeispiel: Zur frühzeitigen Erprobung der Regelungssoftware eines prädiktiven Scheinwerfersystems mittels Software in the Loop, ist zunächst ein einzelner geospezifischer Streckenverlauf notwendig, der nicht mehr als einen Meter vom realen Streckenverlauf abweichen darf. Dieser Streckenverlauf genügt, um das grundsätzliche Verhalten der Regelungssoftware im Rahmen einer interaktiven Versuchsfahrt mit dem Eigenfahrzeug analysieren zu können. Das zum Anwendungsbeispiel entsprechende Umgebungsmodell beinhaltet daher lediglich die einzelne Strecke, die nicht unbedingt in eine Umgebung eingebettet sein muss.

Zur anwendungsspezifischen Adaptierung des Vorgehensmodells werden einzelne Elemente des Umgebungsmodells zu Elementgruppen zusammengefasst, die wie folgt be-

zeichnet werden: **Strecken, Knotenpunkte, Umgebung** sowie **verkehrsrelevante Attribute**, die vorrangig von den Verhaltensmodellen des Fremdverkehrs verwendet werden. Jede Elementgruppe beinhaltet dabei sowohl Logik- als auch Graphikmodelle für die bezeichneten Elemente. So beinhaltet die Gruppe Strecke bspw. sämtliche Teilmodelle zur geometrischen und physikalischen Beschreibung einzelner Streckenverläufe sowie deren 3D-Modelle.

Die Elementgruppen lassen sich kombinieren, um unterschiedlich ausgeprägte Umgebungsmodelle zu generieren. Dabei sind jeweils nur ausgewählte Phasen bzw. Tätigkeiten des Vorgehensmodells zu durchlaufen. Bild 4-22 stellt einzelne Ausprägungen des Umgebungsmodells für unterschiedliche Einsatzzwecke des Umgebungsmodells und die zur Erarbeitung dieser Ausprägung notwendigen Phasen und Einzeltätigkeiten gegenüber. Für das eingangs geschilderte Anwendungsbeispiel ist bspw. die Ausprägung 1: Strecken ohne Umgebung zur Einzelfahrzeugsimulation zu wählen. Zur Erarbeitung des entsprechenden Umgebungsmodells sind zunächst die ersten beiden Phasen des Vorgehensmodells zu durchlaufen und anschließend 3D-Modelle einzelner Strecken zu generieren.

Einzelne Ausprägungen bauen aufeinander auf. Die erarbeiteten Teilmodelle können daher wiederverwendet werden. So lässt sich Ausprägung 1 bspw. zur Ausprägung 2: Verkehrsnetz ohne Umgebung zur Einzelfahrzeugsimulation erweitern, indem lediglich Abbiegerelationen und Abbiegepfade im Logikmodell hinterlegt und entsprechende 3D-Modelle der Verkehrsknoten erstellt werden. Damit wird es möglich, Teilmodelle einzelner Elementgruppen bereits in frühen Validierungsmethoden und -technologien einzusetzen und diese im Hinblick auf den Einsatz im Fahrimulator wieder zu verwenden und weiter zu detaillieren.

Bild 4-22 zeigt weitere Ausprägungen, die analog zu den beschriebenen Beispielen zu erarbeiten sind.

Ausprägungen und Zweck des Umgebungsmodells	Gegenüberstellung einzelner Ausprägungen des UM mit den zur Erarbeitung notwendigen Phasen und Einzeltätigkeiten	Elementgruppe des Umgebungsmodells				Zur Erarbeitung der Ausprägung notwendige Phasen bzw. Einzeltätigkeiten	
		Strecken	Verkehrs-knoten	Umgebung	Verkehrs-relev. Attr.	Kapitel	Bezeichnung der Phase bzw. Tätigkeit
1: Strecken ohne Umgebung zur Einzelfahrzeugsimulation	1: Strecken ohne Umgebung zur Einzelfahrzeugsimulation	✓	✗	✗	✗	4.2	Festlegung der Achsverläufe
						4.3	Definition einzelner Fahrbahnen
						4.5.1	Gener. von 3D-Mod. einz. Strecken
	2: Verkehrsnetz ohne Umgebung zur Einzelfahrzeugsimulation	✓	✓	✗	✗	4.2	Festlegung der Achsverläufe
						4.3	Definition einzelner Fahrbahnen
3: Verkehrsnetz mit Umgebung zur Einzelfahrzeugsimulation	3: Verkehrsnetz mit Umgebung zur Einzelfahrzeugsimulation	✓	✓	✓	✗	4.2	Festlegung der Achsverläufe
						4.3	Definition einzelner Fahrbahnen
						4.4.1	Def. von Abbiegerel. und -pfaden
						4.5	Bildung von 3D-Mod. des Verkehrsn.
						4.6	Bildung von 3D-Mod. der Umgebung
4: Verkehrsnetz ohne Umgebung zur Verkehrssimulation	4: Verkehrsnetz ohne Umgebung zur Verkehrssimulation	✓	✓	✗	✓	4.2	Festlegung der Achsverläufe
						4.3	Definition einzelner Fahrbahnen
						4.4	Integration logischer Eigenschaften
						4.5	Bildung von 3D-Mod. des Verkehrsn.
	5: Verkehrsnetz mit Umgebung zur Verkehrssimulation	✓	✓	✓	✓	4.2 - 4.4	Bildung des Logikmodells
						4.5 - 4.7	Bildung des Graphikmodells

Bild 4-22: Anwendungsspezifische Adaptierung des Vorgehensmodells für unterschiedliche Ausprägungen und Anwendungsbeispiele des Umgebungsmodells.

4.9 Software-Werkzeug

Die vorangegangenen Kapitel haben das methodische Vorgehen zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle ausführlich erläutert. Die eingesetzten Hilfsmittel sind jedoch softwaretechnisch umzusetzen, um für den Benutzer letztendlich anwendbar zu sein. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Software-Werkzeug konzipiert und prototypisch implementiert. Das vorgestellte Vorgehensmodell wird mit diesem Software-Werkzeug vollständig realisiert.

Die Analyse des Stands der Technik hat gezeigt, dass Software-Werkzeuge zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen längst etabliert sind. Diese Werkzeuge erfüllen zum Teil wesentliche Funktionen, die in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben wurden. Dennoch bietet keines der untersuchten Systeme sämtliche Funktionen, die zur Umsetzung des vorgestellten Vorgehensmodells notwendig sind. Darüber hinaus sind die Systeme großenteils proprietär; mögliche Erweiterungen sind daher äu-

Berst schwer umzusetzen. Schließlich bietet keins der untersuchten Software-Werkzeuge einen dokumentierten Ansatz zum systematischen Einsatz von Geodaten.

Aus diesen Gründen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neues Software-Werkzeug konzipiert und prototypisch implementiert, das die vorgestellten Methoden und Verfahren bereitstellt. Die wesentliche Aufgabe des Werkzeugs ist, dem Entwickler die effiziente Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen zu ermöglichen. Dabei soll das System die funktionalen Anforderungen an ein Software-Werkzeug aus Abschnitt 2.6.3 erfüllen.

Eine wesentliche Funktionalität ist die Integration, Anzeige und automatisierte Verarbeitung unterschiedlicher Geodaten – das konzipierte Software-Werkzeug ist daher nach der Definition aus Abschnitt 2.4.1 ein Geo-Informationssystem.

Die Aufgaben und das grundsätzliche Konzept des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Software-Werkzeugs werden in Abschnitt 4.9.1 beschrieben. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 4.9.2 ein Überblick über die Architektur des Gesamtsystems gegeben. Schließlich werden wesentliche Aspekte der prototypischen Implementierung des Software-Werkzeugs in Abschnitt 4.9.3 erläutert.

4.9.1 Aufgaben und Konzept des Software-Werkzeugs

Zentrale Anforderungen an ein Software-Werkzeug zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle sind die automatisierte Verarbeitung von Geodaten, das datentechnische Abbilden und Exportieren einzelner Teilmodelle des Umgebungsmodells sowie die interaktive Benutzung durch den Anwender. Zur Erfüllung dieser Anforderungen sind im Wesentlichen drei Aufgaben zu bewältigen, die auf dem Konzept interner Datenmodelle beruhen (Bild 4-23):

Beim **Importieren** sind die Eingangsdaten (Geodaten oder 3D-Modelle) zunächst in interne Geodatenmodelle bzw. einen internen Szenengraphen zu überführen. Diese interne Datenschicht bildet die jeweiligen Eingangsdaten in einem generalisierten, auf den späteren Anwendungsfall zugeschnittenen Datenmodell ab. Die spezialisierten Datenmodelle ermöglichen die Integration unterschiedlicher Geodatenformate über angepasste Schnittstellen und sichern damit die Kompatibilität zu verschiedenen Geodaten des gleichen Typs. So können bspw. relevante Navigationsdaten aus OpenStreetMap ebenso importiert werden wie jene eines kommerziellen Anbieters (vgl. Anhang A2), obwohl die zugrundeliegenden Datenformate und Datenmodelle unterschiedlich sind.

Beim **Transformieren** sollen die importierten Geodaten in ein internes Datenmodell des Umgebungsmodells überführt werden, das sämtliche Eigenschaften von Umgebungsmodellen für interaktive Fahrsimulationen (vgl. Abschnitt 2.3.2) beinhaltet. Zur Transformierung werden die Methoden und Verfahren aus den vorhergehenden Abschnitten eingesetzt – diese Aufgabe umfasst im Wesentlichen die einzelnen Phasen und Tätigkeiten des vorgestellten Vorgehensmodells.

Das **Exportieren** ermöglicht die Speicherung des Umgebungsmodells in entsprechende Zieldateien, die letztlich vom Fahrsimulator verarbeitet werden. Gleichzeitig ist die Exportfunktion die Basis zur **Werkzeugkopplung**. So kann das intern abgebildete Grafikmodell bspw. in das Dateiformat OpenFlight [Pre12-ol] ausgeleitet werden. Derartige Dateien können anschließend von einem Modellierwerkzeug wie dem Presagis Creator (vgl. Abschnitt 3.3.1) geladen werden; sie eröffnen damit die Möglichkeit auf die umfangreichen Modellierungsfunktionen dieser Software-Werkzeuge zurückzugreifen, um bspw. einzelne 3D-Modelle zu detaillieren.

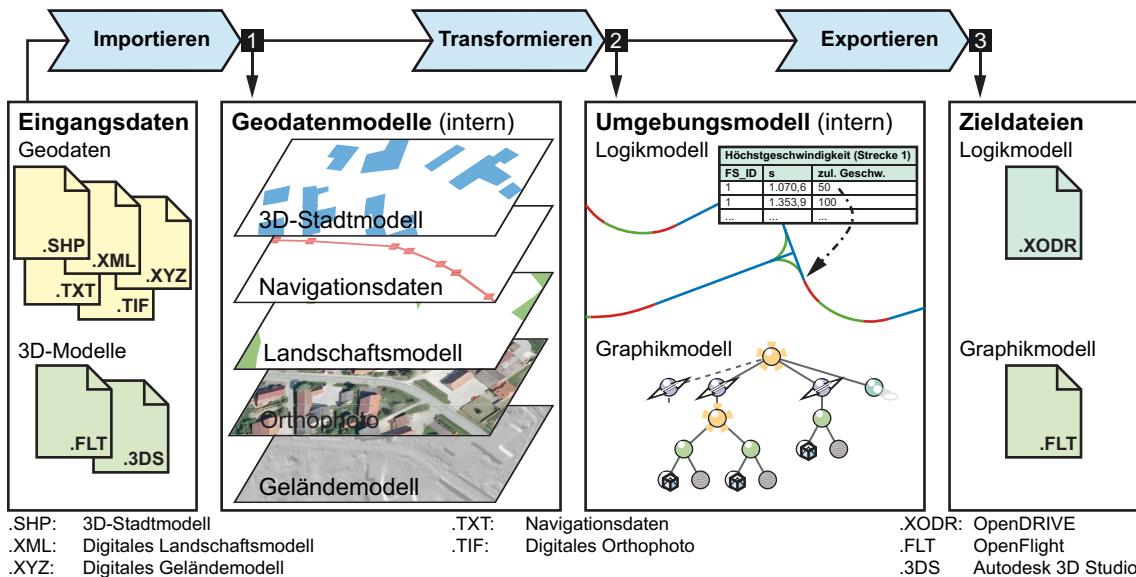


Bild 4-23: Aufgaben und Konzept des Software-Werkzeugs zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle.

4.9.2 Architektur des Gesamtsystems

Das grundsätzliche Konzept des Software-Werkzeugs legt die Architektur des Gesamtsystems zu Teilen fest: Das System muss interne Datenmodelle der Geodaten und des Umgebungsmodells bereitstellen, die mittels einer Verarbeitungseinheit und einer Benutzungsschnittstelle manipuliert werden können.

Im Allgemeinen folgt die Architektur des Gesamtsystems dem **Modell-Sicht-Steuerung Muster (MSSM)** (engl. *Model-View-Controller Pattern*), das in der Softwartechnik ein weit verbreitetes Entwurfsmuster für Softwarearchitekturen darstellt. Das MSSM trennt dabei die Benutzungsschnittstelle, die Steuerung der Anwendung und die Daten des Systems in einzelne Schichten und ermöglicht damit einen hohen Grad an Modularisierung [Bal11, S. 62ff.]. Bild 4-24 zeigt die konkrete Ausprägung dieses Musters für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Software-Werkzeug als annotiertes Komponentendiagramm [UML11]. Die einzelnen Komponenten sind dabei den Schichten des MSSM zugeordnet. Das Bild zeigt lediglich die wichtigsten Komponenten und

deren Abhängigkeiten sowie Ausschnitte der inneren Klassenstruktur für zwei wesentliche Komponenten.

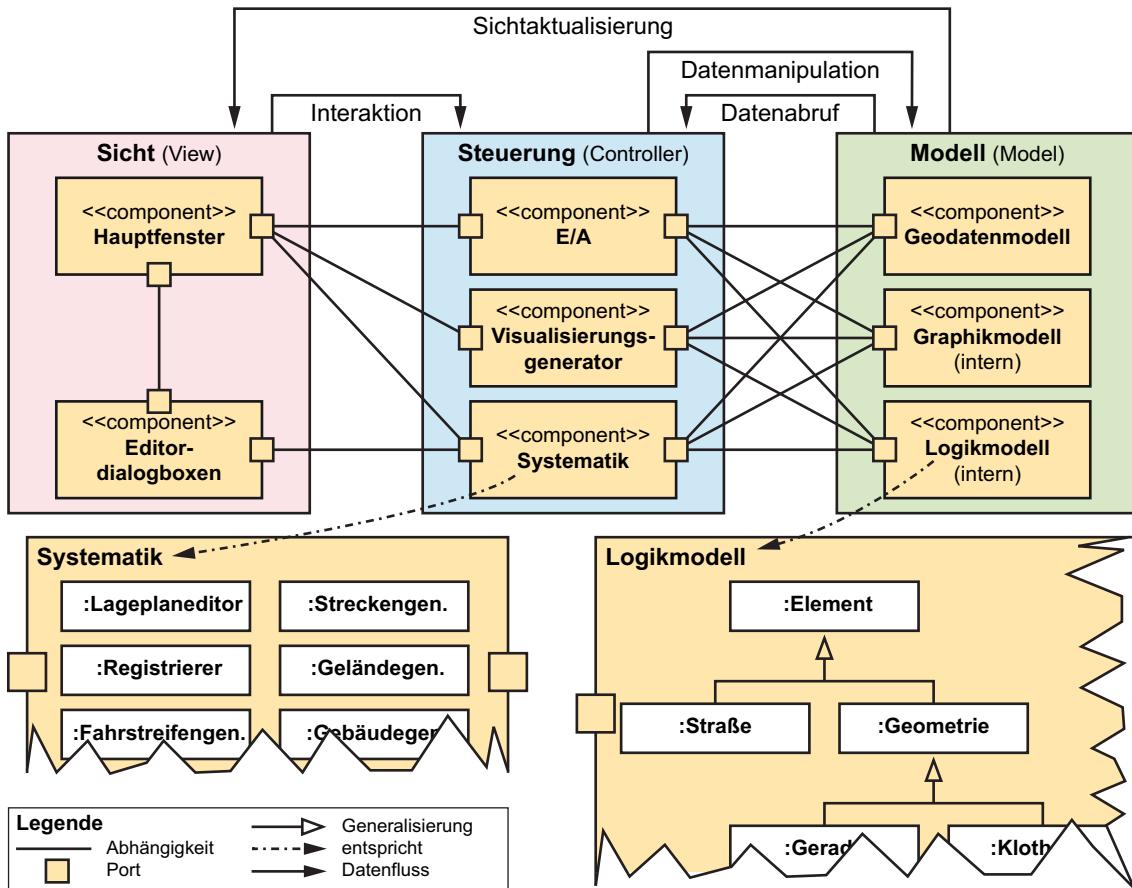


Bild 4-24: Systemarchitektur des prototypisch implementierten Software-Werkzeugs in der Übersicht.

Die **Sicht** erlaubt unterschiedliche Sichten auf die Daten des Modells und liefert Interaktionsbefehle an die Steuerung. Die Sicht beinhaltet dazu zwei Komponenten:

- **Hauptfenster:** Das Hauptfenster beschreibt im Wesentlichen die graphische Benutzungsschnittstelle, die das Modell in unterschiedlichen Sichten darstellt und die Ausführung von Funktionen der Steuerungskomponente initiiert. Das Hauptfenster ist in Abschnitt 4.9.3 detailliert beschrieben.
- **Editordialogboxen:** Einzelne Dialogboxen werden vom Hauptfenster geöffnet. Sie liefern Interaktionsbefehle an einzelne Komponenten der Systematik. Es gibt bspw. eine Dialogbox zur Festlegung des Querschnittprofils (vgl. Bild 4-27), die dementsprechend Interaktionsbefehle an die entsprechende Klasse der Systematik sendet.

Die **Steuerung** nimmt die Interaktionsbefehle von der Sicht entgegen. Die Steuerung hat die Aufgabe, die Daten im Modell entsprechend der Interaktionsbefehle zu manipulieren. In dieser Arbeit gliedert sich die Steuerung in drei Komponenten:

- **E/A (Ein-/Ausgabe):** Diese Komponente realisiert die Aufgaben Importieren und Exportieren. Sie stellt daher Klassen bereit, die bspw. Geodaten aus einem dedizierten EingabefORMAT einlesen und in das interne Geodatenmodell überführen. Weitere Klassen speichern bspw. das Graphikmodell in einem dedizierten Austauschformat.
- **Visualisierungsgenerator:** Diese Komponente beinhaltet Klassen, die Hilfsvisualisierungen generieren. Hier werden spezialisierte Sichten generiert und verwaltet, die in der Sicht dargestellt werden. So werden beispielsweise Hilfsdarstellungen für Koordinatensysteme oder ein Raster generiert, ebenso wie Sichten auf einzelne Daten der Geodaten und des Logikmodells.
- **Systematik:** Die Systematik setzt die einzelnen Tätigkeiten des Vorgehensmodells (vgl. Abschnitt 4.1) vollständig um. Bild 4-24 zeigt einen Ausschnitt der einzelnen Klassen der Systematik. Im Sinne der weiteren Modularisierung der Software sind dabei einzelne Schritte des Vorgehensmodells in entsprechenden Klassen gekapselt: Für jeden Schritt besteht eine Klasse. Dies sichert zum einen die eindeutigen Ein- und Ausgänge einzelner Schritte. Zum anderen können spätere Arbeiten zur weiteren Automatisierung einzelner Tätigkeiten in eigenständigen Klassen umgesetzt werden, die sich problemlos in die Systematik integrieren lassen.

Das **Modell** verwaltet die Einzelmodelle, stellt Daten für die Steuerung bereit, manipuliert diese nach den Vorgaben der Steuerung und sendet bei aktualisierten Daten einen Befehl an die Sicht, welche den aktuellen Stand visualisiert. Das Modell gliedert sich wiederum in drei Komponenten:

- **Geodatenmodell:** Diese Komponente beinhaltet sämtliche Klassen, die zur internen Verwaltung der Geodaten notwendig sind. Für die identifizierten Geodaten (vgl. Abschnitt 2.4.3) steht eine eigene Klasse bereit, welche die grundsätzliche Datenstruktur sowie Methoden zum Zugriff auf die Daten bereitstellt. Die Datenstrukturen der einzelnen Geodaten sind dabei relativ einfach: Navigationsdaten werden bspw. als Knoten und Kanten abgebildet, die jeweils Attribute besitzen. Zugriffsmethoden ermöglichen bspw. den unmittelbaren Zugriff auf den Knoten mit einem dedizierten Identifikator. Grundsätzlich ergeben sich die Datenstrukturen aus den Abbildungen der Eingangsdaten in den Abschnitten 4.2 bis 4.7. Auf eine erneute Darstellung wird daher verzichtet.
- **Graphikmodell:** Das interne Graphikmodell ist ein Szenengraph (vgl. Abschnitt 2.3.2.2), der die einzelnen Bestandteile des Graphikmodells thematisch gliedert.
- **Logikmodell:** Diese Komponente beinhaltet Klassen zur Verwaltung der einzelnen Teilmodelle des Logikmodells (vgl. Abschnitt 2.3.2.1). Bild 4-24 zeigt einzelne Klassen des Logikmodells in der Übersicht. Im Unterschied zur Systematik sind die Klassen des Logikmodells streng hierarchisch organisiert. Im

Sinne der objektorientierten Programmierung werden dabei Methoden und Daten an Klassen untergeordneter Klassen vererbt. Die Datenstruktur des Logikmodells orientiert sich dabei an der Spezifikation von OpenDRIVE [ODR10] und setzt diesen Standard vollständig um. Eine erneute Darstellung der Datenstruktur wird daher nicht vorgenommen.

