



Jens Rieken (Autor)

Ein Beitrag zur 3D-Umfeldwahrnehmung für automatisierte Straßenfahrzeuge im urbanen Raum



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8319>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung

Das automatisierte Fahren ist eines der wesentlichen Zukunftsthemen für die Mobilität unserer Gesellschaft. Mit ihm werden unterschiedlichste Zukunftsvisionen und Hoffnungen verbunden. So soll durch automatisierte Fahrfunktionen die Sicherheit im Straßenverkehr erhöht werden. Automatisierte Fahrzeuge können Mobilität für Personengruppen anbieten, welche ansonsten keinen Zugang zu dieser hätten, beispielsweise ältere Personen oder solche mit körperlichen und/oder geistigen Einschränkungen (z. B. als Fahrzeug auf Abruf, engl. *Vehicle-On-Demand*, siehe Wachenfeld u. a. (2015, Kapitel 2.3.4))¹. Zeitgleich wird die Automatisierung von Fahrzeugen und Verkehrsflüssen als eine mögliche Lösung für die anhaltende Zunahme des Verkehrsaufkommens in städtischen Ballungsgebieten angesehen. Durch alternative Mobilitätskonzepte wie dem Fahrzeug auf Abruf wären weniger personengebundene Fahrzeuge erforderlich, was wiederum die Grundlage für eine effizientere Nutzung der öffentlichen Verkehrswege sein kann (vgl. Heinrichs, 2015; Lenz & Fraedrich, 2015). Durch die Automatisierung von Parkfunktionen kann eine bessere Auslastung verfügbarer Parkbereiche erreicht werden. Schließlich erhöht die Automatisierung auch den Komfort für die mitfahrenden Personen, da diese während der Fahrt nicht durch die Aufgabe der Fahrzeugführung gebunden sind, sondern sich anderen Aktivitäten widmen können².

Wesentlichen Anteil an der technischen Realisierbarkeit³ obiger Funktionalitäten hat die Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds. Diese bildet die Grundlage und zugleich einen technischen Rahmen dessen, was ein automatisiertes Fahrzeug leisten kann. Die Umfeldwahrnehmung nutzt aktive und passive Sensorsysteme zur Erfassung des Fahrzeugumfelds und generiert aus diesen Daten ein internes Abbild desgleichen. Sie stellt diese Ergebnisse für die Planung und Umsetzung des Verhaltens durch das Fahrzeugführungssystem bereit. Neben Kamera-, Ultraschall- und Radar-Technologien wird hierfür auch laserbasierte Messtechnik eingesetzt. Ihre Vorteile liegen in der präzisen Messung von Winkel und Distanz zum Zielobjekt und der damit möglichen detaillierten Vermessung von Form und Position. Als aktive Sensortechnologie ist sie unabhängig von der Beleuchtung der Umgebung durch weitere Quellen. Diese detaillierte Erfassung des Umfelds ist insbesondere in dicht bebauten, urbanen Gebieten von Vorteil, um Abstände und Freiräume sowohl zur Randbebauung als auch zu anderen Verkehrsteilnehmern mit hinreichender Güte bestimmen zu können. Durch das heterogene Umfeld ergibt sich zudem die Notwendigkeit einer Erfassung und Repräsentation des Umfelds in drei Raumdimensionen. So trifft die für Autobahnen und andere strukturierte Umgebungen häufig gewählte Annahme einer (näherungsweise im Erfassungsbereich) ebenen Fahrbahn hier nicht zu, insbesondere aufgrund häufiger

¹ Diese Stufe der Automatisierung erfordert eine Systemrealisierung entsprechend Stufe 5 nach SAE J3016.

² Weitere Details zu diesen Aspekten automatisierter Fahrfunktionen sind in den Kapiteln von Maurer u. a. (2015) ausführlich dargelegt.

³ Neben technischen Herausforderungen ergeben sich durch die Einführung automatisierter Fahrzeuge ebenfalls rechtliche und gesellschaftliche Fragestellungen wie Zulassungs- und Absicherungsfragen.