4.9.3 Prototypische Implementierung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das beschriebene Konzept prototypisch als Software-Werkzeug implementiert. Diese Implementierung besteht aus mehr als 200 Klassen, die jeweils einzelne Funktionen realisieren; auf eine Auflistung dieser Klassen wird daher verzichtet. Im Folgenden wird stattdessen die eingesetzte Softwarebasis, die graphische Benutzungsschnittstelle sowie die Bewältigung der eingangs beschriebenen Aufgaben eines Software-Werkzeugs zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle erläutert:

Softwarebasis

Das Software-Werkzeug wurde mit Microsoft Visual C++ 2008 in der entsprechenden Entwicklungsumgebung (Microsoft Visual Studio 2008) implementiert. Die Implementierung einzelner Klassen erfolgte dabei auf Basis unterschiedlicher quelloffener (engl. *open source*) Softwarebibliotheken (vgl. Anhang A3.4). Nachfolgend werden die wichtigsten Bibliotheken und deren wesentliche Funktionen im Rahmen des Software-Werkzeugs kurz dargestellt:

- **OpenSceneGraph (OSG):** Diese Bibliothek dient zur Verwaltung und zum Rendering des Szenengraphen. Sie stellt in diesem Bereich umfangreiche Basisfunktionen bereit. Darüber hinaus bietet sie Funktionen zur Generierung von 3D-Modellen, die in dieser Arbeit eingesetzt werden. Einzelne Funktionen und Basisdatentypen von OpenSceneGraph werden ferner in nahezu sämtlichen Klassen des Software-Werkzeugs eingesetzt.
- **Qt:** Diese Bibliothek kapselt Klassen, die zur Programmierung graphischer Benutzungsschnittstellen dienen. Darüber hinaus bietet Qt umfassende Funktionen zur Verwaltung von Datenstrukturen wie dynamischen Listen an, die bspw. als Ausgangspunkt der Implementierung des internen Datenmodells des Logikmodells eingesetzt werden. Einzelne Funktionen und Basisdatentypen von Qt werden ferner in nahezu sämtlichen Klassen des Software-Werkzeugs eingesetzt.
- **Geospatial Data Abstraction Library (GDAL/OGR):** Diese Bibliothek bietet Funktionen zur Verarbeitung verbreiteter Geodatenformate. Sie wird zum Einlesen und extrahieren von Geodaten – insbesondere dem 3D-Stadtmodell eingesetzt. GDAL wird vorrangig in der E/A-Komponente verwendet.

- **Open Source Computer Vision (OpenCV):** Diese Bibliothek stellt umfangreiche Funktionen zur digitalen Bildverarbeitung zur Verfügung. Sie wird vorrangig zur Verarbeitung der digitalen Orthophotos eingesetzt. OpenCV wird daher in der Systematik-Komponente eingesetzt.
- **ALGLIB** stellt Funktionen zur numerischen Analyse zur Verfügung. Sie wird zur Berechnung mathematischer Interpolationen eingesetzt. ALGLIB wird dementsprechend in der Systematik-Komponente verwendet.

Graphische Benutzungsschnittstelle

Die Bedienung des entwickelten Software-Werkzeugs erfolgt ausschließlich über eine graphische Benutzungsschnittstelle (vgl. Bild 4-25).

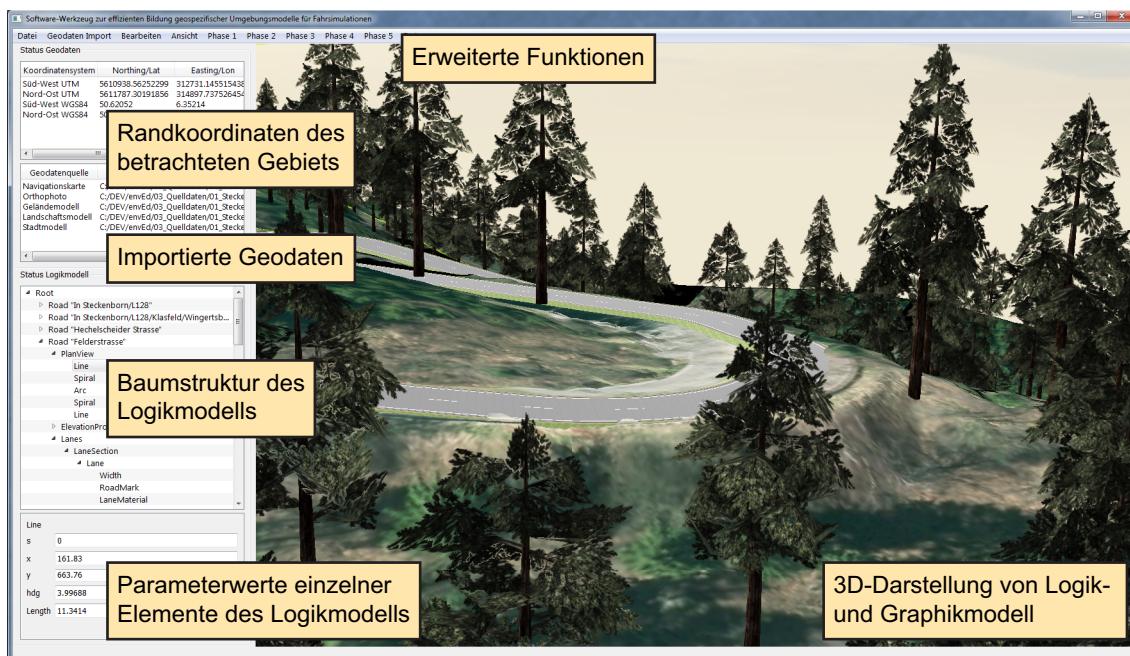


Bild 4-25: Graphische Benutzungsschnittstelle des prototypisch implementierten Software-Werkzeugs.

Das Hauptfenster besteht dabei aus bis zu fünf unterschiedlichen Komponenten zur Darstellung der Teilmodelle. Informationen zu Geodaten umfassen dabei zwei Rahmen: Zum einen werden die Randkoordinaten des gegenwärtig relevanten Gebiets angezeigt. Zum anderen werden die Verzeichnisse angezeigt, in denen die derzeit geladenen Geodaten abgelegt sind. Diese Ansichten ermöglichen, mögliche Fehler durch Geodaten unterschiedlicher Regionen auszuschließen. Informationen zum Logikmodell werden in zwei weiteren Rahmen dargestellt: Die Baumstruktur ermöglicht eine eingängige Sicht auf die einzelnen Bestandteile des Logikmodells sowie deren hierarchische Anordnung. Die Parameterwerte einzelner, angewählter Elemente des Logikmodells werden in einem weiteren Rahmen dargestellt. Der größte Teil des Hauptfensters wird durch die 3D-Darstellung von Logik- und Graphikmodell eingenommen. In dieser Sicht können ein-

zelne Bestandteile des Logikmodells visualisiert werden (bspw. der Lageplan) und somit mit den korrelierenden 3D-Modellen des Graphikmodells in Beziehung gesetzt werden. Die erweiterten Funktionen in der Menüleiste umfassen das Laden und Speichern von Logik- und Graphikmodellen, das Importieren und Bearbeiten von Geodaten sowie das Ein- und Ausblenden unterschiedlicher Sichtoptionen. Darüber hinaus werden die einzelnen Funktionen der Systematik aufgerufen, die entweder zu einer automatischen Funktion führen oder eine Editordialogbox öffnen (vgl. Bild 4-27).

Die graphische Benutzungsschnittstelle implementiert die Sicht im MSSM und beeinflusst damit die Steuerung. Die Steuerung erfüllt vorrangig die in Bild 4-23 dargestellten Aufgaben eines Software-Werkzeugs zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle. Im Folgenden erfolgt eine kurze Erläuterung, wie dies geschieht:

Importieren

Der Anwender kann die in Abschnitt 2.4.3 identifizierten Geodaten importieren. Dabei werden die Daten aus den jeweiligen Quelldateien eingelesen und die notwendigen Informationen in das entsprechende interne Geodatenmodell überführt. Die Daten liegen damit zur weiteren Verarbeitung vor. Darüber hinaus ist der Anwender in der Lage, einzelne Geodaten und deren Informationen zu visualisieren. Das Software-Werkzeug setzt dabei das Ebenenprinzip von Geo-Informationssystemen (vgl. Abschnitt 2.4.2.3) um. Bild 4-26 zeigt exemplarisch eine integrierte Ansicht mit 3D-Stadtmodell, Navigationsdaten und digitalen Orthophotos. Die Darstellung einzelner Geodaten dient u.a. zur Prüfung der Lagegenauigkeit der Daten. Damit können bspw. Fehler und Abweichungen, die aus der Koordinatentransformation resultieren, schnell erkannt werden.



Bild 4-26: Integrierte Darstellung der importierten Geodaten am Beispiel von 3D-Stadtmodell, Navigationsdaten und Orthophoto.

Transformieren

Zur Integration der Geodaten in die einzelnen TeilmODELLE des Umgebungsmodells stehen dem Anwender umfangreiche Funktionen zur Verfügung. Tätigkeiten, die keine Anwenderinteraktion voraussetzen, bspw. die Identifikation einzelner Strecken und Knotenpunkte, werden dabei schlicht über die Menüleiste initiiert. Sind die notwendigen Geodaten geladen, so werden diese in die Bestandteile des Logik- bzw. Graphikmodells transformiert und im Hauptfenster entsprechend angezeigt. Ist die manuelle Modellierung eines Elements notwendig, so wird über die Menüleiste eine entsprechende Editordialogbox geöffnet. Bild 4-27 zeigt exemplarisch die Dialogbox zur Festlegung des Querschnittsprofils. Dabei wird der Verlauf des digitalen Geländemodells orthogonal zum Verlauf des Lageplans dargestellt. Mittels Schiebereglern kann der Anwender die Querneigungswinkel damit an jedem Punkt der Strecke festlegen. Eine Hilfsfunktion überführt diese Daten anschließend in die notwendige Repräsentationsform des Logikmodells.

Insgesamt sind sämtliche Hilfsmittel, die in den einzelnen Phasen des Vorgehensmodells (Abschnitte 4.2 bis 4.7) beschrieben wurden, in dem Software-Werkzeug implementiert.

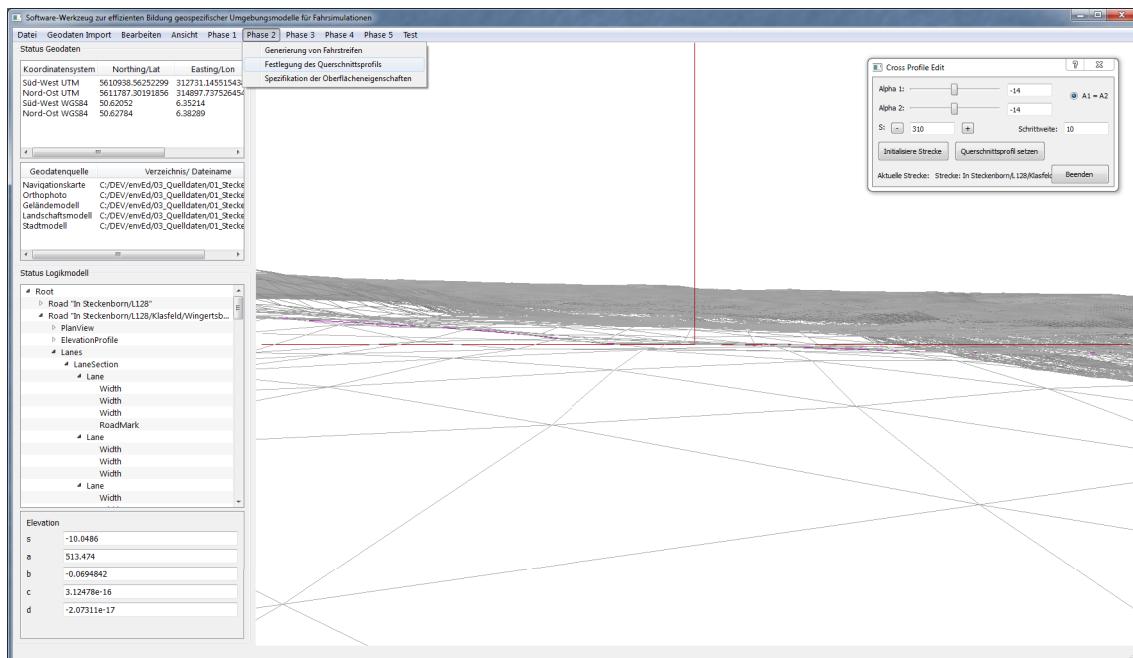


Bild 4-27: Transformation von Geodaten in die entsprechenden TeilmODELLE des Umgebungsmodells am Beispiel der Festlegung des Querschnittsprofils.

Exportieren

Haben Logik- und Graphikmodell den gewünschten Arbeitsstand erreicht, können diese TeilmODELLE exportiert werden. Dazu wurden Exportfunktionen implementiert, welche die internen Datenmodelle von Logik- und Graphikmodell in entsprechende Dateien

schreiben. Dabei wird das Logikmodell nach der OpenDRIVE Spezifikation [ODR10] abgelegt. Das Graphikmodell wird vorrangig im OpenFlight Format [Pre12-ol] gespeichert. Diese Formate sind zum jetzigen Zeitpunkt De-Facto Standards für die zwei Teilmodelle des Umgebungsmodells und erhöhen damit die Einsatzfähigkeit des entwickelten Software-Werkzeugs.

5 Validierung der Systematik

In diesem Kapitel wird die vorgestellte *Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen* validiert. Anhand einer realen Umgebung soll dargestellt werden, wie die Systematik in der Anwendung funktioniert. Dafür werden sämtliche Schritte des Vorgehensmodells durchlaufen und die wesentlichen Ergebnisse dargestellt. Dies beinhaltet auch Bewertungen zur Zweckdienlichkeit der jeweils eingesetzten Geodaten, zur Automatisierbarkeit bzw. zum notwendigen Modellierungsaufwand für einzelne Tätigkeiten sowie zur Qualität der resultierenden Teilmodelle des Umgebungsmodells.

Abschnitt 5.1 stellt zunächst die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten realen Umgebungen vor. In Abschnitt 5.2 wird die durchgängige Anwendung der Systematik am Beispiel der Validierungsumgebung Simmerath demonstriert. Erfahrungen, die bei der Bildung der Umgebungsmodelle gemacht wurden, werden in Abschnitt 5.3 kritisch mit früheren Modellierungstätigkeiten verglichen. Schließlich wird die Systematik in Abschnitt 5.4 anhand der Anforderungen aus der Problemanalyse (Abschnitt 2.6) bewertet.

5.1 Validierungsumgebungen: Simmerath und Rüthen

Zur Validierung der Systematik wurden im Rahmen dieser Arbeit Umgebungsmodelle für zwei reale Umgebungen gebildet. Diese Validierungsumgebungen sind nachfolgend entsprechend ihrer Zugehörigkeit zur Gemeinde **Simmerath** bzw. zum Stadtgebiet **Rüthen**⁶⁹ benannt. Diese Umgebungen wurden aus folgenden Gründen ausgewählt:

- 1) Die Umgebungen werden zur Erprobung von Prototypen moderner Scheinwerfersysteme eingesetzt; es handelt sich um ausgewählte Versuchsstrecken zweier Unternehmen der Automobilzulieferindustrie. Sie bieten für diesen Zweck unterschiedliche Landschaftsbilder (bspw. Ortschaften, Waldgebiete oder freie Felder) und Streckenverläufe (bspw. langgezogene Kurven und enge Spitzkehren) sowie abwechslungsreiche topographische Strukturen [Ber05, S. 129f.], [BBG06, S. 76], [BGG+08, S. 313].
- 2) Die abgebildeten Streckenverläufe sind weitgehend repräsentativ; es handelt sich überwiegend um Landes- sowie Kreisstraßen. Mit einer Gesamtlänge von 176.600 km entfallen in Deutschland mehr als 75% des gesamten Verkehrsnetzes (Gesamtlänge: 231.000 km) in diese Straßenkategorien [BMV12-ol].

⁶⁹ Wenn im Folgenden die Begriffe Simmerath bzw. Rüthen verwendet werden, so ist die jeweilige Validierungsumgebung gemeint.

- 3) Graphikmodelle dieser Umgebungen wurden in früheren Projekten bereits gebildet [Ber05, S. B-1f.], [BGG+08, S. 313]. Die dabei gesammelten Erfahrungen, bspw. hinsichtlich der eingesetzten Software-Werkzeuge oder des notwendigen Modellierungsaufwands, dienen als Grundlage einer kritischen Bewertung der vorgestellten Systematik.

Für beide Validierungsgebiete wurden die einzelnen Phasen des Vorgehensmodells (vgl. Abschnitt 4.2 bis 4.7) durchlaufen⁷⁰. Dabei wurde durchgängig das prototypisch implementierte Software-Werkzeug (vgl. Abschnitt 4.9) eingesetzt⁷¹, um letztlich vollständige Umgebungsmodelle zu bilden.

Die entstandenen Umgebungsmodelle werden im Rahmen dieser Arbeit getrennt verwendet: In Kapitel 4 wurden ausschließlich Beispiele aus Rüthen eingesetzt, um das grundsätzliche Vorgehen und einzelne Tätigkeiten zu veranschaulichen. Die Validierung der Systematik erfolgt im vorliegenden Kapitel durchgängig am Beispiel Simmerath. Dies dient zum einen dem besseren, zusammenhängenden Verständnis. Zum anderen gelten die Ergebnisse und Aussagen für Simmerath ebenso für Rüthen; die jeweilige Einzeldarstellung hätte unnötige Redundanz zur Folge.

5.2 Validierungsbeispiel Simmerath

Zur einfachen Orientierung wird die Validierungsumgebung Simmerath zunächst näher beschrieben⁷². Simmerath ist eine Gemeinde in Nordrhein-Westfalen und gehört zur Städteregion Aachen. Bild 5-1 zeigt eine Übersichtsdarstellung des relevanten Gebiets: Die gewählte Versuchsstrecke (ca. 4,5 km Gesamtlänge) verbindet die Ortsteile Steckenborn und Woffelsbach. Eine Erprobungsfahrt startet auf der Kreisstraße K12 im Ortsteil Steckenborn. Der Verlauf kreuzt zunächst die Hechelscheider- und Felderstraße und führt dabei auf die Landesstraße L128 (1)⁷³. Dieser Straße wird für ca. 4 km gefolgt; die Umgebung und die Streckencharakteristik ändern sich dabei erheblich: Nach dem Ortsausgang von Steckenborn (2) erstreckt sich eine Allee mit langegezogenen

⁷⁰ Die zur Validierung verwendeten Bilder wurden vollständig mit dem prototypisch implementierten Software-Werkzeug erstellt. Bildschirmfotos wurden nachbearbeitet, um bspw. Linien besser sichtbar zu machen.

⁷¹ Sämtliche Aussagen zur Laufzeit bzw. Berechnungsdauer einzelner Schritte im Software-Werkzeug beziehen sich auf die Ausführung auf einem Referenzsystem mit folgenden Systemkomponenten: Windows 7 Enterprise Edition, Service Pack 1, 64 Bit; Intel Core I7 X980, 3,33 GHz; 12 GB RAM; 2x NVIDIA Geforce 480 GTX.

⁷² Entsprechende Darstellungen und Erläuterungen für die Validierungsumgebung Rüthen finden sich in Anhang A4.

⁷³ Die Ziffern in den Klammern beziehen sich auf die Positionsmarken in Bild 5-1, die markante Punkte der Versuchsstrecke kennzeichnen.

Kurven auf offenem Feld (3). Eine enge Kurve (4) leitet anschließend die Abfahrt in das talwärts gelegene Woffelsbach ein. Dieser Abschnitt ist durch Waldgebiete, abschüssige Strecken mit engen Spitzkehren und deutlich überhöhten Straßenquerschnitten (5) gekennzeichnet. Die Versuchsstrecke endet schließlich am Ortseingang von Woffelsbach (6).

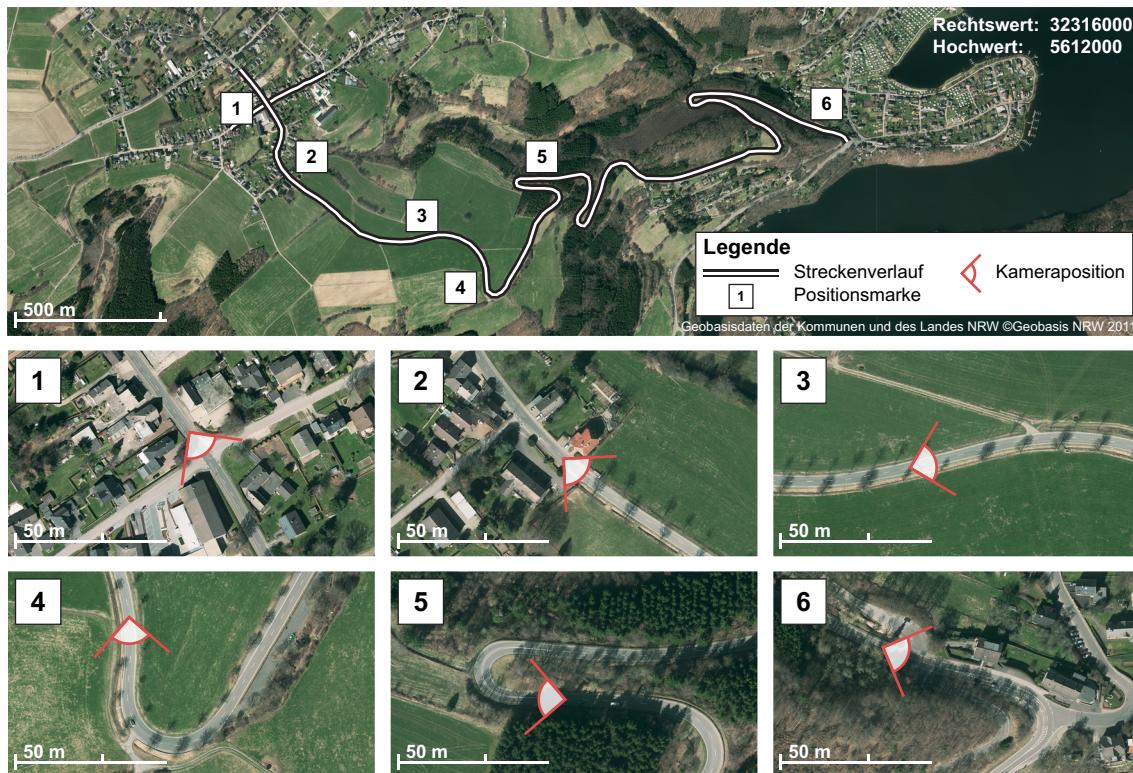


Bild 5-1: Übersichtsdarstellung der Validierungsumgebung Simmerath mit Detailansichten markanter Streckenabschnitte.

Im Folgenden werden die sechs Phasen und die wesentlichen Ergebnisse der Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen anhand des Beispiels Simmerath dargestellt. Die dabei eingesetzten Geodaten sind in Anhang A3.1 gelistet.

5.2.1 Phase 1: Festlegung der Achsverläufe einzelner Strecken

Der Aufbau des Logikmodells beginnt mit der **Identifikation von Strecken und Knotenpunkten**. Der in Bild 5-1 dargestellte Streckenverlauf bildet dafür den Ausgangspunkt. Zunächst wurden die Navigationsdaten in das Software-Werkzeug geladen und anschließend mittels des in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Verfahrens verarbeitet. Im Resultat wurden die einzelnen Strecken und deren Verknüpfung in Knotenpunkten im Logikmodell hinterlegt (Bild 5-2). Die Topologie des Verkehrsnetzes wurde damit vollständig abgebildet.

Einzelne Strecken und Knotenpunkte wurden vollständig automatisch identifiziert; die Ergebnisse lagen nach wenigen Sekunden vor. Die jeweiligen Straßennamen und -kategorien entsprechen dabei den realen Vorbildern. Die eingesetzten Navigationsdaten sind für diesen Schritt daher als uneingeschränkt geeignet einzuschätzen.



Bild 5-2: Identifizierte Strecken und Knotenpunkte der Validierungsumgebung Simmerath.

Die identifizierten Strecken und Knotenpunkte sind Grundlage der **Definition des Lageplans**. Zunächst wurden dafür die digitalen Orthophotos in das Software-Werkzeug geladen und die Endpunkte einzelner Strecken dargestellt. Deren Position basierte auf den Lagekoordinaten der entsprechenden Navigationsdaten und wichen in den betrachteten Beispielen häufig mehr als 2 m von der realen Lage ab. Die Endpunkte wurden daher auf Grundlage der Orthophotos manuell korrigiert. Anschließend wurde der Lageplan für sämtliche Strecken mittels iterativer sequentieller Modellierung (vgl. Abschnitt 4.2.2) gebildet.

Die Nachbildung des Lageplans erfolgte im Rahmen dieser Arbeit weitgehend manuell. Umfangreiche Unterstützungsfunktionen im Software-Werkzeug erlaubten dabei jedoch nach kurzer Einarbeitungszeit eine zielgerichtete Modellierung. So wurden sämtliche Streckenverläufe der Validierungsumgebung Simmerath (Gesamtlänge 4,5 km) bspw. in etwa drei Stunden modelliert. Dies ist als zügig einzuschätzen, zumal lediglich die Zweckmäßigkeit der Modellierungsmethode nachgewiesen werden sollte und daher auf eine ergonomisch optimierte Benutzungsschnittstelle im Software-Werkzeug verzichtet wurde. Verbesserungen in der Ergonomie können den zeitlichen Modellierungsaufwand weiter reduzieren.

Bild 5-3 zeigt exemplarisch einen Streckenabschnitt mit der resultierenden Referenzlinie. Insbesondere die Lagegenauigkeit des Lageplans ist dabei herauszustellen: An keiner Stelle weicht die modellierte Referenzlinie nennenswert von der im Orthophoto darstellten Leitlinie in der Mitte der Fahrbahn ab. Die maximale horizontale Abweichung

beträgt daher an jeder Position weniger als 0,5 m; damit wird die Toleranz eines Meters (vgl. Abschnitt 2.3.3) durchgehend eingehalten.

Als Grundlage der Modellierung wurden digitale Orthophotos mit einer Auflösung von 0,2 m je Pixel verwendet. Diese Auflösung ist als absolut ausreichend einzuschätzen. Eine höhere Auflösung würde die Genauigkeit des Lageplans kaum steigern, da die Leitlinie einzelner Strecken immer deutlich zu erkennen war.

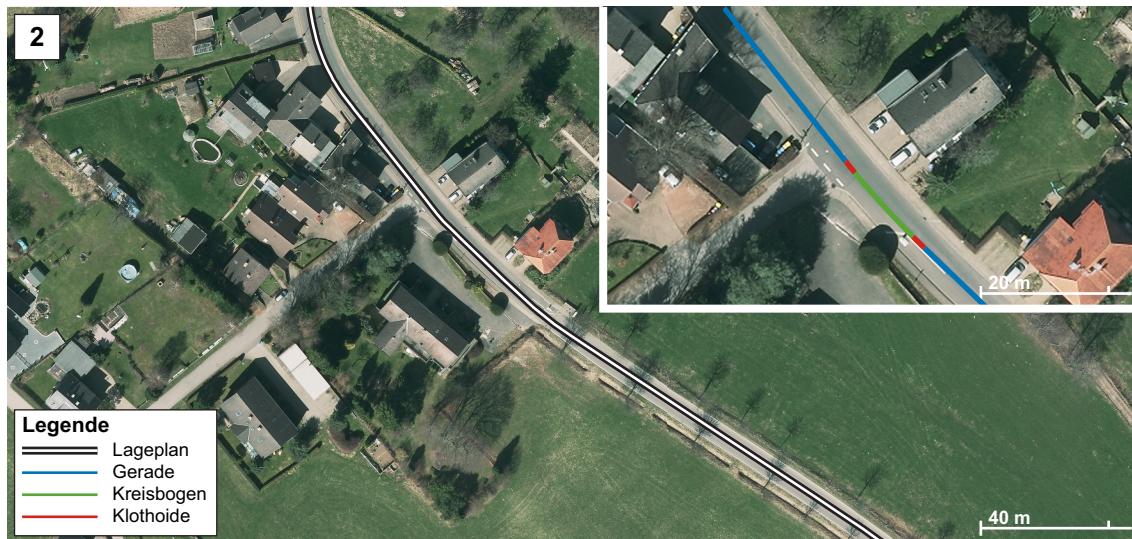


Bild 5-3: Streckenabschnitte unterschiedlichen Maßstabs mit manuell definiertem Lageplan.

Auf Basis des Lageplans wird der **Höhenplan ermittelt**. Dazu wurde das digitale Geländemodell in das Software-Werkzeug geladen und die einzelnen Höhenwerte entlang des Lageplans abgetastet. Zur anschließenden mathematischen Interpolation wurde die Softwarebibliothek ALGLIB [ALG12-ol] eingesetzt, welche eine Funktion zur gewichteten penalisierten Spline-Regression (vgl. Abschnitt 4.2.3) bietet. Nach einer Einflussanalyse der Interpolationsparameter wurden deren Werte festgelegt. Die Anzahl der Funktionen (M_{PRS}) wurde dabei so gewählt, dass je 10 m Streckenlänge eine Funktion dritten Grades zur Approximation des Höhenverlaufs eingesetzt wird. Der Penalisierungsfaktor ρ_{PRS} wurde mit 2.5 so gewählt, dass ein glatter Funktionsverlauf der Interpolierenden resultiert und die Abweichungen zu den Höhenwerten des digitalen Geländemodells moderat ausfallen.

Die eigentliche mathematische Interpolation verlief nach Festlegung der Parameterwerte vollständig automatisch. Die Interpolierende wurde auch für längere Streckenabschnitte umgehend berechnet: Für die über 4 km lange Strecke lag das Ergebnis nach wenigen Sekunden vor.

Der resultierende Höhenplan entspricht weitgehend dem realen Höhenverlauf. Bild 5-4 zeigt die Höhenverläufe exemplarisch für einen Streckenabschnitt. Dabei ist sowohl der Höhenverlauf dargestellt, der unmittelbar aus dem digitalen Geländemodell resultiert,

als auch jener, der durch die Interpolierende abgebildet wird. Beide Verläufe weichen zwar voneinander ab, entlang aller Strecken der Validierungsumgebungen ist die durchschnittliche Abweichung jedoch kleiner als 0,3 m. Die maximale Abweichung beträgt 0,6 m. Damit liegen die generierten Höhenverläufe ebenso in der Toleranz eines Meters. Sie sind darüber hinaus hinreichend glatt, um eine Fahrdynamik adäquat anzuregen.

Das eingesetzte digitale Geländemodell besitzt eine Höhengenauigkeit von ± 20 cm je Messpunkt. Diese werden in einem Raster mit 1 m Kantenlänge ermittelt. Grundsätzlich sind die Werte ausreichend, um den Höhenverlauf zu interpolieren, ein besser aufgelöstes Geländemodell würde jedoch sicher auch die Genauigkeit des resultierenden Höhenplans weiter verbessern.

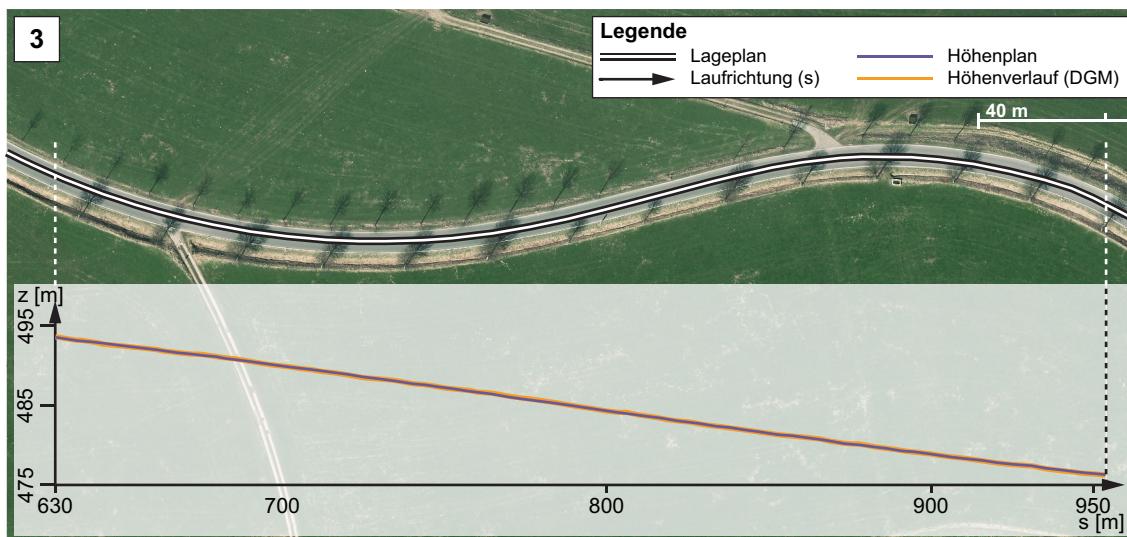


Bild 5-4: Ausschnitt des Lageplans (oben) und entsprechender Höhenplan (unten). Der Höhenverlauf des digitalen Geländemodells stimmt weitgehend mit dem ermittelten Höhenplan überein.

Zur **Registrierung zwischen Referenzlinie und Navigationsdaten** wurden sowohl der Lageplan, als auch die Navigationsdaten in das Software-Werkzeug geladen. Anschließend wurde für jeden Knoten der Navigationsdaten einer Strecke der minimale Abstand d_e zum Lageplan ermittelt (vgl. Abschnitt 4.2.4) und die entsprechende Position s im Logikmodell hinterlegt.

Referenzlinie und Navigationsdaten wurden innerhalb weniger Sekunden vollständig automatisch registriert. Bild 5-5 zeigt beispielhaft einen Streckenabschnitt mit der resultierenden Registrierung: Eine visuelle Betrachtung erlaubt die Aussage, dass die Registrierung mittels euklidischer Distanz sehr gute Resultate liefert.

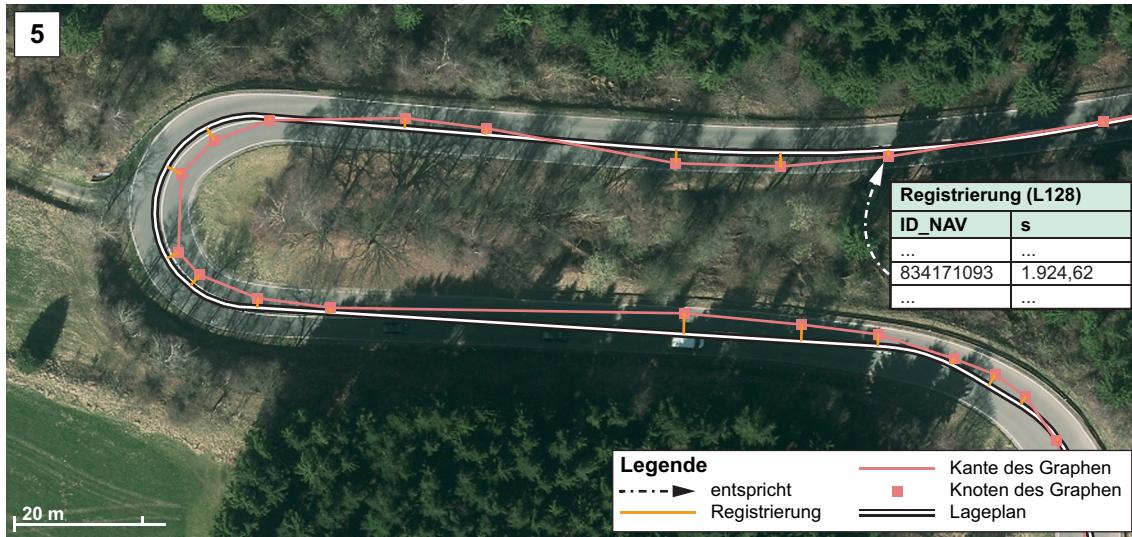


Bild 5-5: Streckenabschnitt mit der Registrierung zwischen Lageplan und Navigationsdaten.

5.2.2 Phase 2: Definition einzelner Fahrbahnen

Ergebnis der ersten Phase sind Referenzlinien einzelner Strecken und deren Registrierung mit den Knoten der Navigationsdaten. Die einzelnen Referenzlinien sind in dieser Phase zu mathematisch definierten Fahrbahnen zu erweitern.

Zunächst werden **Fahrstreifen generiert**. Dafür wurden die Navigationsdaten in das Software-Werkzeug geladen und für jede Kante einer Strecke die Anzahl an Fahrstreifen sowie die Art der Fahrbahnmarkierung gelesen und darauf aufbauend mittels der zugeordneten Straßenkategorie die entsprechende Breite des Fahrstreifens geschätzt (vgl. Abschnitt 4.3.1). Die Fahrstreifen entlang des Streckenverlaufs wurden vollständig automatisch generiert und die entsprechenden Einträge umgehend im Logikmodell hinterlegt.

Bild 5-6 zeigt zwei Streckenabschnitte mit resultierenden Fahrbahnen vor dem Hintergrund digitaler Orthophotos. Im ersten Beispiel wird dabei ein herkömmlicher Streckenabschnitt dargestellt. Die generierte Fahrbahn, die Breite der einzelnen Fahrstreifen sowie die Fahrbahnmarkierungen entsprechen dabei weitgehend der realen Fahrbahn (Bild 5-6, links). Das zweite Beispiel zeigt mit einer engen Spitzkehre einen eher ungewöhnlichen Streckenverlauf (Bild 5-6, rechts). Die generierte Fahrbahn bildet die in der Realität verbreiterten Fahrstreifen ebenso wenig nach wie die außergewöhnlichen Fahrbahnmarkierungen. An derartigen Stellen sind manuelle Nachbesserungen notwendig.

Die eingesetzten Navigationsdaten beinhalteten entlang sämtlicher Beispielstrecken durchgängig die korrekte Anzahl an Fahrstreifen. Damit sind Navigationsdaten als Grundlage der Generierung einzelner Fahrbahnen als äußerst nützlich einzuschätzen. Die Art der Fahrbahnmarkierung in den Navigationsdaten ist dagegen kaum zweckmäßig: Da diese Daten vorrangig zur Kenntlichmachung baulich getrennter Fahrbahnrich-

tungen dienen, entsprechen die eingetragenen Werte häufig nicht den realen Fahrbahnmarkierungen. Der Einsatz straßenbaulicher Richtlinien in diesem Schritt hat sich als sinnvoll erwiesen, wenngleich die Werte für die Fahrstreifenbreite in engen Kurven zum Teil nicht den realen Werten entsprechen.



Bild 5-6: Generierte Fahrbahnen einzelner Streckenabschnitte vor dem Hintergrund des digitalen Orthophotos.

Auf Basis der Fahrbahnbreite wird das **Querschnittprofil festgelegt**. Dafür wurde das digitale Geländemodell in das Software-Werkzeug geladen. Anschließend wurde die Referenzlinie in 10 m Abständen abgetastet und die jeweiligen Querneigungswinkel festgelegt.

Die Querneigungswinkel wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit manuell festgelegt. Die im Software-Werkzeug gewählte Darstellung des zur gegenwärtigen Strecke orthogonal verlaufenden Höhenverlaufs (vgl. Abschnitt 4.3.2) ermöglichte dabei die eingängige Erfassung des realen Querschnittprofils. Sämtliche Streckenverläufe in Simmerath wurden in etwa einer Stunde mit Querneigungswinkeln versehen.

Bild 5-7 zeigt exemplarisch einen Streckenabschnitt mit und ohne Querschnittprofil aus jeweils zwei unterschiedlichen Perspektiven. Während die generierte Fahrbahn ohne Querschnittprofil das Geländemodell aufgrund der Überhöhung der Straße in Kurven deutlich schneidet (Bild 5-7, oben), fügt sich die mit Querschnittprofil versehende Fahrbahn passgenau in das Geländemodell ein (Bild 5-7, unten).

Das eingesetzte digitale Geländemodell ist grundsätzlich geeignet, um das Querschnittprofil von Strecken zu erkennen, ein höher aufgelöstes Geländemodell würde sicher ebenso die Genauigkeit der Querneigungswinkel steigern.