Nick- und Wankbewegungen durch Lastwechsel des Fahrzeugs sowie unebener Fahrbahnen. Überhängende Strukturen wie Schilderbrücken oder Bäume, aber beispielsweise auch geöffnete Türen von Fahrzeugen oder überstehende Ladung erfordern eine detaillierte Modellierung in drei Dimensionen. Auch abseits dieser Aspekte ist die Umfeldwahrnehmung in urbanen Gebieten eine noch nicht gelöste Herausforderung. Die hohe Verkehrsdichte kombiniert mit unterschiedlichen Typen von Verkehrsteilnehmern und Bewegungsrichtungen erfordert eine effiziente Repräsentation des beweglichen Umfelds. Diese muss in der Lage sein, teilweise verdeckte Umfeldelemente korrekt zu berücksichtigen. Das stationäre Umfeld ist heterogen bezüglich der anzutreffenden Fahrstreifengeometrien und -begrenzungen. Die Randbebauung kann aus unterschiedlichsten Elementen wie Häuserfassaden oder Vegetation bestehen.

Laserbasierte Sensorik zur dreidimensionalen Erfassung des Umfelds ist spätestens seit der DARPA Urban Challenge im Jahre 2007 einem größeren Publikum bekannt. Die schrittweise und in Realzeit ausführbare Verarbeitung der von einem solchen Sensorsystem generierten Datenmengen stellt jedoch nach wie vor eine Herausforderung dar, insbesondere dann, wenn die Umfeldwahrnehmung als Teil eines *bordautonomen* Gesamtsystems sämtliche relevanten Merkmale der Umgebung ohne die Nutzung externer Datenquellen wahrnehmen soll.

Den Herausforderungen einer automatisierten Fahrt im öffentlichen städtischen Verkehrsraum widmet sich seit dem Jahre 2008 das Projekt *Stadtpilot* der Technischen Universität Braunschweig, in dessen Rahmen sich auch die vorliegende Arbeit einordnet. Die ausgewählte Route ist der innere Braunschweiger Stadtring, eine mehrstreifige Hauptverkehrsstraße von insgesamt rund 11 km Länge. Diese Route ist gekennzeichnet durch hohes Verkehrsaufkommen unterschiedlichster Verkehrsteilnehmer und wird durch eine Vielzahl von Verkehrsknotenpunkten unterbrochen. Die Randbebauung der Strecke ist geprägt durch unterschiedliche Strukturen wie Bordsteine und Häuserfassaden, aber auch durch Bereiche mit Vegetation und über die Fahrbahn ragenden Ästen und Schilderbrücken. Teilweise bilden auch Parkstreifen die Begrenzung zwischen Fahrbahn und Bürgersteig. Entsprechend typischer Verkehrsführungen in urbanen Bereichen beinhalten die betrachteten Straßen eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrstreifenmarkierungen sowie Fahrstreifenaufteilungen und -zusammenführungen. Die Fahrbahnen befinden sich dabei nicht durchgängig auf gleichem Höhenniveau. Das Versuchsfahrzeug muss in der Lage sein, sich in diesem Umfeld und angepasst an den Verkehrsfluss zu bewegen und die vorgegebene Route zu absolvieren. Dies beinhaltet das Folgen des eigenen Fahrstreifens und der vorausfahrenden Fahrzeuge, aber auch die Berücksichtigung von Lichtsignalanlagen und die Durchführung von Abbiegevorgängen durch entgegenkommenden Verkehr. Das Erreichen des Missionsziels kann ebenfalls automatisierte Fahrstreifenwechsel erfordern. Die beschriebenen Aspekte verdeutlichen die Herausforderungen, welche sowohl die Umfeldwahrnehmung als auch die Lokalisierung und Verhaltensplanung bewältigen können müssen.

Diese Arbeit adressiert den Bereich der Umfeldwahrnehmung auf Basis laserbasierter Sensorik. Sie beschreibt die Konzeption, Entwicklung und anschließende Bewertung eines Systems für den realen Fahrbetrieb im Rahmen des Projekts. Insbesondere der Realbetrieb impliziert hier zusätzliche Anforderungen bezüglich der einzuhaltenden Ausführungszei-

ten, um basierend auf den Resultaten der Umfeldwahrnehmung die Fahraufgabe erfüllen zu können. Es wird ein Gesamtsystem beschrieben, welches sowohl die stationären als auch die beweglichen Bestandteile des Fahrzeugumfelds erfasst, in einem internen Modell repräsentiert und den nachgelagerten Modulen zur Verfügung stellt.

1.1 Beitrag und Methodik der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein strukturiertes Vorgehen für die Konzeption, eine ausführliche Erläuterung der Umsetzung sowie die abschließende Bewertung eines Wahrnehmungssystems für den gegebenen Anwendungsfall. Hierbei wird ein hochauflösendes⁴ laserbasiertes Sensorsystem der Firma Velodyne LiDAR, Inc. (im Folgenden Velodyne) als primärer Sensor eingesetzt. Der eigene wissenschaftliche Beitrag in diesem Bereich wird im Folgenden in Form von Forschungsfragestellungen motiviert. Außerdem erfolgt eine Abgrenzung des Inhalts zu weiteren und verwandten Themenfeldern.

1.1.1 Adressierte Fragestellungen und wissenschaftlicher Beitrag

Die Umfeldwahrnehmung für automatisierte Straßenfahrzeuge ist ein in der universitären wie industriellen Forschung intensiv bearbeitetes Themenfeld. Es existiert eine Vielzahl von Ansätzen und Verfahren für unterschiedliche aktive und passive Sensorsysteme, um aus Sensor-Rohdaten eine Repräsentation des Umfelds zu erzeugen. Die vorliegende Arbeit erhebt nicht den Anspruch, diesen Stand der Forschung und Technik in allen Aspekten zu erweitern. Die Literatur präsentiert mehrheitlich Ansätze und Lösungen für spezifische Detailprobleme dieses Themenfelds. Auch der Einsatz hochauflösender Lasersensorik stellt für sich genommen kein Novum dar. Seit der DARPA Urban Challenge erfreut sich diese Sensor-Technologie zunehmender Beliebtheit, auch aufgrund gestiegener Datenverfügbarkeit durch veröffentlichte Datensätze (siehe auch Abschnitt 9.3).

Der Anspruch der vorliegenden Arbeit ist es stattdessen, den Entwurf, die Entwicklung und die abschließende Bewertung eines Systems zur Umfeldwahrnehmung mit Blick auf ein Gesamtsystem zu betrachten. Diesem Anspruch entsprechend werden die eigenen Beiträge anhand eines Gesamtsystems beschrieben. Dieser gesamtheitliche Blick auf die erforderlichen Funktionalitäten der Umfeldwahrnehmung wird bisher nur in wenigen Veröffentlichungen adressiert.

Aufgrund des hohen Datenaufkommens stellt der Einsatz hochauflösender Lasersensorik Anforderungen an die Laufzeit-Effizienz der einsetzbaren Algorithmen. Zwar wird in der Literatur eine Vielzahl von Verfahren zur Lösung der jeweiligen Teilaufgaben des Gesamtsystems vorgestellt, der Aspekt der effizienten Ausführungszeit im Realbetrieb und als Teil des Gesamtsystems *automatisiertes Fahrzeug* spielt jedoch häufig nur eine untergeordnete Rolle und wird in solchen Fällen zumeist auch nur komponentenweise betrachtet. Der Blick auf das Gesamtsystem ermöglicht hier tieferegehende Betrachtungen. Hieraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

⁴ Eine Erläuterung dessen, was in dieser Arbeit als *hochauflösend* aufgefasst wird, erfolgt in Abschnitt 4.2.

Forschungsfragestellung 1:

Wie kann eine Informationsverarbeitungs- und Datenflussstruktur eines Wahrnehmungssystems gestaltet werden, welches auf Grundlage hochauflösender Lasersensorik ein dreidimensionales Fahrzeugumfeld repräsentiert?

Diese Fragestellung ist zunächst allgemein formuliert, impliziert jedoch eine Reihe untergeordneter Themenfelder, deren Beantwortung sich Teil I dieser Arbeit widmet. Zunächst ergibt sich die Frage nach den erforderlichen zu repräsentierenden Elementen des Fahrzeugumfelds. Deren Festlegung gestaltet sich im Allgemeinen schwierig, insbesondere bei nur vage beschriebenen Anwendungsszenarien des zu realisierenden Systems. Als Ansatz für eine Strukturierung wird hier das Konzept der *Fertigkeitengraphen* nach den Arbeiten von Reschka (2017) und Reschka u. a. (2015a) verwendet, um aus einer textuell vorliegenden Beschreibung der Anwendungsszenarien (*funktionale Szenarien* nach Bagschik u. a. (2017)) des Projekts *Stadtpilot* eine Grobstruktur von erforderlichen Teilaufgaben und deren Abhängigkeiten untereinander abzuleiten und somit folgende Frage zu beantworten:

Forschungsfragestellung 2:

Welche Elemente eines dreidimensionalen Umfelds im urbanen Raum müssen für die Realisierung einer gegebenen Fahrfunktion repräsentiert werden? Wie lassen sich diese Elemente strukturieren?