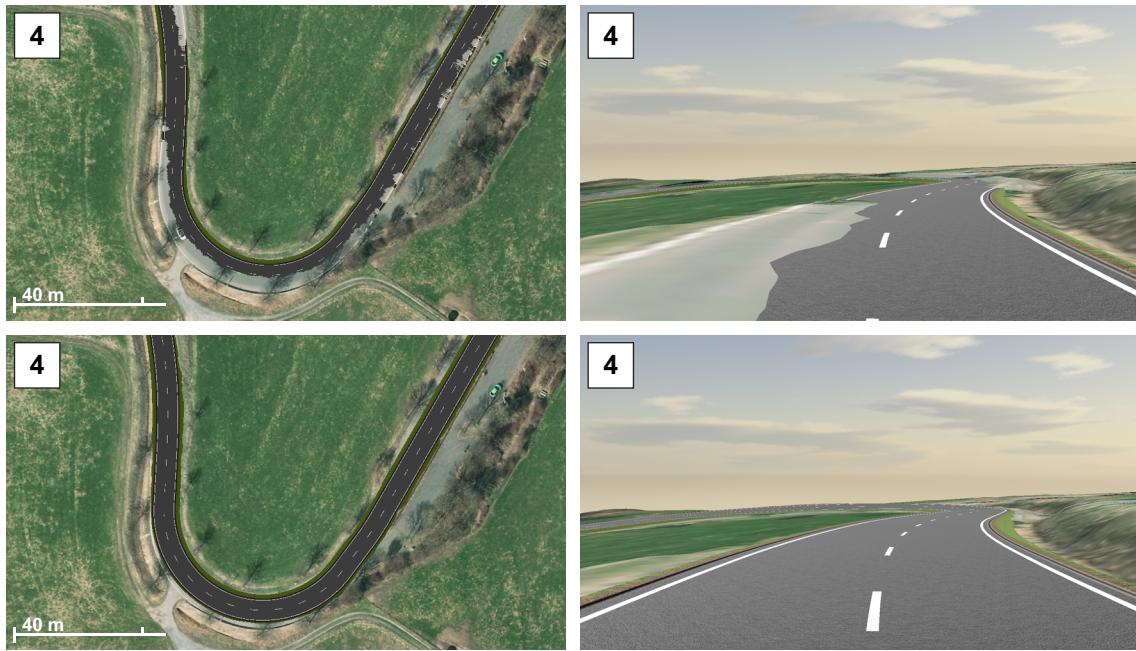


Bild 5-7: Fahrbahnen ohne Querneigung schneiden das digitale Geländemodell in Kurven (oben). Mit festgelegtem Querschnittprofil entspricht die Streckengeometrie der realen Strecke – das Geländemodell befindet sich unter der Strecke (unten).

Da gegenwärtig verfügbare Geodaten keine Informationen zu Reibungskoeffizienten und der Struktur der Fahrbahnoberfläche enthalten, wurden für Fahrbahnen exemplarische Werte zur **Spezifikation der Oberflächeneigenschaften** eingesetzt. Als Reibungskoeffizienten für Asphalt wurde durchgängig 0,55 eingesetzt. Die Körnung wurde mit 0,5 angegeben. Diese Zuordnung erfolgt voll automatisch und umgehend. Eine derartige Beschreibung der Oberflächeneigenschaften ist für eine Vielzahl der Validierungsmethoden und -technologien von Fahrerassistenzsystemen als ausreichend einzuschätzen.

5.2.3 Phase 3: Integration logischer Eigenschaften

Das Ergebnis der Fahrbahndefinition sind vollständig definierte Streckenverläufe, die bereits für einfache Versuchsaufbauten in einer Fahrsimulation eingesetzt werden können. Diese Fahrbahnverläufe sind durch Abbiegerelationen, verkehrsrelevante Attribute sowie sonstige Objekte zu erweitern.

Zunächst sind **Abbiegerelationen und Abbiegepfade zu definieren**. Dazu wurden die Navigationsdaten in das Software-Werkzeug geladen. Die einzelnen Relationen und Pfade wurden anschließend mit dem Verfahren aus Abschnitt 4.4.1 automatisch zugewiesen.

Die im Logikmodell hinterlegten Abbiegerelationen entsprechen in den Beispielen vollständig den realen Vorbildern. Die Abbiegepfade basieren hingegen auf einer vordefi-

nierten Größe der Kreuzungsfläche; diese trifft in der Realität nicht immer zu und erfordert daher manuelle Nacharbeiten. Darüber hinaus beschreiben die in den Navigationsdaten hinterlegten Abbiegerelationen vorrangig mögliche Abbiegerichtungen und etwaige Einschränkungen. Gesonderte Abbiegefahrstreifen, die an größeren Verkehrsknoten häufig vorkommen, werden kaum beschrieben. In diesem Bereich sind die Navigationsdaten daher nur eingeschränkt geeignet.

Im nächsten Schritt sind **verkehrsrelevante Attribute zuzuweisen**. Zunächst wurden die Navigationsdaten in das Software-Werkzeug geladen und nach dem Vorgehen in Abschnitt 4.4.2 sämtliche Attribute aus den Navigationsdaten entlang des Lageplans vollständig automatisch zugewiesen. Anhang A3.3 listet die wichtigsten der dabei betrachteten Attribute.

Bild 5-8 zeigt eine Übersichtsdarstellung der Validierungsumgebung Simmerath mit den entlang der Versuchsstrecke zugewiesenen Attributen. Ein Vergleich mit der Beschilderung entlang der realen Strecke ergibt, dass nahezu sämtliche verkehrsrelevanten Attribute übernommen wurden. So wurden bspw. sämtliche Geschwindigkeitsbegrenzungen im Logikmodell korrekt abgebildet. Dies trifft auch für weitere Attribute zu: Entlang des etwa 4 km langen Streckenabschnitts wurden bspw. neun Attribute zum Überholverbot im Logikmodell hinterlegt. Die Anzahl und deren Position stimmen mit der realen Strecke überein, so dass das Logikmodell in diesem Bereich als hochwertig bezeichnet werden kann. Dies gilt ferner auch für die eingesetzten Navigationsdaten, die in diesem Zusammenhang daher als absolut geeignet bewertet werden können.

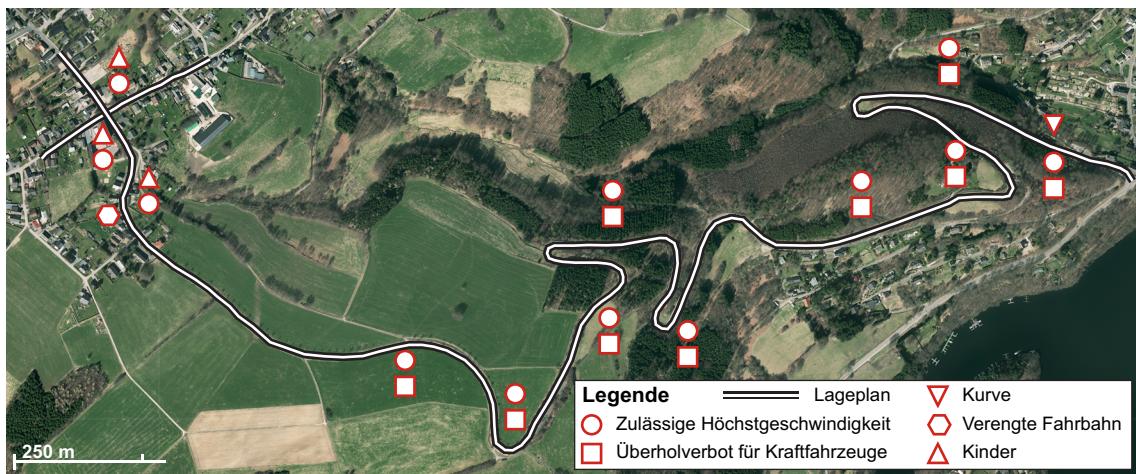


Bild 5-8: Übersichtsdarstellung der verkehrsrelevanten Attribute entlang der Validierungsstrecke Simmerath.

Die **Integration sonstiger Objekte** ist in hohem Maße abhängig von der Anwendung der eigentlichen Fahrsimulation. Daher lassen sich auch keine allgemeingültigen Aussagen zur Automatisierbarkeit oder zum Einsatz von Geodaten in diesem Schritt treffen.

Beispielhaft wurden im Rahmen dieser Arbeit Grundrisse der Gebäude als sonstige Objekte in das Logikmodell übertragen. Dafür wurde das 3D-Stadtmodell in das Software-

Werkzeug geladen und die Eckpunkte der Grundrissgeometrie von 281 Gebäuden vollautomatisch in das Logikmodell transferiert.

Fazit – Bildung des Logikmodells

Mit Abschluss dieser Phase des Vorgehensmodells wurde das Logikmodell vollständig beschrieben. Es besteht für das Validierungsbeispiel Simmerath aus insgesamt mehr als 1000 Elementen. Etwa 70% dieser Elemente beschreiben die Geometrie der Strecken, die restlichen 30% beinhalten logische Verknüpfungen, physikalische Eigenschaften und sonstige Objekte. Durch den systematischen Einsatz der Geodaten und der beschriebenen Hilfsmittel wurden mehr 75% der Elemente des Logikmodells im vorliegenden Beispiel automatisch erstellt und mit den entsprechenden Parameterwerten versehen. Im Vergleich zu einer durchgängig manuellen Modellierung ist dies als großer Nutzen einzuschätzen. Darüber hinaus profitieren auch die manuellen Modellierungstätigkeiten (bspw. die Festlegung des Querschnittprofils) erheblich vom Einsatz entsprechender Geodaten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass auf Basis der identifizierten Geodaten eine weitgehend automatisierte Bildung des Logikmodells möglich ist. Diese erfüllt ferner die technischen Anforderungen der interaktiven Fahrsimulation vollumfänglich.

5.2.4 Phase 4: Bildung von 3D-Modellen des Verkehrsnetzes

Aufbauend auf dem Logikmodell beginnt mit dieser Phase die Bildung des Graphikmodells. Dabei wurden zunächst zum Logikmodell korrelierende 3D-Modelle des Verkehrsnetzes gebildet.

Die **Generierung von 3D-Modellen einzelner Strecken** erfolgte mit dem Verfahren aus Abschnitt 4.5.1 auf Basis der relevanten Elemente des Logikmodells (Geometriebeschreibungen und logische Verknüpfungen). Die Generierung erfolgt vollständig automatisch; für den etwa 4 km langen Streckenabschnitt sind ca. zwei Minuten Rechenzeit erforderlich.

Bild 5-9 zeigt exemplarisch ein generiertes 3D-Modell eines Streckenabschnitts in zwei unterschiedlichen Darstellungsvarianten. Die Darstellungsqualität der Fahrbahn kann dabei auch aus geringer Betrachtungsentfernung als hochwertig bezeichnet werden (Bild 5-9, links). Eine wichtige Grundlage der hohen Darstellungsqualität sind dabei die Fahrbahnmarkierungen, deren Geometrie als eigenständige Polygone abgebildet ist (Bild 5-9, rechts). Dies ermöglicht die Trennung der Texturen für Asphalt und Fahrbahnmarkierung und ermöglicht letztlich die trennscharfe Darstellung, die bei einer zusammenhängenden Textur für Asphalt und Fahrbahnmarkierung nicht möglich ist. Die geospezifische Lagegenauigkeit des 3D-Modells liegt in der Toleranz eines Meters, da das Graphikmodell vollständig aus den Beschreibungen des Logikmodells generiert wird.

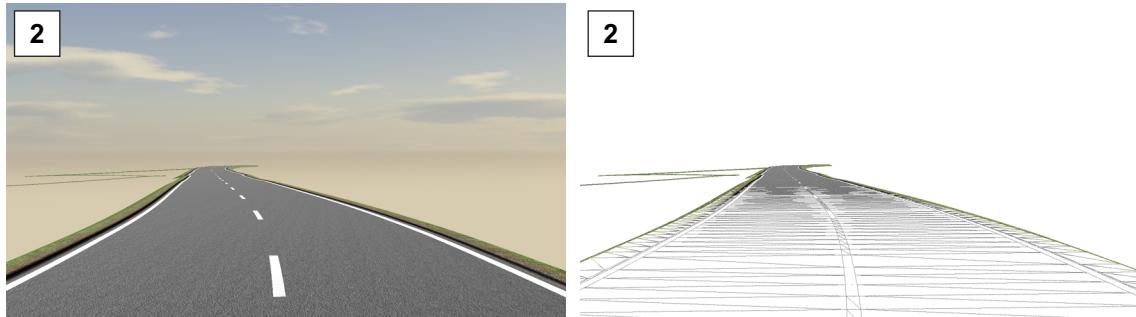


Bild 5-9: Generierte 3D-Modelle einer einzelnen Strecke. Die Gitternetzdarstellung verdeutlicht, dass Fahrbahnmarkierungen als einzelne Polygone abgebildet wurden.

Auf Basis der 3D-Modelle einzelner Strecken wurden entsprechende **3D-Modelle einzelner Knotenpunkte gebildet**. Die grundsätzliche Geometrie einzelner Knotenpunkte wurde dabei nach dem Verfahren aus Abschnitt 4.5.2 approximiert. Darauf aufbauend wurde zunächst der exakte Höhenverlauf einzelner Eckpunkte an das Geländemodell angepasst. Anschließend wurde die Geometrie mit Fahrbahnmarkierungen versehen.

Die Modellierung der 3D-Modelle einzelner Knotenpunkte erfolgte weitgehend manuell mit Hilfe des Presagis Creator. Dabei war je Knotenpunkt ein Zeitaufwand von etwa einer Stunde erforderlich, wobei der Modellierungsaufwand vorrangig von der Anzahl individueller Fahrbahnmarkierung beeinflusst wird.

Bild 5-10 zeigt beispielhaft eine Kreuzung aus zwei Perspektiven. Erneut ist die Darstellungsqualität auch aus der Nähe als hoch zu beurteilen (Bild 5-10, links). Es ist ferner festzustellen, dass die generierte Geometrie den realen Kreuzungsbereich im vorliegenden Beispiel gut abdeckt (Bild 5-10, rechts).



Bild 5-10: 3D-Modell eines einzelnen Knotenpunkts: Fahrbahnmarkierungen wurden manuell integriert.

5.2.5 Phase 5: Generierung von 3D-Modellen der Umgebung

In dieser Phase wurden 3D-Modelle der Umgebung gebildet und mit den bestehenden 3D-Modellen des Verkehrsnetzes integriert.

Die **Generierung von 3D-Modellen des Geländes** erfolgte auf Basis des Logikmodells, da lediglich der Nahbereich des Verkehrsnetzes für die Fahrsimulation relevant ist. Zunächst wurden das digitale Geländemodell und die digitalen Orthophotos in das Software-Werkzeug geladen. Anschließend wurden die einzelnen 3D-Modelle des Geländes mit dem Verfahren aus Abschnitt 4.6.1 gebildet. Der Nahbereich der Strecke ist dabei auf 150 m zu beiden Seiten bemessen, die einzelnen Kacheln des Geländes besitzen eine Kantenlänge von je 100 m.

Das Verfahren generiert die Kacheln vollständig automatisch. Die insgesamt etwa 10 km² große Fläche der Validierungsumgebung Simmerath wurden dabei in weniger als fünf Minuten verarbeitet und dabei 148 Kacheln gebildet, welche die relevanten Gebiete beinhalten.

Die Qualität der entstehenden 3D-Modelle der Umgebung ist als relativ gut einzuschätzen. Die Darstellungsqualität des Geländes bietet zwar aus sehr naher Betrachtungsentfernung kaum Details, weil die Auflösung der Texturen aus den digitalen Orthophotos in diesem Bereich unzureichend ist (vgl. Bild 5-11). Mit Zunahme der Betrachtungsentfernung nimmt dieser Effekt jedoch deutlich ab (vgl. Bild 5-12).

Das eingesetzte digitale Geländemodell ist zur Nachbildung des 3D-Geländes als absolut ausreichend einzuschätzen. Eine höhere Auflösung würde die Qualität des resultierenden 3D-Modells bestenfalls im unmittelbaren Nahbereich der Straße verbessern. Eine höhere Auflösung der digitalen Orthophotos würde in diesem Bereich jedoch zu einer deutlich gesteigerten Darstellungsqualität führen.

Die **Zusammenführung der 3D-Modelle des Geländes mit jenen des Verkehrsnetzes** erfolgte im Rahmen dieser Arbeit mit einem ergebnisorientierten Ansatz. Dabei wurde das 3D-Geländemodell, welches sich direkt unter der Fahrbahn befindet, abgesenkt und das Bankett einzelner Strecken rotiert. Das Verfahren führt das Gelände mit dem Verkehrsnetz vollständig automatisch zusammen. Die beteiligten 3D-Modelle wurden in wenigen Sekunden angepasst.

Bild 5-11 zeigt exemplarisch Impressionen entlang der Versuchsstrecke in Simmerath. Die 3D-Modelle des Verkehrsnetzes und des Geländemodells werden dabei nahezu fehlerfrei dargestellt. Das eingesetzte Verfahren ist an dieser Stelle zwar sehr pragmatisch, eignet sich jedoch zur Integration der unterschiedlichen 3D-Modelle.

Die **Integration von Verkehrsmobiliar** erfolgte nach dem Verfahren aus Abschnitt 4.6.3. Dabei wurden sämtliche im Logikmodell hinterlegten Verkehrszeichen vollständig automatisch im 3D-Modell in der Szene platziert. Die Integration erfordert weniger als zwei Minuten.

Bild 5-11 (Positionsmarken 2, 3 und 6) zeigen Streckenabschnitte mit platzierten und ausgerichteten Schildern. Die Darstellungsqualität der Schilder ist aufgrund der manuellen Modellierung als hoch einzuschätzen.

Die **Integration von Gebäuden und Baumformationen** basiert auf dem Verfahren aus Abschnitt 4.6.4. Dabei wurden das digitale Landschaftsmodell und das digitale Geländemodell in das Software-Werkzeug geladen. Die anschließende Berechnung der Gebäudegeometrie und der Baumformationen sowie deren jeweilige Platzierung in der Szene erfolgten vollautomatisch in ca. 5 Minuten. Dabei wurden 3D-Modelle von insgesamt 281 Gebäuden und 1021 Bäumen in die Szene integriert.

Bild 5-11 (Positionsmarken 1 und 6) zeigen Gebäude und Baumformationen aus der Verkehrsperspektive. Bild 5-12 bietet eine Übersichtsdarstellung mit den platzierten 3D-Modellen. Während die Darstellungsqualität und die Position der Bäume als hochwertig zu bezeichnen ist, sind die extrudierten Gebäudegrundrisse in dieser Form nicht in der interaktiven Fahrsimulation zu verwenden – hier sind manuelle Nacharbeiten notwendig.

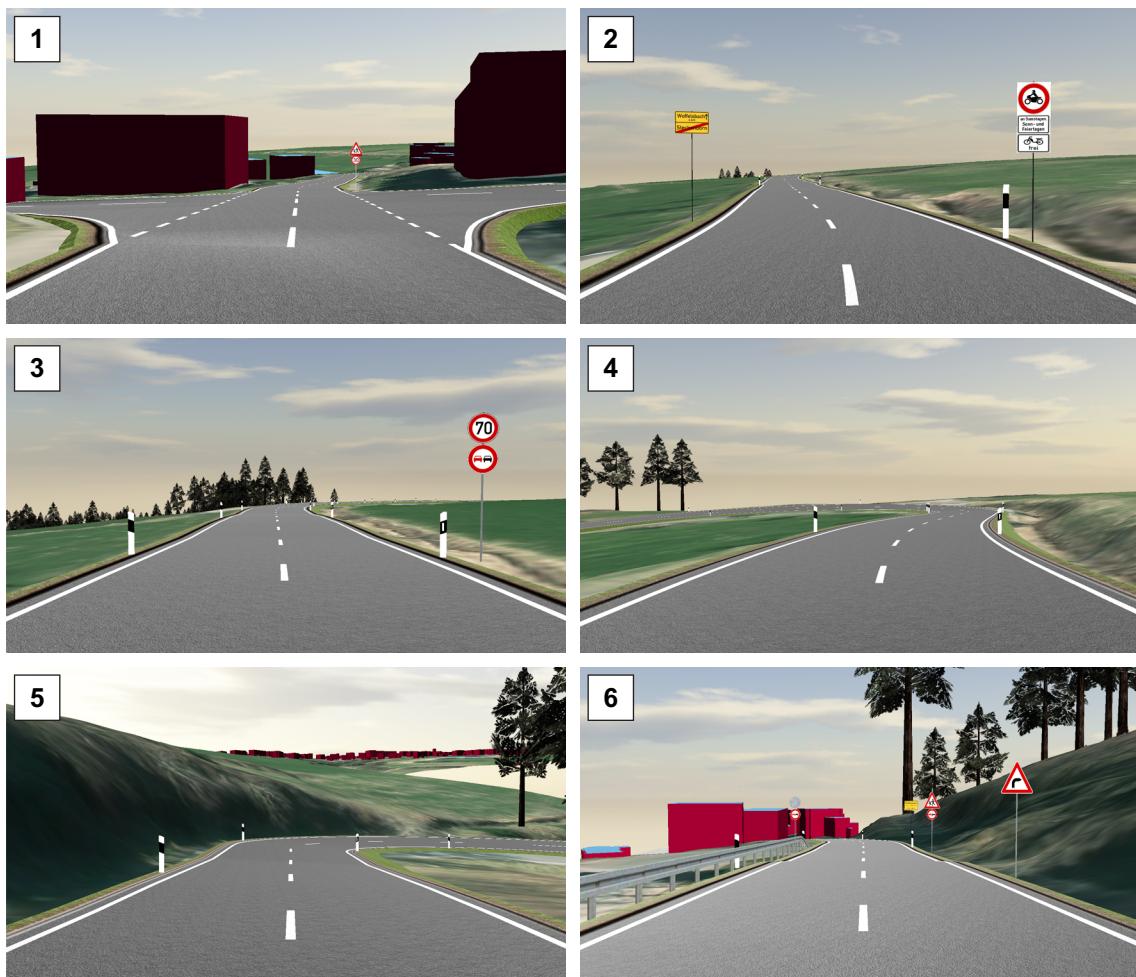


Bild 5-11: Impressionen des weitgehend automatisch aus Geodaten generierten Grafikmodells. Die Nummerierung entspricht den Positionsmarken aus Bild 5-1.

Die eingesetzten 3D-Stadtmodelle liefern zwar die Position und den Grundriss der Gebäude sowie deren Höhe. Es fehlen jedoch notwendige Angaben zur Geometrie des Da-

ches und der Texturierung. Detailliertere Modelle hätten unmittelbar Einfluss auf die Darstellungsqualität. Das digitale Landschaftsmodell kennzeichnet Waldgebiete. Innerhalb dieser Gebiete wurden die einzelnen Bäume weitgehend zufällig platziert. Dennoch vermittelt das entstehende 3D-Modell den Eindruck eines realistischen Waldes. An dieser Stelle würde ein detailliertes Baumkataster (bspw. [RSH+10, S. 5]) die Qualität des resultierenden 3D-Modells dennoch verbessern.

Bild 5-12 zeigt eine Übersichtsdarstellung des 3D-Modells der Validierungsumgebung Simmerath, das innerhalb der Phasen eins bis fünf des Vorgehensmodells gebildet wurde. Diese Modelle wurden weitgehend automatisch generiert und spiegeln daher die Qualität eines 3D-Modells wieder, das mit Hilfe der entwickelten Systematik in relativ kurzer Zeit aus Geodaten generiert werden kann. Dieses Modell eignet sich für den überwiegenden Teil der Validierungsmethoden und -technologien von Fahrerassistenzsystemen.

Zum Einsatz des 3D-Modells für interaktive Fahrsimulationen sind jedoch weitere Modellierungstätigkeiten notwendig, die im nächsten und letzten Schritt vollzogen wurden.



Bild 5-12: Übersichtsdarstellung des weitgehend automatisch aus Geodaten generierten Graphikmodells der Validierungsumgebung Simmerath. Die Nummerierung entspricht den Positionsmarken aus Bild 5-1.

5.2.6 Phase 6: Fertigstellung des Graphikmodells

Aufbauend auf den weitgehend automatisch generierten 3D-Modellen der vorherigen Phase wurde diese weiter detailliert und für den Einsatz im Fahrsimulator vorbereitet.

Die **Detaillierung einzelner 3D-Modelle** erfolgte vollständig manuell mit einem entsprechenden Modellierungswerkzeug (Presagis Creator). Im Rahmen dieser Arbeit wurden exemplarisch detaillierte Gebäude und einzelne Bäume in die Szene integriert. Die Detaillierung einzelner Gebäude wurde dabei durch deren vorgegebenen Grundriss erleichtert. Dem Modellierer oblag es anschließend das Modell in diesem Rahmen auszustalten. Durch die Georeferenzierung konnten fertige Modelle der Gebäude anschließend einfach in das Gelände integriert werden. Einzelne Bäume und Dekorationsobjekte sind letztlich individuell zu gestalten und in der Szene zu platzieren – der Phantasie sind

in diesem Zusammenhang keine Grenzen gesetzt. Der Modellierungsaufwand für einzelne Modelle ist dabei jedoch kaum zu beziffern und variiert erheblich, je nach Anforderung an die Darstellungsqualität.

Bild 5-13 zeigt Impressionen der letztlich gebildeten Graphikmodelle für die Validierungsumgebung Simmerath im Vergleich mit Photographien der realen Umgebung. Der Realitätsgrad der Darstellung kann dabei als ausreichend für den überwiegenden Teil der Anwendungen in der interaktiven Fahrsimulation erachtet werden. Die Detailmodellierung dieser Szenen konnte binnen weniger Tage abgeschlossen werden.

Zum letzten Einsatz des Graphikmodells im Bildgenerator des Fahrsimulators ist eine **Reduzierung der Komplexität einzelner 3D-Facettenmodelle** erforderlich. Dazu wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf die entsprechenden Funktionen des Pre-sagis Creator zurückgegriffen.

Als Beispiel für die Reduzierung der Komplexität von 3D-Facettenmodellen dienen die in Abschnitt 4.6.1 gebildeten Geländemodelle: Bei der automatischen Generierung wurden einzelne Kacheln mit mehr als 20.000 Polygonen (100 m Kantenlänge) generiert. In diesem Bereich besteht ein großes Potential zur Verringerung der Komplexität einzelner 3D-Facettenmodelle ohne Qualitätseinbußen. So wurde die Anzahl der Polygone in den Geländemodellen in den Ausschnitten aus Bild 5-13 um etwa 80% verringert; die visuelle Qualität bleibt dabei nahezu gleichbleibend.

Die im Rahmen dieser Arbeit generierten 3D-Modelle wurden auf dem Referenzsystem durchgehend mit einer Bildwiederholfrequenz von deutlich mehr als 30 Bildern pro Sekunde gerendert. Sie sind damit geeignet, die Anforderungen an den Bildgenerator zu erfüllen (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Fazit – Bildung des Graphikmodells

Das Graphikmodell ist mit Abschluss dieser Phase vollständig. Große Teile des Verkehrsnetzes wurden dabei automatisch auf Basis des Logikmodells gebildet. Lediglich die 3D-Modelle der Knotenpunkte mussten manuell mit Fahrbahnmarkierungen versehen werden. Die Landschaft in der näheren Umgebung wurde hingegen erneut vollständig automatisch aus Geodaten generiert und mit einfachen Gebäuden und Baumformati-onen versehen. In diesem Bereich erweist sich der systematische Einsatz von Geodaten erneut als sehr geeignet.

Zusammenfassend ist daher festzustellen, dass die auf Basis der identifizierten Geodaten weitgehend automatisch gebildeten Graphikmodelle für den Einsatz in der interaktiven Fahrsimulation geeignet sind, wenngleich im letzten Schritt umfangreiche manuelle Nacharbeiten zur Detaillierung und Steigerung der Graphikqualität notwendig sind.

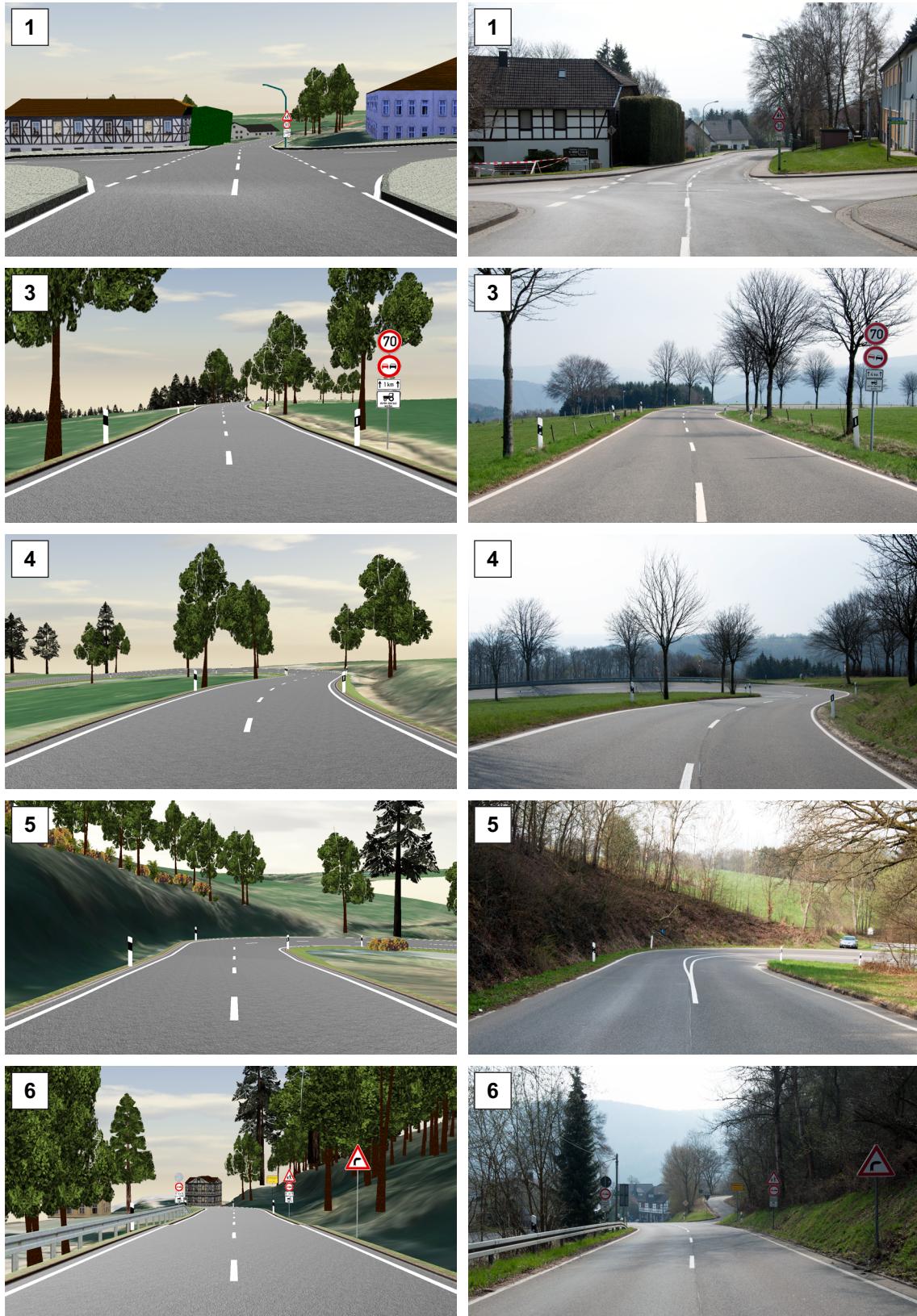


Bild 5-13: Ausgewählte Impressionen zum endgültigen Graphikmodell. Die Nummerierung entspricht den Positionsmarken aus Bild 5-1.

5.3 Kritische Bewertung: Erfahrungen aus Modellierungsprojekten

Für die Validierungsumgebungen Simmerath und Rüthen wurden bereits im Rahmen früherer Projekte Graphikmodelle ohne korrelierende Logikmodelle gebildet [Ber05, S. B-1f.], [BGG+08, S. 313]. Zur Modellierung wurde dabei durchgängig die Software Presagis Creator mit den entsprechenden Road Tools (vgl. Abschnitt 3.3.1) eingesetzt. Als Eingangsdaten wurden ein digitales Geländemodell, Satellitenfotos der Umgebung und ein Video mit einer realen Versuchsfahrt verwendet. Die eigentliche Modellierung erfolgte schließlich weitgehend manuell. Es wurden zwar unterstützende Funktionen des Software-Werkzeugs eingesetzt, um bspw. das 3D-Geländemodell aus einem digitalen Geländemodell zu triangulieren, texturieren und in Kacheln zu teilen. Der Zeitaufwand zur Bildung des gesamten Graphikmodells war dennoch erheblich: Das 3D-Geländemodell wurde bspw. innerhalb von etwa zwei Tagen erstellt. Zur Modellierung der Verkehrswege und deren Integration in das 3D-Geländemodell war jedoch ein deutlich größerer Aufwand notwendig: Für das etwa 4,5 km umfassende Verkehrsnetz in Simmerath wurden etwa vier Wochen gebraucht – trotz des durchgängigen Einsatzes der Creator Road Tools. Zur Detaillierung der Umgebung mit Verkehrsmobiliar, Gebäuden und Baumformationen waren zudem weitere acht Wochen Modellierungstätigkeit erforderlich, so dass die Bildung des Graphikmodells der Validierungsumgebung Simmerath insgesamt mehr als zwölf Wochen beanspruchte.

Der notwendige Zeitaufwand zur Bildung des Umgebungsmodells ist zwar kaum vergleichbar, da dieser maßgeblich von den Fähigkeiten des Modellierers, den Funktionen der eingesetzten Software-Werkzeuge und weiterer Einflussfaktoren abhängt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten die Phasen eins bis fünf des Vorgehensmodells (vgl. Abschnitte 4.2 bis 4.6) für die beiden Validierungsumgebungen (Gesamtstreckenlänge: etwa 15,7 km) jedoch in wenigen Tagen durchlaufen werden. Dabei wurde durchgängig das entwickelte Software-Werkzeug eingesetzt. Die in diesem Zeitraum entstehenden Umgebungsmodelle sind zweifellos für den überwiegenden Teil der Validierungsmethoden und -technologien von Fahrerassistenzsystemen geeignet, obschon zum Einsatz im Fahrsimulator noch Modellierungstätigkeiten zur Detaillierung des Graphikmodells notwendig sind. Zusammengenommen ist der Zeitaufwand zur Modellierung der Validierungsumgebung Simmerath mit etwa zwei Wochen zu beziffern, wobei die Qualität des Graphikmodells vergleichbar ist mit jener aus den früheren Modellierungsprojekten.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass das umfassende methodische Vorgehen in der entwickelten Systematik eine effiziente und zielgerichtete Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle ermöglicht, die letztlich in einer signifikanten Zeitersparnis im Vergleich zu bestehenden Ansätzen zur Bildung von Umgebungsmodellen resultiert. Dadurch ist die entwickelte Systematik im Hinblick auf den praktischen Einsatz im Umfeld der interaktiven Fahrsimulation als sehr gut einzuschätzen.

Als problematisch hat sich die prototypische Implementierung des Software-Werkzeugs erwiesen. Das Software-Werkzeug bildet das Vorgehensmodell zwar vollständig ab, spezielle Benutzungsschnittstellen zum zusätzlichen, nachträglichen Editieren einzelner Elemente des Logikmodells zogen jedoch erhebliche Aufwände nach sich, da dazu wiederholt umfangreiche Funktionen zu implementieren waren. Diese Problematik gilt für das Graphikmodell nur eingeschränkt, da durch die Werkzeugkopplung auf zahlreiche Funktionen des Presagis Creator zurückgegriffen werden konnte.

5.4 Bewertung der Systematik hinsichtlich der Anforderungen

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte *Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen* wird abschließend anhand der aus der Problemanalyse abgeleiteten Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.6) bewertet. Dazu wird für jede Anforderung kurz erläutert, wie die Systematik einer spezifischen Anforderung genügt.

A1: Ausrichtung auf das Virtual Prototyping von Fahrerassistenzsystemen

Die Systematik ist so aufgebaut, dass sich vollständige geospezifische Umgebungsmodelle bilden lassen, welche die technischen Anforderungen aus der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen berücksichtigen. Da einzelne Validierungsmethoden und -technologien jedoch nicht immer vollständige Umgebungsmodelle voraussetzen, lässt sich das Vorgehensmodell zudem anwendungsspezifisch adaptieren (vgl. Abschnitt 4.8). Einzelne Tätigkeiten des Vorgehensmodells können dabei so gewählt werden, dass lediglich jene Elemente des Umgebungsmodells gebildet werden, die für die gegenwärtige Validierungsmethode relevant sind. Da die einzelnen Phasen und die jeweils entstehenden Resultate weitgehend aufeinander aufbauen, können diese Elemente im Laufe einer weiteren Detaillierung zudem wiederverwendet werden.

A2: Systematische Vorgehensweise

Das Vorgehensmodell stellt eine systematische Modellbildung sicher. Es besteht aus sechs Phasen und beschreibt einzelne Tätigkeiten, integriert zu deren Umsetzung Hilfsmittel und legt die wesentlichen Ergebnisse eindeutig fest. Das Vorgehensmodell berücksichtigt dabei die Abhängigkeiten der unterschiedlichen Teilmodelle von Umgebungsmodellen und gewährleistet somit, aufkommende Iterationsschleifen bei der Modellierung klein zu halten. Es integriert ferner gegenwärtig verfügbare Geodaten zielgerichtet und effizient.

A3: Durchgängigkeit, Verständlichkeit und Praktikabilität

Die Systematik ermöglicht die Bildung vollständiger geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen. Die Praktikabilität und Durchgängigkeit der Systematik wurde anhand von zwei Validierungsbeispielen demonstriert. Dabei wurden sämtliche Phasen des Vorgehensmodells durchlaufen. Die Beschreibungstiefe einzelner Phasen

wurde so gewählt, dass die Systematik auch für Dritte nachvollziehbar sein sollte; sie damit in die Lage versetzt, geospezifische Umgebungsmodelle für interaktive Fahrsimulationen zu bilden.

A4: Hohes Potential zur Automatisierung

Die Systematik ist so gestaltet, dass sie in weiten Teilen ein hohes Maß an Automatisierung bietet (vgl. Kapitel 5). So wird bspw. das 3D-Geländemodell vollständig automatisch aus den eingesetzten Geodaten generiert (vgl. Abschnitt 4.6.1). Die eindeutige Beschreibung der Resultate einzelner Phasen definiert zudem einen Rahmen, der die zielgerichtete Entwicklung von Verfahren zur weiteren Automatisierung einzelner Phasen ermöglicht.

A5: Nachbildung realer Umgebung

Die Systematik ist auf die Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle ausgelegt, wenngleich sie ohne den Einsatz von Geodaten ebenso geeignet ist, Umgebungsmodelle zu bilden, die fiktive Umgebungen abbilden.

A6: Korrelierende Teilmodelle für Logik und Graphik

Die Anwendung der Systematik resultiert in zwei korrelierenden Teilmodellen für Logik und Graphik. Ein hoher Korrelationsgrad wird dabei durch die weitgehend automatische Generierung des Graphikmodells auf Basis des Logikmodells gewährleistet.

A7: Spezifische Ausrichtung auf interaktive Fahrsimulation

Die entstehenden Umgebungsmodelle beschreiben das Verkehrsnetz und die unmittelbare Umgebung in hohem Detailgrad (vgl. Abschnitte 4.5 und 4.6) – weitläufige Gebiete werden nicht abgebildet. Einzelne Streckenverläufe werden dabei so nachgebildet, dass die Abweichung zum realen Streckenverlauf innerhalb der Toleranz eines Meters liegt. Die entstehenden Umgebungsmodelle sind damit spezifisch auf interaktive Fahrsimulationen ausgerichtet.

A8: Offene und erweiterbare Systemarchitektur

Die Systemarchitektur des Software-Werkzeugs wurde offen und erweiterbar gestaltet (vgl. Abschnitt 4.9.2). Die Umsetzung des Modell-Sicht-Steuerung Musters und die Gliederung in einzelne Komponenten ermöglichen dabei die einfache Erweiterung bzw. Substitution einzelner Komponenten. Dadurch ist es bspw. möglich, zukünftige Geodaten in das System zu integrieren oder neue Funktionen zur weiteren Automatisierung einzelner Tätigkeiten zu entwickeln. Die Architektur kann darüber hinaus die Grundlage zur Weiterentwicklung des Software-Werkzeugs auch über den Prototyp hinaus sein.

A9: Kompatibilität mit bestehenden Standards

Die Systematik basiert auf bestehenden Standards (OpenDrive und OpenFlight) zur Beschreibung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen (vgl. Abschnitt 2.3.2). Dar-

über hinaus wurden aktuelle Standardformate für Geodaten eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.4.2).

Fazit

Die entwickelte *Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen* erfüllt alle Anforderungen in vollem Umfang und wurde erfolgreich an zwei Validierungsbeispielen erprobt. Insgesamt stellt die Systematik damit einen praxistauglichen Beitrag zur effizienten Modellbildung im Bereich der interaktiven Fahrsimulation dar; sie trägt damit letztlich ebenso zur Steigerung der Flexibilität interaktiver Fahrsimulationen bei.