Neben der Art der Elemente ist auch die Form ihrer Repräsentation innerhalb des Systems ein wesentlicher Punkt:

Forschungsfragestellung 3:

Welche Formen der Modellierung und Repräsentation sind erforderlich, um die relevanten Elemente des Fahrzeugumfelds innerhalb des Systems repräsentieren zu können?

Zusammen mit einer Übersicht über den Stand der Forschung im Bereich der Umfeldmodellierung wird der Aspekt der Ausführbarkeit in Realzeit betrachtet:

Forschungsfragestellung 4:

Welche Modellierungsformen sind erforderlich und geeignet, um die vom Wahrnehmungssystem geforderten Aufgaben laufzeiteffizient realisieren zu können?

Forschungsfragestellung 5:

Welche Annahmen und Voraussetzungen werden durch diese Modellierungsformen getroffen? Welchen Einfluss haben diese Faktoren auf die Leistungsfähigkeit und die Ausführbarkeit der Algorithmen im realen Fahrzeugbetrieb?

Die Ergebnisse dieser Fragestellungen münden in einem Systementwurf zur laufzeiteffizienten Repräsentation der relevanten Elemente des Fahrzeugumfelds. Ausgehend von diesem Entwurf befasst sich Teil II mit der konkreten Realisierung dieses Entwurfs. Neben oben genannten Forschungsfragen zur Laufzeiteffizienz ergeben sich speziell durch die Anforderung einer dreidimensionalen Umfeldwahrnehmung sowie Charakteristika der eingesetzten Sensor-Gattung weitere Aspekte, welche in den folgenden drei Fragestellungen formuliert sind. Eine dreidimensionale Repräsentation im urbanen Bereich muss in der Lage sein, sich wechselnden vertikalen Verläufen der Straßenoberfläche anpassen zu können. Dies betrifft einerseits unebene und sich auf unterschiedlichen Höhenniveaus befindliche Straßenverläufe, aber auch die Beeinflussung durch Nick- und Wankbewegungen

des eigenen Fahrzeugs. Eine zur Bodenoberfläche relative Repräsentation von Umgebungselementen hat hier den Vorteil, unabhängig von obigen Einflüssen zu sein und somit eine stabile Wahrnehmung zu ermöglichen:

Forschungsfragestellung 6:

Wie kann eine Repräsentation der befahrbaren Oberfläche um das eigene Fahrzeug gestaltet sein und wie kann diese genutzt werden, um eine bodenrelative Repräsentation der Umgebung aufzubauen?

Insbesondere das urbane Umfeld ist durch ein hohes Maß an Verdeckung durch andere Verkehrsteilnehmer und stationäre Bebauung charakterisiert. Beides sind für die Realisierung einer Fahrfunktion relevante Aspekte, welche bisher nur wenig Beachtung finden. Auch die explizite Schätzung des befahrbaren Bereichs ist zumindest für laserbasierte Sensorik nur rudimentär berücksichtigt. Beides wird in dieser Arbeit unter dem Aspekt der expliziten Befahrbarkeitsschätzung behandelt:

Forschungsfragestellung 7:

Wie können im urbanen Umfeld auftretende Verdeckungen von Umgebungselementen in der Umfeldmodellierung berücksichtigt werden? Wie können insbesondere aktuell befahrbare Bereiche und nicht beobachtbare Bereiche explizit repräsentiert werden?

Speziell bei Sensorik, welche keine Momentaufnahme der Umgebung innerhalb ihres Erfassungsbereichs erzeugt, sondern letzteren inkrementell abtastet, wie dies bei allgemein als *Laser-Scanner* bezeichneten Sensor-Systemen der Fall ist, entstehen zeitlich ausgedehnte Punktwolken. Die zeitliche Verteilung der Messpunkte muss für eine korrekte Repräsentation des Umfelds mit berücksichtigt werden, um Verzerrungen aufgrund von Fahrzeugeigenbewegung sowie den Bewegungen der erfassten Umfeldelemente zu vermeiden. Während dies für stationäre Teile der Umgebung bereits zum Stand der Forschung gehört, wird der Einfluss sich bewegendere Elemente bisher kaum berücksichtigt.

Forschungsfragestellung 8:

Wie können die entstehenden zeitlichen Verläufe inkrementell messender Lasersensorik lauffeffizient berücksichtigt werden, insbesondere bei der Verfolgung sich bewegendere Elemente?

Nach Vorstellung eines konkreten Wahrnehmungssystems befasst sich Teil III mit dessen Bewertung. Hierbei steht folgende Frage im Fokus:

Forschungsfragestellung 9:

Wie lässt sich die Leistungsfähigkeit eines Wahrnehmungssystems bewerten? Welche Bewertungsansätze sind nutzbar und wie ist ihr Aussagegehalt für die Bewertung hinsichtlich konkreter Fahraufgaben?

Neben der Frage der Metriken wird hier auch die Frage der Referenzdaten sowie der Repräsentativität der Ergebnisse diskutiert. Außerdem erfolgt neben einer allgemeinen Bewertung der Wahrnehmungsleistung auch die Berücksichtigung von Ansätzen für eine Bewertung hinsichtlich konkreter Anforderungen seitens der aktuell verfügbaren Fahrfunktion innerhalb des Projekts.

1.1.2 Abgrenzung und nicht adressierte Themenkomplexe

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein umfassendes System für die Wahrnehmung der Fahrzeugumgebung. Trotz des Ansatzes eines Gesamtsystems kann in dieser Arbeit keine vollständige Lösung für alle Facetten der Umfeldwahrnehmung gegeben werden. Zur Eingrenzung werden daher ausgewählte Schwerpunkte gesetzt. Diese umfassen die Modellierung stationärer und beweglicher Umgebungsmerkmale, soweit sie durch das Messprinzip des vorliegenden Sensorsystems wahrnehmbar sind. Insbesondere werden folgende Themenkomplexe von einer Betrachtung in dieser Arbeit ausgeschlossen:

Multi-Sensor-Fusion In der vorliegenden Arbeit wird ein hochauflösender laserbasierter Sensor als einziges Sensor-System zur Umfelderkennung verwendet. Es erfolgt keine Fusion mit weiterer Umfeldsensorik. Insbesondere werden Aspekte der temporalen Synchronisation solcher Sensorik hier außer Acht gelassen. Dies wird beispielsweise von Muntzinger (2011) ausführlich betrachtet.

Simultane Lokalisierung und Kartierung Die vorliegende Arbeit nimmt die aktuelle Pose des Eigenfahrzeugs als bekannt und verfügbar für die Verarbeitung an. Es werden keine Ansätze für eine simultane Lokalisierung und Kartierung (engl. *Simultaneous Localization And Mapping*, SLAM) entwickelt oder bestehende Systeme berücksichtigt.

Nutzung von a-priori-Informationen Die Umfeldwahrnehmung nutzt keine a-priori dem System bekannten Informationen über die Umgebung oder eine satellitengestützte Lokalisierung. Sämtliche Aspekte werden rein auf Grundlage bordeigener Sensorik modelliert.

Fahrbahnmarkierungen Auch wenn durch laserbasierte Sensorik prinzipiell erfassbar, wird in der vorliegenden Arbeit keine Detektion von Fahrbahnmarkierungen, beispielsweise Fahrstreifenbegrenzungen, Richtungspfeilen oder Haltelinien, durchgeführt. Ein hierfür einsetzbares Gittermodell zur Generierung einer textuellen Beschreibung der Fahrbahnoberfläche wird im Kontext der noch zu erläuternden gitterbasierten Fusion aufgebaut (siehe Abschnitt 7.4.2), es werden in dieser Arbeit jedoch keine Algorithmen zur Extraktion von Merkmalen basierend auf diesem Modell vorgestellt. Einige Ansätze hierfür finden sich beispielsweise in den Arbeiten von Matthaei (2015, Kapitel 11, Seite 101 ff.) oder auch in Homm u. a. (2011) und Kammel & Pitzer (2008).

Selbstrepräsentation und -wahrnehmung Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Umfeldwahrnehmung ausgehend von einem nominellen Leistungszustand des Systems. Es wird keine tiefergehende Selbstrepräsentation und -wahrnehmung des eigenen Fahrzeugs und seiner aktuellen Leistungsfähigkeit durchgeführt. Zwar fällt die Modellierung von Verdeckungsbereichen in den Bereich der Repräsentation des eigenen Leistungsvermögens, ebenso wie die Berücksichtigung von nicht vorhandenen Messungen in der expliziten Befahrbarkeitsschätzung (vgl. Abschnitt 7.4.3) oder fehlenden Kanälen bei der gitterbasierten Modellierung (vgl. Abschnitt 7.4.1). Es wird jedoch keine explizite Überführung in eine Selbstdarstellung als Grundlage weiterer Verhaltensentscheidungen betrachtet.