6 Resümee und Ausblick

Fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme sind heute technisch hochkomplexe Systeme. Deren Entwicklung erfordert die ganzheitliche Betrachtung und integrierte Erprobung der technischen Aspekte des Systems im Sinne der Mechatronik und des Zusammenspiels von Fahrer und Assistenzsystem im Betriebsumfeld bzw. in der Betriebsumgebung des Systems. Interaktive Fahrsimulationen sind dabei etablierte Werkzeuge. Sie ermöglichen frühzeitig die integrierte Untersuchung dieser Aspekte in einer sicheren Umgebung mit reproduzierbaren Situationen. Interaktive Fahrsimulationen sind jedoch für sich bereits komplexe Systeme, die auf dem Zusammenwirken verschiedener Simulationsmodelle basieren. Geospezifische Umgebungsmodelle, welche Bestandteile realer Umgebung beschreiben, besetzen dabei eine zentrale Rolle: Sie sind eine wichtige Voraussetzung zur Validierung der Ergebnisse aus virtuellen Versuchsfahrten mit Ergebnissen aus realen Versuchsfahrten. Der Aufwand zur Erarbeitung der notwendigen korrelierenden Teilmodelle der Umgebungsmodelle (Logik- und Graphikmodell) ist jedoch erheblich.

Vor diesem Hintergrund wurden zunächst im Rahmen der **Problemanalyse** die wesentlichen **Herausforderungen** bei der Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle benannt: Es sind die komplexen technischen Rahmenbedingungen verschiedener Validierungstechnologien für Fahrerassistenzsysteme – inklusive der interaktiven Fahrsimulation – zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind aus der gegenwärtig unüberschaubaren Menge von Geodaten geeignete zu identifizieren und gezielt einzusetzen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen werden ein systematisches Vorgehensmodell sowie dedizierte Hilfsmittel benötigt. Von zentraler Bedeutung ist zudem ein Software-Werkzeug, das die Bildung von Umgebungsmodellen letztlich erst ermöglicht.

Die eingehende Analyse des **Stands der Technik** umfasst existierende Ansätze, die grundsätzlich zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen genutzt werden und solche, die explizit zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle auf Basis von Geodaten eingesetzt werden. Diese vorrangig methodischen Ansätze werden ergänzt durch die Untersuchung etablierter Software-Werkzeuge, die heute in unterschiedlichen Anwendungsgebieten zur Bildung von Umgebungsmodellen eingesetzt werden. Die untersuchten *Methoden zur Bildung von Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen* sind grundlegend: So bereiten die frühen Arbeiten von ALLEN et al. und CARLES den Weg zur Trennung von Logik- und Graphikmodell. Insbesondere CARLES liefert dazu umfassende mathematische Hintergründe. Die Bildung von Umgebungsmodellen aus vorgefertigten Kacheln ist nach wie vor eine sehr pragmatische und daher weitverbreitete Technik. KAUBNER fokussiert im Rahmen seiner Arbeit Langzeitversuche im Fahrsimulator. Diesen Ansätzen ist gemein, dass sie Geodaten überhaupt nicht berücksichtigen. Demgegenüber stehen die bestehenden *Ansätze zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle auf Basis von Geodaten*. So generieren WILKIE et al. bspw. Verkehrsnetze für großflächige Verkehrssimulationen automatisch aus Geodaten. Dies beinhaltet

zwar Aspekte, die auch für die vorliegende Arbeit relevant sind, die entstehenden Umgebungsmodelle sind jedoch nur bedingt für interaktive Fahrsimulationen geeignet. Die Ansätze aus dem Projekt SimWorld, von HAUNERT et al. sowie DESPINE und BAILLARD behandeln ebenfalls spezifische Teilespekte, die im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen werden. Es fehlt jedoch ein ganzheitliches Vorgehen. Die untersuchten *Software-Werkzeuge zur Bildung von Umgebungsmodellen* bieten zwar umfangreiche Funktionen zur Modellbildung. Deren gezielter Einsatz ist jedoch kaum dokumentiert und stets anwendungsspezifisch auszuarbeiten. Grundsätzlich bleibt daher trotz umfangreicher methodischer Ansätze und etablierter Software-Werkzeuge ein **Handlungsbedarf** für eine *Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen*.

Um dem verbleibenden Handlungsbedarf gerecht zu werden, basiert die entwickelte Systematik auf dem gezielten Einsatz von Geodaten und öffentlichen Richtlinien für die Anlage von Verkehrswegen. Sie greift ferner auf bestehende Ansätze und Software-Werkzeuge zurück. Das **Ergebnis** ist eine Systematik, die im Kern ein Vorgehensmodell sowie ein Software-Werkzeug umfasst:

- Das **Vorgehensmodell** gliedert die durchzuführenden Tätigkeiten zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle in sechs Phasen und integriert dabei systematisch Hilfsmittel, Modelle, dedizierte Geodaten sowie straßenbauliche Richtlinien.
- Das **Software-Werkzeug** setzt das Vorgehensmodell sowie die beschriebenen Hilfsmittel vollständig softwaretechnisch um. Es ermöglicht mit Hilfe einer grafischen Benutzungsschnittstelle das Importieren, Visualisieren und Transformieren von Geodaten und 3D-Modellen zu vollständigen Umgebungsmodellen für Fahrsimulationen.

Die **Validierung** der entwickelten Systematik erfolgte anhand einer konkreten Validierungsumgebung. Dabei wurde das Vorgehensmodell in dem prototypisch implementierten Software-Werkzeug vollständig durchlaufen, die entsprechenden Methoden und Berechnungsverfahren angewendet und die erzielten Resultate exemplarisch vorgestellt. Die Validierung zeigt damit die durchgängige Anwendbarkeit und Praktikabilität der Systematik.

Zusammenfassend bildet die entwickelte *Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen* ein **umfassendes Rahmenwerk**: Das Vorgehensmodell versetzt Entwickler in die Lage, die identifizierten Geodaten systematisch, gezielt und anwendungsspezifisch zur Bildung von Umgebungsmodellen einzusetzen. Das Software-Werkzeug implementiert das Vorgehensmodell sowie die eingesetzten Hilfsmittel. Letztlich ermöglicht erst diese prototypische Implementierung die weitgehend automatische Bildung von Logik- und Graphikmodellen; sie ist damit die Grundlage für die Validierung der Systematik hinsichtlich der durchgängigen Anwend-

barkeit und Praktikabilität. Darüber hinaus sind die offene Systemarchitektur sowie der ausnahmslose Einsatz freier Softwarebibliotheken die Basis für weitergehende Forschungstätigkeiten. Die formulierten Anforderungen sind somit in vollem Umfang erfüllt.

Ausblick

Es bleibt **weiterer Forschungsbedarf** für die Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen. Zukünftige Arbeiten sollten dabei eine weitergehende Automatisierung der einzelnen Tätigkeiten vorantreiben. Die dabei entstehenden Techniken können in die entwickelte Systematik integriert werden. Insbesondere im Rahmen der prototypischen Implementierung der vorliegenden Arbeit ergaben sich dabei folgende Stoßrichtungen:

- **Automatische Interpretation der digitalen Orthophotos:** Digitale Orthophotos sind eine reichhaltige Informationsquelle, die aufgrund stetig steigender Auflösungen weiter zunehmen wird. Die maschinelle Interpretation dieser Information erfordert jedoch aufwändige Bilderkennungsmechanismen, die nicht Gegenstand der entwickelten Systematik waren. Die Arbeit von GUO [Guo05] könnte in diesem Bereich der Ausgangspunkt weiterer Forschungstätigkeit sein. Erstes Ziel sollte die automatische Ermittlung der exakten Lage der Referenzlinie, der genauen Breite der Fahrbahn sowie die Bestimmung von Fahrbahnmarkierungen sein. Darüber hinaus eignen sich die Informationen im digitalen Orthophoto sicher auch, um die Bildung von 3D-Modellen einzelner Knotenpunkte weiter zu automatisieren.
- **Einsatz von Optimierungsverfahren zur Definition des Lageplans:** Die Parameterwerte für die einzelnen mathematischen Funktionen des Lageplans sollten automatisch bestimmt werden. Die Kenntnis der exakten Lage der Referenzlinie (bspw. aus der Interpretation von Orthophotos) könnte dabei eine vielversprechende Ausgangslage sein. Die einzelnen Parameterwerte müssten darauf aufbauend mittels mathematischer Optimierung ermittelt werden, um den vorgegebenen Verlauf der Referenzlinie optimal durch eine Sequenz von Geraden, Kreisbögen und Klothoiden abzubilden. Dabei sind unterschiedliche mathematische Ansätze und Verfahren zu Evaluieren.
- **Integration zukünftiger Geodaten:** Die Quantität und Qualität verfügbarer Geodaten wird auch in absehbarer Zeit kontinuierlich zunehmen. Zukünftige Geodaten müssen auf ihren Informationsgehalt untersucht und ggf. in die Systematik integriert werden. So wird in naher Zukunft bspw. die Lage, Höhe und Art einzelner Bäume flächendeckend verfügbar sein [RSH+10, S. 5]. Diese könnten somit automatisch und lagerichtig im Graphikmodell platziert werden.
- **Auslegung der visuellen Qualität des Graphikmodells:** Die entwickelte Systematik ermöglicht die lagerichtige Abbildung realer Umgebungen – insbeson-

dere von Strecken und Verkehrsknoten. Dies ist vorrangig für die Evaluierung von Fahrerassistenzsystemen wichtig, die ortsbezogene Daten verarbeiten (bspw. prädiktive Scheinwerferregelungen). Es existieren zudem bereits Ansätze zur simulationsbasierten Erprobung bildbasierter Fahrerassistenzsysteme [NNL+09]. Eine Methode zur Auslegung der visuellen Qualität des Graphikmodells auf die dabei entstehenden Anforderungen könnte hier großen Nutzen stiften.

7 Abkürzungsverzeichnis

3DSt	digitales 3D-Stadtmodell
bzgl.	bezüglich
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
DGM	digitales Geländemodell
DLM	digitales Landschaftsmodell
DOP	digitales Orthophoto
engl.	englisch
franz.	französisch
GIS	Geo-Informationssystem
ggf.	gegebenenfalls
GM	Graphikmodell
inkl.	inklusive
k. A.	keine Angaben
LM	Logikmodell
mind.	mindestens
MSSM	Modell-Sicht-Steuerung Muster
NAV	Navigationsdaten
SFB	Sonderforschungsbereich
sog.	sogenannte
syn.	synonym
u.a.	unter anderem
UTM	Universale transversale Mercatorprojektion
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

8 Formelzeichenverzeichnis

A_K	Charakteristischer Klothoidenparameter
d_e	Euklidische Distanz zwischen Knoten der Nav.-daten und dem Lageplan
d_V	Abstand vom Verkehrsmobiliar zur Referenzlinie
e_x	Eckpunkte der diskretisierten Geometrie
L_G	Länge einer Geraden
L_K	Länge einer Klothoiden
M_{PRS}	Anzahl der Funktionen zur penalisierten Spline-Regression
$\overrightarrow{n_R}$	Normalenvektor
R_{AP}	Radius eines Abbiegepfades
R_{KB}	Radius eines Kreisbogens
s	Laufweite entlang der Referenzlinie
t	Laterale Ausdehnung der Fahrbahn
u, v	Texturkoordinaten
x_K, y_K	Position eines Knotens der Navigationsdaten
x_L, y_L	Position des Lageplans für eine Laufweite s
x, y, z	Lokale euklidische Koordinaten
α_G	Schnittwinkel zweier Geraden
β_B	Drehwinkel des Banketts
θ_Q	Querneigungswinkel des Querschnittprofils
μ	Reibungskoeffizient
ρ_{PRS}	Penalisierungsfaktor der penalisierten Spline-Regression

9 Literaturverzeichnis

- [3DN12-01] 3D NATURE: Visual Nature Studio 3. www.3dnature.com, 14. Januar 2012
- [AB01] ALLEN, S.; BRUSE, C.: Development of Realistic Microscopic Terrain Surfaces and Features for Driving Simulation Environments. In: Proceedings of Driving Simulations Conference, September 5-7 2001, Sophia Antipolis, France, 2001
- [ABF+03] ATHANASAS, K.; BONNET, C.; FRITZ, H.; SCHEIDLER, C.: VALSE – Validierung Sicherheitskompetenter Elektronischer Assistenz- und Fahrfunktionen. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Simulation und Simulatoren – Mobilität virtuell gestalten. 15. /16. April 2003, Hamburg, VDI Verlag, VDI-Berichte 1745, Düsseldorf, 2003, S. 261-280 – ISBN 3-18-091745-8
- [ADF+10] ANGUELOV, D.; DULONG, C.; FILIP, D.; FRUEH, C.; LAFON, S.; LYON, R.; OGALE, A.; VINCENT, L.; WEAVER, J.: Google Street View – Capturing the World at Street Level. IEEE Computer 43 (6), Special Issue on Capturing the World, pp. 32-38, 2010
- [AH02] AKENINE-MÖLLER, T.; HAINES, E.: Real-Time Rendering – Second Edition. A K Peters Natick, USA, 2002
- [ALG12-01] ALGLIB: A cross-platform numerical analysis and data processing library. www.alglib.net, 22. April 2012
- [APR+04] ALLEN, R. W.; PARK, G.; ROSENTHAL, T. J.; APONSO, B.: A Process for Developing Scenarios for Driving Simulations. In: Proceedings of the IMAGE 2004 Conference, July 12-16 2004, Scottsdale, Arizona, USA, 2004
- [ARA+99] ALLEN, R. W.; ROSENTHAL, T. J.; APONSO, B.; HARMSEN, A.; MARKHAM, S.: Low Cost, PC-Based Techniques for Driving Simulation Implementation. In: Proceedings of Driving Simulations Conference, July 7-8 1999, Paris, France, 1999
- [ARA+01] ALLEN, R. W.; ROSENTHAL, T. J.; APONSO, B.; PARSEGHIAN, Z.; COOK, M.; MARKHAM, S.: A Scenario Definition Language for Developing Driving Simulator Courses. In: Proceedings of Driving Simulations Conference, September 5-7 2001, Sophia Antipolis, France, S. 369-377
- [ARA+02] ALLEN, R. W.; ROSENTHAL, T. J.; APONSO, B.; HARMSEN, A. MARKHAM, S.: A PC System for Measuring Driver Behavior. In: Proceedings of the 4th International Conference on Methods and Techniques in Behavioral Research, August 27-30 2002, Amsterdam, Netherlands
- [ARA+03] ALLEN, R. W.; ROSENTHAL, T. J.; APONSO, B.; PARK, G.: Scenarios Produced by Procedural Methods for Driving Research, Assessment and Training Applications. In: Proceedings of Driving Simulation Conference North America, 8.-10. October 2003, Dearborn, Michigan – ISSN 1546-5071
- [ASK+03] ALBERS, A.; SCHYR, C.; KRÜGER, A.; PFEIFFER, M.: Fahrsimulation am Antriebsstrang-Prüfstand. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Simulation und Simulatoren – Mobilität virtuell gestalten. 15. und 16. April 2003, Hamburg, VDI Verlag, VDI-Berichte 1745, Düsseldorf, 2003, S. 241-259 – ISBN 3-18-091745-8
- [Aut11-01] AUTODESK: 3ds Max® 2012 – Setzen Sie Ihre Kreativität frei. www.autodesk.com, 14. Januar 2012
- [Ave06] AVERDUNG, C.: Modellierung von 3D-Stadtmodellen mit heterogenen Ausgangsdaten. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 05/2006, VDE Verlag, Berlin
- [Bal11] BALZERT, H.: Lehrbuch der Softwaretechnik – Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb. Spektrum Verlag, Heidelberg, 3. Auflage, 2011

- [Bar05] BARTELME, N.: Geoinformatik – Modelle, Strukturen, Funktionen. Springer, Berlin, 4. Auflage, 2005
- [Bar10] BARCELÓ, J.: Models, traffic models, simulation, and traffic simulation. In: Barceló, J. (Hrsg.): Fundamentals of Traffic Simulation, International Series in Operations Research & Management Science 145. Springer Science+Business Media, New York, 2010, S. 1-61
- [BBG06] BERSSENBRÜGGE, J.; BAUCH, J.; GAUSEMEIER, J.: A Virtual Reality-based Night Drive Simulator for the Evaluation of a Predictive Advanced Front Lighting System. In: In: Proceedings of the ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, September 10 - 13 2006, Philadelphia, USA
- [Ben04] BENGEL, G.: Grundkurs Verteilte Systeme – Grundlagen und Praxis des Client-Server-Computing. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 3. Auflage, 2004 – ISBN 978-3-528-25738-5
- [Ber05] BERSSENBRÜGGE, J.: Virtual Nightdrive – Ein Verfahren zur Darstellung der komplexen Lichtverteilungen moderner Scheinwerfersysteme im Rahmen einer virtuellen Nachtfahrt. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 177, 2005
- [BF91] BILL, R.; FRITSCH, D.: Grundlagen der Geo-Informationssysteme – Band 1, Hardware, Software und Daten. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1. Auflage, 1991
- [BGG+08] BERSSENBRÜGGE, J.; GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; KREFT, S.: Ein VR-basierter Nachtfahrtsimulator für das Virtual Prototyping einer adaptiven Leuchtweitenregelung. In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 5. und 6. Juni 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 232, Paderborn, S. 307-321
- [Bil10] BILL, R.: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Wichmann Verlag, Berlin, 5. Auflage, 2010 – ISBN 978-3-87907-489-1
- [BJG+10] BOLLING, A.; JANSSON, J.; GENELL, A.; HJORT, M.; LIDSTRÖM, M.; NORDMARK, S.; PALMQVIST, G.; SEHAMMAR, H.; SJÖGREN, L.; ÖGREN, M.: SHAKE – An approach for realistic simulation of rough roads in a moving base driving simulator. In: Proceedings of Driving Simulation Conference Europe 2010, September 9-10 2010, Paris, France, pp. 135-143 – ISBN 978-2-85782-685-9
- [Ble12-ol] BLENDER FOUNDATION: Blender the free open source 3D content creation suite. www.blender.org, 14. Januar 2012
- [BMV12-ol] BUNDEMINSISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: Verkehr und Mobilität – Straße. www.bmvbs.de, 8. März 2012
- [Bri08] BRINKHOFF, T.: Geodatenbanksysteme in Theorie und Praxis – Einführung in objektrelationale Geodatenbanken unter besonderer Berücksichtigung von Oracle Spatial. Wichmann Verlag, Offenbach, 2. Auflage 2008 – ISBN 978-3-87907-472-3
- [Bro03] BROCKHAUS: Brockhaus – Naturwissenschaft und Technik. Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim, 2003
- [Boc09] BOCK, T.: Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [BT09] BRUNS, T.; TRÄCHTLER, A.: Kreuzungsmanagement: Trajektorienplanung mittels Dynamischer Programmierung. at – Automatisierungstechnik 57(5) 2009, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, S. 253-261

- [BZB+03] BUNGARTZ, H.-J.; ZIMMER, S.; BUCHHOLZ, M.; PFLÜGER, D.: Modellbildung und Simulation – eine anwendungsorientierte Einführung, Springer Verlag, Berlin, 2009, ISBN - 978-3540798095
- [Car01] CARLES, O.: Système de Génération Automatique de Bases de Données pour la Simulation de Situations de Conduite Fondée sur l’Interaction de ses Différents Acteurs. Thèse de Doctorat, Faculté de Informatique, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2001
- [CDF+07] COLDITZ, F.; DRAGON, L.; FAUL, R.; MELNIKOV, D.; SCHILL, V.; UNSELT, T; ZEEB, E.: Use of Driving Simulators within Car Development. In: Proceedings of Driving Simulation Conference North America, September 12-14 2007, Iowa City, USA
- [CDR+08] COLOMBET, F.; DAGDELEN, G.; REYMOND, C. P.; MERIENNE, F.; KEMENY, A.: Motion Cueing – What is the Impact on the Driver’s Behavior? In: Proceedings of Driving Simulation Conference 2008 Europe, January 31 - February 1 2008, Monaco, France – ISBN 978-2-85782-658-3
- [CE00] CARLES, O.; ESPÍE, S.: Multi-level environments modelling for road simulation. In: Proceedings of Driving Simulation Conference, September 6-8 2000, Paris, France
- [Cha08] CHALLEN, J.: Reality Bytes – John Challen takes a look at Toyota’s latest driving simulator. In: Traffic Technology International, UIP, Great Britain, April/Mai 2008 – ISSN 1356-9252
- [Che89] CHEW, L. P.: Constrained Delaunay Triangulations. In: Algorithmica 4, Springer Verlag New York, 1989, S. 97-108
- [CKP96] CREMER, J.; KEARNEY, J.; PAPELIS, Y.: Driving Simulation: Challenges for VR Technology. In: IEEE Computers and Applications 16(5), 1996, S. 16-20
- [CM97] COMANICIU, D.; MEER, P.: Robust analysis of feature spaces: Color image segmentation. In Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-19 1997, San Juan, Puerto Rico, 1997
- [Cow88] COWEN, D. J.: GIS versus CAD versus DMBS: What Are the Differences? Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54(11), November 1988, S. 1551-1555
- [CTH+10] CHAPLIER, J.; THAT, T. N.; HEWATT, M.; GALLÉE, G.: Toward a standard: RoadXML, the road network database format. In: Proceedings of Driving Simulations Conference Europe, September 9-10 2010, Paris, France – ISBN 978-2-85782-685-9
- [DB06a] DORF, R. C.; BISHOP, R. H.: Moderne Regelungssysteme. Pearson Studium, München, 10. Auflage, 2006 – ISBN 3-8273-7162-7
- [DB06b] DRESIA, H.; BILDSTEIN, F.: Simulation und virtuelle Welten – IT-Technologien der Zukunft. In: Dietrich, L.; Schirra, W. (Hrsg.): Innovationen durch IT – Erfolgsbeispiele aus der Praxis, Springer-Verlag, Berlin, 2006, S.159-170 – ISBN 978-3540291619
- [DB11] DESPINE, G.; BAILLARD, C.: Realistic Road Modelling for Driving Simulators using GIS Data. In: Ruas, A. (Ed.): Advances in Cartography and GIScience – Volume 2: Selection from ICC 2011, Paris, Springer-Verlag Heidelberg, 2011
- [Dic04] DICKMANN, F.: Einsatzmöglichkeiten neuer Informationstechnologien für die Aufbereitung und Vermittlung geographischer Informationen – das Beispiel kartengestützte Online-Systeme. Habilitationsschrift, Fakultät für Geowissenschaften und Geographie, Universität Göttingen, 2004
- [DG06] DUPUIS, M.; GREZLIKOWSKI, H.: OpenDRIVE – an Open Standard for the Description of Roads in Driving Simulations. In: Proceedings of Driving Simulation Conference Europe, October 4-6 2006, Paris, France – ISBN 2-85782-641-9
- [DP73] DOUGLAS, D. H.; PEUCKER, T. K.: Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. Cartographica: The International

- Journal for Geographic Information and Geovisualization, Volume 10(2), University of Toronto Press, 1973, ISSN – 0317-7173
- [DSG10] DUPUIS, M.; STROBL, M.; GREZLIKOWSKI, H.: OpenDRIVE 2010 and Beyond – Status and future of the de facto standard for the description of road networks. In: Proceedings of Driving Simulation Conference Europe 2010, September 9-10 2010, Paris, France, pp. 231-242 – ISBN 978-2-85782-685-9
- [dSP11-ol] dSPACE: Catalog 2011: ModelDesk – The graphical user interface. www.dspace.de, 14. Januar 2012
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, 2011
- [DWM+08] DOI, S.; WADA, T.; MORISHITA, M.; HORII, Y.; CHIGUSA, Y.: Investigation of Adaptive Front-Lighting Systems in Human-Machine Interface as Driver Assistance. In: Proceedings of Driving Simulation Conference Europe 2008, January 31-February 1 2008, Monaco, France, pp. 103-110 – ISBN 978-2-85782-658-3
- [DZ01] DICKMANN, F.; ZEHNER, K.: Computerkartographie und GIS. Westermann, Braunschweig, 2. Auflage, 2001 – ISBN 978-3-14-160338-5
- [EFG+03] ESPIÉ, S.; FOLLIN, E.; GALLÉE, G.; GANIEUX, D.; HERPERT, J.-M.: Automatic Road Networks Generation Dedicated to Night-Time Driving Simulation. In: Proceedings of Driving Simulation Conference North America, 8.-10. Oktober 2003, Dearborn, Michigan – ISSN 1546-5071
- [Ess08] VAN ESSEN, R.: Maps Get Real: Digital Maps evolving from mathematical line graphs to virtual reality models. In: van Oosterom, P.; Zlatanova, S.; Penninga, F.; Fendel, E. (ed.): Advances in 3D Geoinformation Systems – Lecture Notes in Geoinformation and Cartography 2008, Springer, Berlin, 2008, S. 3-18 – ISBN 978-3-540-72135-2
- [EWG+00] EHMANNS, D.; WALLENTOWITZ, H.; GELAU, C.; NICKLISCH, F.: Zukünftige Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung. In: 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorenmechanik, 4.-6. Oktober 2000, Aachen, 2000
- [FLK10] FAOUZI, N-E. E.; LEUNG, H.; KURIAN, A.: Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges – A survey. In: Information Fusion 12, Elsevier B.V., 2010
- [FSP10] FISCHER, M.; SEHAMMER, H.; PALMKVIST, G.: Motion cueing for 3-, 6- and 8-degrees-of-freedom motion systems. In: Proceedings of Driving Simulation Conference Europe 2010, September 9-10 2010, Paris, France, pp. 121-134 – ISBN 978-2-85782-685-9
- [Gay09] GAYKO, J: Lane Keeping Support. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [GB03] GLAUSER, C.; BIERI, H.: From Road Maps To 3D-Scenes: A Reconstruction System. In: Proceedings of the 19th Spring Conference on Computer Graphics, April 24-26, Budmerice, Slovakia. ACM, New York, 2003, S. 263-272
- [GBC+98] GRUENING, J.; BERNARD, J.; CLOVER, C.; HOFFMEISTER, K.: Driving Simulation. Vehicle Dynamics and Simulation, Society of Automotive Engineers, 980223, 1998, S. 49-59
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Carl Hanser Verlag München, 2001 – ISBN 3-446-21631-6
- [GGS09] GELAU, C.; GASSE, T. M.; SEECK, A.: Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009 – ISBN 978-3-8348-0287-3

- [Goo12-ol] GOOGLE: 3D-Modellieren mit Google SketchUp. www.google.com, 14. Januar 2012
- [Goo93] GOODCHILD, M. F.: The State of GIS for Environmental Problem-Solving. In: Goodchild, M. F.; Parks, B. O.; Steyaert, L. T.: Environmental Modeling with GIS. Oxford University Press, New York, 1993, S. 8-15
- [GPW09] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.; WENZELMANN, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2009 – ISBN 978-3-446-41055-8
- [Guo05] GUO, D.: Creating Geo-Specific Road Databases from Aerial Photos for Driving Simulation. Dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Central Florida, 2005
- [GWK04] GOU, D.; WEEKS, A.; KLEE, H.: Segmentation of Road Area in High Resolution Images. In: Proceedings of 2004 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. September 20-24 2004, Anchorage, USA, 2004, S. 3810-3813
- [GWK+09] GUO, D.; WEEKS, A.; KLEE, H.; YAN, X.: A framework for high-resolution geo-specific road database creation based on image processing techniques for driving simulation. Advances in Engineering Software 40, 2009, S. 820-829
- [Har09] HARZER, B. (Hrsg.): GIS-Report 2009/10 – Software, Daten, Firmen. Bernhard Harzer Verlag, Karlsruhe, 2009 – ISBN 978-3-9811899-02
- [HBN05] HAUNERT, J.-H.; BRENNER, C.; NEIDHART, H.: Using a geographic information system for the generation of driving simulator scenes. Advances in Transportation Studies – An International Journal, Special Issue, 2005
- [HEW06] HUESMANN, A.; EHMANN, D.; WISSELMANN, D.: Development of ADAS by Means of Driving Simulation. In: Proceedings of Driving Simulation Conference Europe, October 4-6 2006, Paris, France – ISBN 2-85782-641-9
- [HGB+10] HIBLOT, N.; GRUYER, D.; BARREIRO, J.-S.; MONNIER, B.: Pro-SiVIC and ROADS, a software suite for sensors simulation and virtual prototyping of ADAS. In: Proceedings of Driving Simulation Conference Europe, September 9-10 2010, Paris, France – ISBN 978-2-85782-685-9
- [Hin99] HINTERSEHER, M.: Entwicklung von Konzepten, Algorithmen und Optimierungsverfahren zur Transformation von Knoten in einem Netzwerk unter Beachtung von Integritätsbedingungen. Diplomarbeit, Fachbereich Informatik, Fachhochschule München, 1999
- [Hru04] HRUBEŠ, P.: Car simulator scene based on real world geographical data. Neural Network World – International Journal on Non-Standard Computing and Artificial Intelligence, Volume 14, Issue 1, 2004, Institute of Computer Science, Prague, S. 27-36
- [HSZ03] HACKBUSCH, W.; SCHWARZ, H. R.; ZEIDLER E: Teubner – Taschenbuch der Mathematik. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2. Auflage, 2003 – ISBN 3-519-20012-0
- [HTF69] HARASHIMA, F.; TOMIZUKA, M.; FUKUDA, T.: Mechatronics – „What Is It, Why and How?“ An Editorial. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 1(1), 1996
- [Ise06] ISERMANN, R.: Das mechatronische Kraftfahrzeug. In: Isermann, R. (Hrsg.): Fahrdynamik-Regelung – Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2006, ISBN – 978-3-8348-0109-8
- [Kau03] KAUBNER, A.: Dynamische Szenerien in der Fahrsimulation. Dissertation, Fakultät für Mathematik und Informatik, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 2003
- [KEG+08] KAISER, O. S.; EICKENBUSCH, H.; GRIMM, V.; ZWECK, A.: Zukunft des Autos. Zukünftige Technologien Nr. 75, VDI Technologiezentrum, Düsseldorf, 2008 – ISSN 1436-5928
- [Kho07] KHOMSKI, P.: Flexible Modelle für die Verweilzeiten: P-Spline basierte Methoden. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Bielefeld, 2007

- [KK10] KURTEANU, D; KURTEANU, E.: Open-source road generation and editing software. Master Thesis, Department of Computer Science and Engineering, University of Gothenburg, 2010
- [KLB+10] KREFT, S.; LORENZ, W.; BERSSENBRÜGGE, J.; GAUSEMEIER, J.; TRÄCHTLER, A.: A VR-based Prototyping and Demonstration Platform Integrating a Fully Active X-By-Wire Electrical Test Vehicle. In: Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, 15.-18. August 2010, Montreal, Canada
- [KMK+02] KAUBNER, A.; MARK, C.; KRÜGER, H.-P.; NOLTEMEIER, H.: Generic creation of landscapes and modelling of complex parts of road networks. In: Proceedings of Driving Simulations Conference, September 11-13 2002, Paris, France, 2002
- [Kno10] KNOLL, P.: Fahrerassistenzsysteme. In: Reif, K. (Hrsg.): Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- [KNW09] KUßMAUL, S.; NIERENZ, M.; WALKIEWICZ, V.: Landschaftsdatenbasen für Echtzeit-Simulation. In: Möller, R. (Hrsg.): 11. Workshop Sichtsysteme – Visualisierung in der Simulationstechnik, 19. und 20. November 2009, Wuppertal, Shaker Verlag, Aachen, 2009 – ISBN 978-3-8322-8634-7
- [KOM+09] KLEIN, T.; ORTMANN, S.; MÜLLER, J.; RADIMIRSCH, M; HAUPTVOGEL, A.: Funktionsentwicklung für Fahrerassistenzsysteme – Modellbasierte Entwicklung und innovative Simulationswerkzeuge zur Sicherung des Wettbewerbsvorsprungs. In: 14. Internationaler Kongress Elektronik im Kraftfahrzeug der VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik, 7. - 8. Oktober 2009, Baden-Baden, VDI Verlag, VDI-Berichte 2075, 2009 – ISSN 0083-5560
- [Kön09] KÖNIG, W.: Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner, H; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg): Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009 – ISBN 978-3-8348-0287-3
- [Kuc01] KUCHLING, H.: Taschenbuch der Physik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 17. Auflage, 2001 – ISBN 3-446-21760-6
- [KZ08] KORDUAN, P.; ZEHNER M. L.: Geoinformation im Internet – Technologien zur Nutzung raumbezogener Informationen im WWW. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2008 – ISBN 978-3-87907-456-3
- [Lan06] DE LANGE, N.: Geoinformatik in Theorie und Praxis. Springer Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2006 – ISBN 3-540-28291-2
- [Las09] LAST, R.: Generiertools und -verfahren zur Erstellung von VR-Szenen. In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 5. und 6. Juni 2009, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 232, Paderborn, 2009, S. 387-403
- [LGM+11] LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W.: Geographic Information – Systems & Science. John Wiley & Sons, Hoboken, 3. Edition, 2011 – ISBN 978-0-470-72144-5
- [LKV+07] LINDER, A.; KIRCHER, A.; VADEBY, A.; NYGÅRDHS, S.: Intelligent Transport Systems (ITS) in passenger cars and methods for assesment of traffic safety impact – A literature review. VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute), Rapport 604A, Linköping, Sweden, 2007
- [Lud10] LUDWIG, I.: Abbildung von Straßendaten für Qualitätsuntersuchungen – Ein Vergleich von OpenStreetMap mit Navteq. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, 2010
- [Mat05] MATYSCZOK, C.: Dynamische Kantenextraktion – Ein Verfahren zur Generierung von Tracking-Informationen für Augmented Reality-Anwendungen auf Basis von 3D-

- Referenzmodellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 165, 2005
- [Mau09] MAURER, M.: Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [Mey07] MEYWERK, M.: CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik. Springer-Verlag, Berlin, 2007 – ISBN 978-3-540-49866-7
- [Mit04] MITSCHKE, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. Springer Verlag Berlin, 4. Auflage, 2004 – ISBN 978-3540118
- [MKG+04] MARK, C.; KAUBNER, A.; GREIN, M.; NOLTEMEIER, H.: Dynamically Changing Road Networks – Modelling and Visualization in Real Time. In: Laganà, A.; Gavrilova, M. L.; Kumar, V.; Mun, Y.; Tan, C. J. K.; Gervasi, O. (Hrsg.): Proceedings of the International Conference on Computational Science and Its Applications. May 14-17 2004, Assisi, Italy Springer, 2004
- [Mos12-ol] MOSHIER, S. L.: Cephes Mathematical Function Lybrary. www.netlib.org/cephes, 22. April 2012
- [MW89] MEEK, D.S.; THOMAS, R. S. D.: The use of Cornu spirals in drawing planar curves of controlled curvature, Journal of Computational and Applied Mathematics 25, Elsevier, 1989 – ISSN 0377-0427
- [NDW93] NEIDER, J.; DAVIS, T.; WOO, M.: OpenGL Programming Guide – The Official Guide to Learning OpenGL, Release 1. Addison-Wesley, New York, 1993
- [NDW09] NEUMANN-COSEL, K.; DUPUIS, M; WEISS, C.: Virtual Test Drive Provision of a consistent tool-set for [D,H,S,V]-in-the-loop. In: Proceedings of Driving Simulation Conference Europe, February 4-6 2009, Monaco, France – ISBN 978-2-85782-671-2
- [Neg07] NEGELE, J.: Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, 2007
- [NHO+11] NOTHDURFT, T.; HECKER, P.; OHL, S.; SAUST, F.; MAURER, M.; RESCHKA, A.; BÖHMER, J. R.: StadtPilot: First Fully Autonomous Test Drives in Urban Traffic. In: Proceedings of 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, October 5-7 2011, Washington D. C., USA, IEEE Explore, 2011 – ISBN 978-1-4577-2197-7
- [NJT08] NACHTIGAL, V.; JÄKER, K.-P.; TRÄCHTLER, A.: Development and Control of a Quarter-Vehicle for a Fully Active X-by-Wire Demonstrator. In: Proceedings of 9th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC), Kobe, Japan, 2008
- [NNL+09] NEUMANN-COSEL, K.; NENTWIG, M.; LEHMANN, D.; SPETH, J.; KNOLL, A.: Preadjustment of a Vision-Based Lane Tracker. In: Proceedings of Driving Simulation Conference Europe, February 4-6 2009, Monaco, France – ISBN 978-2-85782-671-2
- [NZZ12] NEIS, P.; ZIELSTRA, D.; ZIPF, A.: The Street Network Evolution of Crowdsourced Maps: OpenStreetMap in Germany 2007-2011. Future Internet 4(1), 2012, S. 1-21
- [Okt11-ol] OKTAL: SCANE^R™ studio Terrain – The unique road database creation tool. www.scaner-simulation.com, 14. Januar 2012
- [PAW99] PAPELIS, Y.; ALLEN, S.; WEHRLE, B.: Automatic Correlated Terrain Database Generation and Management for Ground Vehicle Simulators. In: Proceedings of the American Institute of Aeronautics & Astronautics Modeling and Simulation Technologies Conference, August 9-11, 1999, Portland, USA, 1999
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung. Springer Verlag, Berlin, 7. Auflage, 2007

- [Pre11-ol] PRESAGIS: Creator – Easily and Effectively Create Highly Detailed 3D Models. www.presagis.com, 12. Oktober 2011
- [Pre12-ol] PRESAGIS: OpenFlight Scene Specification for version 16.4. www.presagis.com, 22. April 2012
- [Ran03] RANDT, B.: Datenbasisgenerierung für Verkehrssimulation. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Simulation und Simulatoren – Mobilität virtuell gestalten, 15. und 16. April 2003, VDI Verlag, Düsseldorf, VDI-Berichte 1745, 2003, S. 137-152 – ISBN 3-18-091745-8
- [RBK07] RANDT, B.; BILDSTEIN, F.; KOLBE, T. H.: Use of Virtual 3D-Landscapes for Emergency Driver-Training. In: Proceedings of the IMAGE 2007 Conference, July 10-12 2007, Scottsdale, Arizona, USA, 2007
- [Res09] RESPONSE 3 CONSORTIUM: Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS. Information Society Technologies, Version 5.0, 2009
- [Ril07] RILL, G.: Vehicle Dynamics – Lecture Notes. University of Applied Sciences Regensburg, 2007
- [RLK09] RICHTER, A.; LORENZ, T.; KÖSTER, F.: Iterative development of assistance and automation systems based on enhanced simulation and test beds. In: Gnauck, A.; Luther, B. (Hrsg.): 20. Symposium Simulationstechnik, 23.-25. September 2009, Cottbus, Shaker Verlag – ISBN 978-3-8322-8509-8
- [RM08] RAUH, J.; MÖSSNER-BEIGEL, M.: Tyre simulation challenges. Vehicle System Dynamics (46), Taylor & Francis, London, 2008, S. 49-62
- [RSH+10] ROßMANN, J.; SCHLUSE, M.; HOPPEN, M.; WASPE, R.: GIS-Based Virtual Testbeds and their Application to Forestry and City Simulation. In: Proceedings of the ASME 2010 World Conference on Innovative Virtual Reality (WINVR2010), May 12-14 2010, Ames, Iowa, USA
- [SFK+07] SPARWASSER, N.; FRIEDL, H.; KRAUB, T.; MEISNER, R.; STÖBE, M.: SimWorld – Automatic Generation of realistic Landscape models for Real Time Simulation Environments – a Remote Sensing and GIS-Data based Processing Chain. International Conference on Road Safety and Simulation, October 7-9 2007, Rom
- [SGP03] SCHWARZ, C.; GATES, T.; PAPELIS, Y.: Motion Characteristics of the National Advanced Driving Simulator. In: Proceedings of the Driving Simulator Conference North America 2003, Dearborn, October 8-10, 2003, ISSN 1546-5071
- [Slo08] SLOB, J.: State-of-the-Art Driving Simulators – a Literature Survey, Internal Report DCT 2008.107, Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, Netherlands, 2008
- [Sny84] SNYDER, J. P.: Map Projections Used by the U.S. Geological Survey – Geological Survey Bulletin 1532. United States Government Printing Office, Washington, Second Edition, 1984
- [Sui05] SUIKAT, R.: The new Dynamic Driving Simulator at DLR. In: Proceedings of Driving Simulation Conference North America 2005, November 30- December 2 2005, Orlando, USA, 2005
- [TES12-ol] TESIS DYNAWARE: DYNAanimation. www.thesis-dynaware.com, 14. Januar 2012
- [Tom67] TOMLINSON, R. F.: An Introduction to the Geo-Information System of the Canada Land Inventory. White paper, Canada Land Inventory, Department of Forestry and Rural Development, Ottawa, 1967
- [Tön05] TÖNNIES, K. D.: Grundlagen der Bildverarbeitung. Pearson Studium, München, 2005 – ISBN 3-8273-7155-4