Einsatz maschineller Lernverfahren Im Rahmen der vorliegenden Arbeiten kommen keine Ansätze zum Einsatz, welche auf maschinellen Lernverfahren wie Künstlichen Neuronalen Netzen basieren. Zwar liefern diese Ansätze vielversprechende Ergebnisse bei der Klassifikation von Punktwolken und auch zur zeitlichen Verfolgung von Ele-

menten (vgl. Braun u. a. (2016), Zhou & Tuzel (2017), auch eigene betreute Arbeiten beispielsweise von Plachetka (2017) und Plachetka u. a. (2018)), werden im aktuellen Stand jedoch als nicht laufzeiteffizient genug für einen Einsatz im realen Fahrzeug angesehen. Ansätze dieser Art können jedoch als teilweiser oder gegebenenfalls auch vollständiger Ersatz der vorgestellten Algorithmen zu späteren Zeitpunkten eingesetzt werden.

1.1.3 Bemerkungen zum Stand der Forschung

Insbesondere durch das aktuell hohe kommerzielle Interesse an der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen sind nicht sämtliche Ansätze zur Umfeldwahrnehmung mit hochauflösender Lasersensorik in Form wissenschaftlicher Arbeiten öffentlich verfügbar. So ist aus Pressemitteilungen und anderen Medien entnehmbar, dass hochauflösende Lasersensorik beispielsweise auch bei *Waymo* (Waymo, 2017, Seite 14), *Uber*⁵, *Torc*⁶ und *Ford*⁷ zum Einsatz kommt. Details über die verwendeten Verfahren sind zum aktuellen Zeitpunkt jedoch nicht verfügbar. Auch wenn die von kommerziellen Entwicklern gezeigten Resultate vielversprechend wirken, können sie in Ermangelung weiterführender Details im betrachteten Stand der Forschung und Technik dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

1.2 Struktur der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in die drei Themenbereiche der Systemkonzeption, Systemrealisierung und Systembewertung. Der Aufbau ist in Abbildung 1.1 gezeigt und wird im Folgenden erläutert.

Teil I: Systemkonzeption Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit ist das Projekt *Stadtplot*, welches in Kapitel 2 vorgestellt wird. Basierend auf einer Beschreibung der Anwendungsszenarien in textueller Form wird in Kapitel 3 das Konzept der Fertigkeitengraphen eingesetzt, um für die Erfüllung der projektspezifischen Fahraufgabe erforderliche Wahrnehmungsfertigkeiten abzuleiten und Abhängigkeiten zwischen diesen zu bestimmen. Die Ergebnisse dieses Schrittes dienen als Grobstruktur des nachfolgenden Systementwurfs. Dieser wird in Kapitel 4 durchgeführt und folgt einer ausführlichen Literaturrecherche zu Ansätzen der Umfeldmodellierung im Allgemeinen sowie zu besonderen Anforderungen bei der Verarbeitung von Daten hochauflösender Lasersensorik im Speziellen. Als Ergebnis liegt ein Gesamtkonzept des Wahrnehmungssystems vor.

Teil II: Systemrealisierung Auf Grundlage des abgeleiteten Konzepts wird dessen Umsetzung auf algorithmischer Basis beschrieben. Nach Vorstellung relevanter Grundlagen zur Sensorik und Definition des eingesetzten Punktwolken-Datenformats in Kapitel 5 werden in Kapitel 6 die erforderlichen Schritte der Punktwolken-Vorverarbeitung beschrieben. Diese dienen der Generierung von Merkmalen für nachgelagerte Filterschritte. Teil der

⁵ <https://www.therobotreport.com/how-uber-self-driving-cars-see-world/>, Artikel vom 19. März 2018

⁶ https://torc.ai/press_releases/torc-robotics-nxp-partner-advance-self-driving-car-technology/, Artikel vom 27. August 2017

⁷ <https://arstechnica.com/cars/2015/08/face-to-face-with-fords-self-driving-fusion-hybrid-research-vehicles/>, Artikel vom 6. August 2015