- [Trä05] TRÄCHTLER, A.: Integrierte Fahrdynamikregelung mit ESP, aktiver Lenkung und aktivem Fahrwerk. In – Automatisierungstechnik 53(1), Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005
- [Tri11-ol] TRIANGRAPHICS: Trian3D Builder 4 – Database Generation System. www.triangraphics.de, 14. Januar 2012
- [TT06] TESCHL, G., TESCHL, S.: Mathematik für Informatiker. Springer Verlag, 2006 – ISBN 978-3-540-28067-5
- [TVG+08] TOMILLO, A. M. P.; VILLAVERDE, R. B.; GIL, J. L. D; LORENZO, R. B.: Analysis Of Integrated Warning Strategies For ADAS Systems Through High Performance Driving Simulator. In: Proceedings of Driving Simulation Conference Europe 2008, January 31-February 1 2008, Monaco, France, pp. 93-102 – ISBN 978-2-85782-658-3
- [Vir06-ol] VIRES: ROD® – Road Designer – Product Data Sheet. www.vires.com, 14. Januar 2012
- [WDS09] WINNER, H; DANNER, B.; STEINLE, J.: Adaptive Cruise Control. In: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [WHW09] WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [WK11] WAßMANN, H.; KREFT, S.: Virtual Prototyping – Ingenieure entwickeln mit Virtueller Realität. In: Marco Hemmerling (Hrsg.): Augmented Reality – Mensch, Raum und Virtualität, Wilhelm Fink Verlag, München, 2011 – ISBN 978-3-7705-5254-2
- [WSL11] WILKIE, D.; SEWALL, J.; LIN, M. C.: Transforming GIS Data into Functional Road Models for Large-Scale Traffic Simulation. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Volume 16(5), IEEE Computer Society, 2011
- [WW09] WINNER, H.; WOLF, G.: Quo vadis, FAS? In: Winner, H; Hakuli, S.; Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009 – ISBN 978-3-8348-0287-3
- [Wym07] WYMAN, O.: Car Innovation 2015 – Innovationsmanagement in der Automobilindustrie. München, 2007
- [YT99] YUAN, S.; TAO, C.: Development of Conflation Components. In: Li, B. et al. (Eds.): Geoinformatics and Socioinformatics – Proceedings of the International Conference on Geoinformatics, June 19-21 1999, Ann Arbor, USA, pp. 1-13 – ISBN 0-9651441-3-5
- [Zee10] ZEEB, E.: Daimler's new full-scale, high-dynamic driving simulator – A technical overview. In: Proceedings of Driving Simulation Conference Europe 2010, September 9-10 2010, Paris, France, pp. 157-165 – ISBN 978-2-85782-685-9
- [Zha09] ZHANG, M.: Methods and Implementations of Road-Network Matching. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Universität München, 2009
- [ZNC+10] ZHAO, X.; NELSON, A.; CHRYSLER, S.; ZHANG, Y.: Automated Generation of Virtual Scenarios in Driving Simulator from Highway Design Data. Technical Report No. SWUTC/10/476660-00018-1, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, USA, 2010

Normen und Richtlinien

- [CGM08] OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM INC.: OpenGIS City Geographic Markup Language (CityGML) Encoding Standard, Version 1.0.0, August 2008, www.opengeospatial.org
- [DIN1421] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Gliederung und Benennung in Texten – Abschnitte, Absätze, Aufzählungen. DIN 1421, Beuth-Verlag, Berlin, 1983

- [ISO19111] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO); EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN): Geographic information – Spatial referencing by coordinates. ISO 19111:2007, ISO copyright office, Geneva, 2007
- [ODR10] DUPUIS, M. (Hrsg.): OpenDRIVE – managing the road ahead, Version 1.3, August 2010, www.opendrive.org
- [RAA08] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRÄßen- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) – ARBEITSGRUPPE STRÄßenENTWURF: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA). FGSV e.V., Köln, 2008 – ISBN 978-3-939715-51-1
- [RAL95] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRÄßen- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) – ARBEITSGRUPPE STRÄßenENTWURF: Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Linienführung (RAS-L 95). FGSV e.V., Köln, 1995
- [RAQ96] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRÄßen- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) – ARBEITSGRUPPE STRÄßenENTWURF: Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Querschnitte (RAS-Q 96). FGSV e.V., Köln, 1996
- [RAS06] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRÄßen- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) – ARBEITSGRUPPE STRÄßenENTWURF: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt 06). FGSV e.V., Köln, 2007 – ISBN 978-3-939715-21-4
- [RXM11] DUCLOUX, P.; CHAPLIER, J.; MILLET, G.; GALLEE, G.: RoadXML – Road Network Description, Version 2.3. Dezember 2011, www.road-xml.org
- [StVo10] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: Straßenverkehrs-Ordnung. Stand: 1. Dezember 2010, www.bmvbs.de
- [UML11] OBJECT MANAGEMENT GROUP (OMG): Unified Modelling Language, Version 2.4.1. August 2011, www.omg.org
- [VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206, Beuth-Verlag, Berlin, 2004
- [VDI3633] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. VDI-Richtlinie 3633, Beuth-Verlag, Berlin, 2010

Anhang

Inhaltsverzeichnis		Seite
A1	Ergänzungen zur Problemanalyse (Kapitel 2)	A-3
	A1.1 Eingesetzte geodätische Koordinatenreferenzsysteme	A-3
	A1.2 Eingesetzte Transformationsverfahren.....	A-3
A2	Ergänzungen zum Stand der Technik (Kapitel 3)	A-5
A3	Ergänzungen zur Systematik (Kapitel 4)	A-7
	A3.1 Eingesetzte Geodaten	A-7
	A3.2 Eingesetzte Regelquerschnitte	A-7
	A3.3 Betrachtete verkehrsrelevante Attribute	A-8
	A3.4 Ergänzungen zur prototypischen Implementierung des Software-Werkzeugs.....	A-9
A4	Ergänzungen zur Validierung (Kapitel 5)	A-11

A1 Ergänzungen zur Problemanalyse (Kapitel 2)

In diesem Abschnitt werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingesetzten geodätischen Koordinatensysteme sowie die verwendeten Transformationsverfahren gelistet.

A1.1 Eingesetzte geodätische Koordinatenreferenzsysteme

Tabelle A-1 zeigt Beispielkoordinaten in den verwendeten geodätischen Koordinatenreferenzsystemen World Geodetic System 1984 (WGS'84) und Universale Transversale Mercatorprojektion (UTM) sowie die Parameter der jeweiligen Referenzellipsoide.

Tabelle A-1: Beispielkoordinaten für jeweils einen Punkt auf der Erde in den eingesetzten Koordinatenreferenzsystemen.

Randkoordinaten der eingesetzten Geodaten		UTM-Koordinaten		Geographische Koordinaten	
		ETRS '89 Ellipsoid Rechtswert	Hochwert	WGS '84 Ellipsoid ellips. Breite (Lon)	ellips. Länge (Lat)
Rüthen	Nord-Ost	32 466.428,4	5.712.168,4	8° 51' 57,4"	51° 55' 94,0"
	Süd-West	32 462.558,2	5.708.606,8	8° 46' 02,6"	51° 52' 73,3"
Simmerath	Nord-Ost	32 314.897,7	5.611.787,3	6° 38' 28,9"	50° 62' 78,4"
	Süd-West	32 312.731,1	5.610.938,5	6° 35' 21,4"	50° 62' 05,2"

UTM: Universale Transversale Mercatorprojektion
 ETRS: Europäisches Terrestrisches Referenzsystem
 WGS: World Geodetic System

ETRS '89 Ellipsoid:
 $a = 6.378.137 \text{ m}$
 $f = 1 / 298,257222101$
 $b = a(1-f) = 6.356.752,3141 \text{ m}$

WGS '84 Ellipsoid:
 $a = 6.378.137 \text{ m}$
 $f = 1 / 298,257223563$
 $b = a(1-f) = 6.356.752,314 \text{ m}$

A1.2 Eingesetzte Transformationsverfahren

Die Umrechnung zwischen UTM- und geographischen Koordinaten erfolgt nach SNYDER [Sny84, S. 63ff.]. Die Koordinaten werden dabei von geographischen Koordinaten in UTM-Koordinaten transformiert.

Liegen sämtliche Geodaten in UTM-Koordinaten vor, werden diese in ein lokales euklidisches transformiert. Dabei wird der süd-westlichste Punkt der relevanten Geodaten als Koordinatenursprung angenommen. Die UTM-Koordinaten einzelner Geodaten lassen sich anschließend mittels simpler Translation in das lokale euklidische Koordinatensystem transformieren.

A2 Ergänzungen zum Stand der Technik (Kapitel 3)

Tabelle A-2 listet Details zu den im Stand der Technik eingesetzten Geodaten. Die Tabelle ist unvollständig, da bei einigen Beschreibungen von Ansätzen zur Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle auf Basis von Geodaten (Abschnitt 3.2) keine Angaben zu konkret eingesetzten Geodaten vorhanden sind.

Tabelle A-2: Details zu den im Stand der Technik verwendeten Geodaten.

Kapitel	Anwendungsgebiet	Geodatenkategorie	Auflösung	Bezugsquelle
3.2.1	Biscoe (USA)	Verkehrsnetz	± 3 m	OpenStreetMap (www.openstreetmap.org)
3.2.2	Orlando (USA)	Verkehrsnetz (Digital Line Graph)	k. A.	U. S. Geological Survey (www.usgs.gov)
		Orthophotos (Überflug)	0,2 - 0,3 m/px	U. S. Geological Survey (www.usgs.gov)
3.2.5	Braunschweig und Berchtesgaden (Deutschland)	Navigationsdaten	± 3 m	TeleAtlas/ TomTom (www.tomtom.com)
		Landschaftsmodell (CORINE land cover)	k. A.	European Environment Agency (www.eea.europa.eu)
		Orthophotos (Satellit)	0,8 m/px	GeoEye (www.geoeye.com)
		Geländemodell (SRTM)	25 m horiz. 1 m vertik.	U. S. Geological Survey (www.usgs.gov)
3.2.6	Lyon (Frankreich)	Navigationsdaten	± 3 m	TeleAtlas/ TomTom (www.tomtom.com)
		Landschaftsmodell	± 5 m	Siradel (www.siradel.com)
		Geländemodell	± 5 m	Siradel (www.siradel.com)
		Stadtmodell	± 5 m	Siradel (www.siradel.com)

k. A.: keine Angaben

CORINE: Coordination of Information on the Environment

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

A3 Ergänzungen zur Systematik (Kapitel 4)

Im Folgenden werden Einzelheiten der Systematik gelistet. Dies beinhaltet konkrete Angaben zu den eingesetzten Geodaten, ergänzende Auflistungen zu eingesetzten Regelquerschnitten, den im Rahmen der Arbeit berücksichtigten verkehrsrelevanten Attributen. Darüber hinaus wird exemplarisch die Bildung eines 3D-Modells eines Kreisverkehrs dargestellt. Der Abschnitt schließt mit Ergänzungen zur prototypischen Implementierung.

A3.1 Eingesetzte Geodaten

Tabelle A-3: Auflösung und Bezugsquelle der eingesetzten Geodaten.

Geodatenbezeichnung	Auflösung	Bezugsquelle
3D-Gebäudestrukturen (3D-GS)	± 0,5 m	Geobasis NRW (www.bezreg-koeln.nrw.de)
Navigationsdaten	± 3 m	NAVTEQ (www.navteq.com)
Digitales Landschaftsmodell (ATKIS® – Basis-DLM)	± 3 m	Geobasis NRW (www.bezreg-koeln.nrw.de)
Digitale Orthophotos (DOP)	0,2 m/px	Geobasis NRW (www.bezreg-koeln.nrw.de)
Digitales Geländemodell (DGM1)	1 m horiz. ± 0,2 m vertik.	Geobasis NRW (www.bezreg-koeln.nrw.de)

Stand: Juni 2011

A3.2 Eingesetzte Regelquerschnitte

Tabelle A-4: Zur Schätzung der Fahrbahnbreite eingesetzte Regelquerschnitte nach [RAQ96, S. 15ff.] und [RAS06, S. 33ff.].

Straßenkategorie	Fahrstreifen [Anzahl]	Breite [m]			
		Fahrstreifen	Randstreifen	Bankett	Markierung
Kreisstraße	2	2,75	0,05	1,00	0,12
Landesstraße	2	3,00	0,25	1,50	0,12
Bundesstraße	2	3,50	0,25	1,50	0,25
Landesstraße	4	3,25	0,05	1,50	0,12
Bundesstraße	4	3,25	0,50	1,50	0,25

A3.3 Betrachtete verkehrsrelevante Attribute

Tabelle A-5: Übersicht der wichtigsten im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten verkehrsrelevanten Attribute (Piktogramme nach [StVo10]).

Attribut	Verkehrszeichen	Attribut	Verkehrszeichen
Zulässige Höchstgeschwindigkeit		Ende sämtlicher Streckenverbote	
Vorfahrt gewähren!		Halt! Vorfahrt gewähren!	
Verengte Fahrbahn		Doppelkurve	
Kurve (links)		Kurve (rechts)	
Überholverbot für Kraftfahrzeuge		Ende des Überholverbots für Kraftfahrzeuge aller Art	
Gefälle		Steigung	

A3.4 Ergänzungen zur prototypischen Implementierung des Software-Werkzeugs

Die folgende Tabelle listet Details der zur prototypischen Implementierung des Software-Werkzeugs eingesetzten Bibliotheken. Sämtliche Bibliotheken sind dabei als offener Quellcode frei verfügbar.

Tabelle A-6: Im Rahmen der prototypischen Implementierung eingesetzte Softwarebibliotheken.

Bezeichnung	Ver.	Bezugsquelle	Wesentliche Funktionalität
OpenSceneGraph (OSG)	2.9.9	www.openscenegraph.org	<ul style="list-style-type: none"> • Bildung von 3D-Modellen • 3D-Rendern von Logik- und Graphikmodell • 3D-Rendern der Szene
Qt	4.7.1	www.qt.nokia.com	<ul style="list-style-type: none"> • Graphische Benutzungsschnittstelle • Darstellung, Verwaltung und Manipulation einzelner Einträge im Logikmodell • Allgemeine Funktionsaufrufe (z. B. Laden/Speichern von Teilmodellen)
Geospatial Data Abstraction Library (GDAL/OGR)	1.9.0	www.gdal.org	<ul style="list-style-type: none"> • Verarbeitung des 3D-Stadtmodells
Open Source Computer Vision (OpenCV)	2.3.1	www.opencv.org	<ul style="list-style-type: none"> • Bildverarbeitung der Orthophotos
ALGLIB	3.4.0	www.alglib.net	<ul style="list-style-type: none"> • Mathematische Interpolation

A4 Ergänzungen zur Validierung (Kapitel 5)

Analog zur Beschreibung der Validierungsumgebung Simmerath (vgl. Abschnitt 5.1) wird im Folgenden Rüthen dargestellt, um die Orientierung zu erleichtern. Die relevante Versuchsstrecke befindet sich in der Nähe der ostwestfälischen Stadt Rüthen im Kreis Soest. Bild A-1 zeigt den relevanten Rundkurs (etwa 11,9 km Gesamtlänge) in der Übersicht. In Anlehnung an BERSSENBRÜGGE [Ber05, S. 130f.] startet eine Runde auf der Versuchsstrecke an der Kreuzung der Landesstraße L776 mit der Kreisstraße K45 (6)⁷⁴ und verläuft im Uhrzeigersinn. Die Erprobungsfahrt führt zunächst für ca. 4,2 km entlang der Kreisstraße K45 über freies Feld in den Rüthenener Stadtteil Langenstraße-Heddinghausen. An der Kreuzung K45/Johannesholzstraße (1) biegt die Versuchsstrecke rechts ab auf die Landesstraße L747 und folgt dieser über die Einmündung zur Eickhoffer Straße (2) hinweg in eine topographisch ausgeprägte Senke mit Waldgebiet (3). Anschließend wird der Landesstraße L747 für ca. 1,2 km bis zur Ortschaft Eickhoff (Stadt Büren) (4) (5) gefolgt, diese durchquert und ein weiterer Kilometer bis zur Einmündung mit der Landesstraße L776 zurückgelegt. Dabei wechseln sich insgesamt freie Flächen und einzelne Waldgebiete ab. An der Einmündung L747/L776 wird erneut nach rechts abgebogen. Die Versuchsfahrt verläuft schließlich für ca. 4,2 km entlang der Landesstraße L776 durch ein längeres Waldgebiet und über freies Feld zur Kreuzung mit der Kreisstraße K66 (6), wo die Versuchsfahrt erneut beginnt.

Die Validierungsumgebung Rüthen wird vorrangig in Kapitel 4 eingesetzt, um die einzelnen Tätigkeiten und Hilfsmittel zu veranschaulichen. Die in Bild A-1 integrierte Tabelle ordnet dabei den einzelnen Abschnitten in Kapitel 4 Positionsmarken entlang der Strecke zu. So wird die Identifikation einzelner Strecken und Knotenpunkte in Abschnitt 4.2.1 anhand des Gebiets an der Positionsmarke 1 erläutert.

⁷⁴ Die Ziffern in den Klammern beziehen sich auf die Positionsmarken in Bild A-1, die markante Punkte der Versuchsstrecke kennzeichnen.

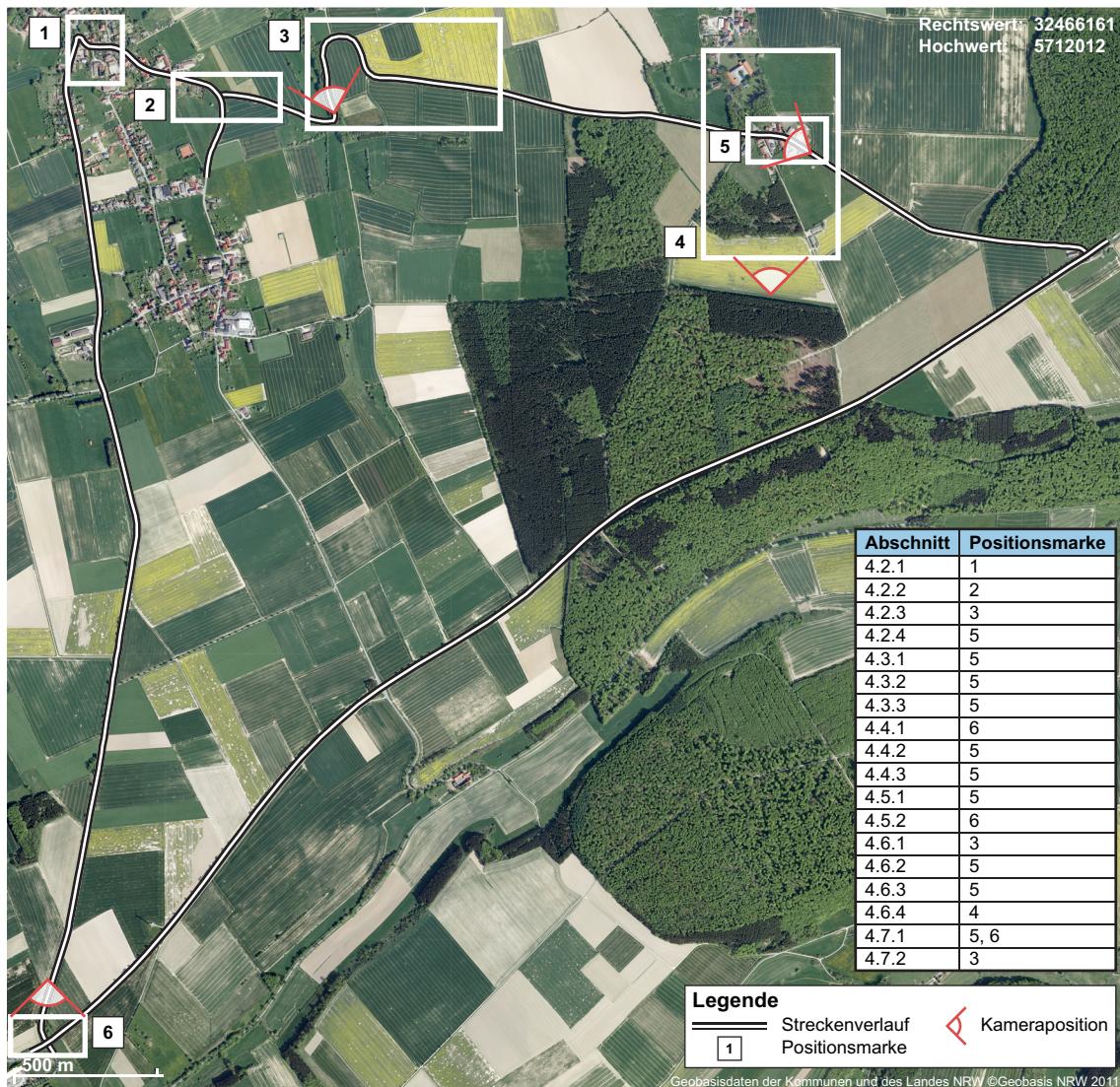


Bild A-1: Übersichtsdarstellung der Validierungsumgebung Rüthen mit der Zuordnung der Positionsmarken zu Abschnitten in Kapitel 4.