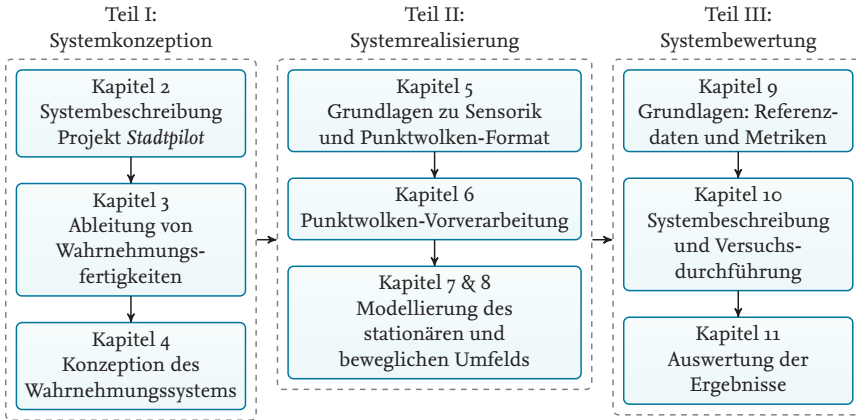


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

Filterschritte sind die Detektion der Bodenoberfläche und entsprechende Klassifikation der Messdaten (Abschnitt 6.1), die Detektion bodennaher Strukturen (Abschnitt 6.2) sowie eine Kompression und Segmentierung der Punktmenge (Abschnitte 6.3 und 6.4). Abschließend erläutert Abschnitt 6.5 einen Ansatz zur Beweglichkeitsschätzung. Diese dient der Zuordnung der Ergebnisse der Vorverarbeitung zu den nachgelagerten Repräsentationsformen für stationäre und bewegliche Elemente.

Ausgehend von dieser Klassifikation werden in Kapitel 7 gitterbasierte Verfahren zur Abbildung unterschiedlicher stationärer Umgebungsmerkmale erläutert und die Weiterentwicklung eines Ansatzes zur Merkmals-Fusion nach Matthaer u. a. (2014b) vorgestellt. Kapitel 8 beschreibt die gewählte Realisierung zur zeitlichen Filterung und Plausibilisierung von beweglichen Elementen unter Berücksichtigung des inkrementellen Arbeitsprinzips rotierender Lasersensorik sowie von Ansätzen zur Modellierung von Verdeckungen.

Teil III: Systembewertung Nach Umsetzung des Systems wird dieses hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit bewertet. Hierfür wird in Kapitel 9 zunächst ein Überblick über den Stand der Forschung im Bereich der Referenzdatengewinnung, die Nutzung vorhandener Datensätze sowie nutzbarer Metriken für einen objektiven Vergleich der Ergebnisse gegeben. Kapitel 10 beschreibt darauf aufbauend das gewählte Vorgehen bei der Bewertung des hier entwickelten Wahrnehmungssystems. Es werden eine szenarienbasierte Bewertungsstrategie vorgestellt sowie einige übergeordnete Aspekte betrachtet. Die genutzten Referenzdatenquellen werden vorgestellt und die Auswahl der verwendeten Metriken begründet. Nach Festlegung der Bewertungskriterien wird schließlich in Kapitel 11 ein Überblick über die Ergebnisse dieser Auswertung gegeben.

Die Arbeit schließt mit einer Betrachtung des Geleisteten, noch offener Fragestellungen sowie einem Überblick über weitere Arbeitsfelder in diesem Bereich in Kapitel 12.

1.3 Verwendete Terminologie

Die vorliegende Arbeit bedient sich in weiten Teilen der im Bereich der Umfeldwahrnehmung etablierten Terminologie. Dennoch sind einige Begriffe in der Literatur mehrdeutig belegt. Im folgenden Abschnitt wird daher eine Definition der fraglichen Begriffe gegeben, wie sie in dieser Arbeit Verwendung finden.

1.3.1 Szene, Situation, Szenario und damit zusammenhängende Begriffe

Als Teil der Entwicklung einer funktionalen Systemarchitektur für automatisierte Fahrzeuge in den Arbeiten von Matthaei & Maurer (2015) war eine eindeutige Bezeichnung der Schnittstellen zwischen den funktionalen Komponenten erforderlich. Insbesondere die Begriffe der *Szene* und der *Situation* sind in diesem Zusammenhang relevant, da sie die Schnittstelle zwischen den Domänen der Umfeldwahrnehmung und der Verhaltensplanung betreffen. Im Folgenden werden die auch innerhalb des Projekts *Stadtпилot* eingesetzten Definitionen basierend auf Ulbrich u. a. (2015a) (bzw. Ulbrich u. a. (2015b) als Übersetzung dieser Quelle ins Deutsche) verwendet. Reschka (2017, Seite 59) führt an, dass in der ursprünglichen Definition einer Szene nach Ulbrich u. a. (2015b) diese die Begriffe *dynamisch* und *beweglich* gleichsetzen, was begrifflich nicht ausreichend differenzierend formuliert und im Widerspruch zur weiter unten gegebenen Definition dieser beiden Begriffe steht. Er korrigiert die Definition wie folgt:

Definition 1.1: **Szene**

„Eine Szene beschreibt eine Momentaufnahme des Umfelds, welche die beweglichen und unbeweglichen Elemente des Umfelds, die Selbstrepräsentation aller Akteure und Beobachter und die Verknüpfung dieser Entitäten umfasst. Einzig eine Szenenrepräsentation in einer simulierten Welt kann allumfassend sein (objektive Szene). In der realen Welt ist sie immer unvollständig, fehlerbehaftet, unsicherheitsbehaftet und aus der Perspektive eines oder mehrerer Beobachter (subjektive Szene).“

(Reschka, 2017, Kapitel 2.2, Seite 59)

Eine Szene ist damit eine Darstellung des Fahrzeugs und seiner Umgebung zu einem definierten Zeitpunkt. Reschka nutzt in obiger Definition den Begriff des *unbeweglichen* Elements, welches gleichbedeutend mit der Definition eines *stationären* Elements (s. u.) ist. Dessen Gesamtheit wird von Ulbrich u. a. (2015b) als *Szenerie* bezeichnet:

Definition 1.2: **Szenerie**

Als Szenerie werden sämtliche räumlich stationären Elemente einer Szene verstanden. (sinngemäß nach Ulbrich u. a. (2015b, Kapitel 3, Seite 108))

Dies umfasst beispielsweise das Fahrstreifenetz, stationäre Elemente wie die Randbebauung und Vegetation, aber auch die Verkehrsleitinfrastruktur wie Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen. Letztere werden bei dieser Definition ebenso als Teil der Szenerie verstanden wie Wechselverkehrszeichen, da sie zwar ihren Zustand über die Zeit ändern können, ihre Positionen jedoch räumlich konstant sind. Teil der Szenerie sind außerdem Umweltbedingungen, da sich diese verglichen mit dem Zeithorizont typischerweise betrachteteter zeitlicher Entwicklungen (Szenarien, s. u.) nur unwesentlich ändern.

Während die Szene zunächst unabhängig von der zu realisierenden Fahrfunktion ist, wird im Verlauf der Verhaltensgenerierung des automatisierten Fahrzeugs eine ziele- und werthespezifische Augmentierung vorgenommen. Dies können nach Ulbrich u. a. (2015b) sowohl permanente (z. B. regulatorische Vorgaben) als auch während der Fahrmission veränderliche Größen (z. B. die aktuelle Mission oder Benutzereingaben) sein. Einerseits wird die Szene, welche hierfür die Ausgangsbasis bildet, auf für die aktuelle Aufgabe relevante Merkmale reduziert, andererseits um funktionspezifische Aspekte ergänzt. Die resultierende Darstellung wird als *Situation* bezeichnet. Sie hat für die weiteren Diskussionen in dieser Arbeit zunächst eine untergeordnete Bedeutung, wird jedoch relevant bei der Systembewertung hinsichtlich missionspezifischer Aspekte (vgl. Abschnitt 10.2).

Definition 1.3: **Situation**

„Eine Situation beschreibt die Gesamtheit der Umstände, die für die Auswahl geeigneter Verhaltensmuster zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berücksichtigen sind. Eine Situation wird aus der Szene durch einen Prozess der Informationsauswahl und -augmentierung abgeleitet, basierend auf transienten (z. B. missionspezifischen [sic]) wie auch permanenten Zielen und Werten. Folglich ist eine Situation immer subjektiv, indem sie die Sicht eines Elements repräsentiert.“ (Reschka, 2017, Kapitel 2.2, Seite 62)

Gegenüber einer Szene, welche lediglich eine zeitliche Momentaufnahme beschreibt, ergibt die Kombination mehrerer zeitlich aufeinanderfolgender Szenen ein *Szenario*. Für diese Arbeit wird die Definition nach (Reschka, 2017) verwendet:

Definition 1.4: **Szenario**

„Ein Szenario beschreibt die zeitliche Entwicklung von Szenenelementen innerhalb einer Folge von Szenen, welche mit einer Startszene beginnt. Aktionen und Ereignisse ebenso wie Ziele und Werte können spezifiziert werden, um diese zeitliche Entwicklung in einem Szenario festzulegen. Im Gegensatz zu Szenen decken Szenarien eine gewisse Zeitspanne ab.“ (Reschka, 2017, Kapitel 2.2, Seite 57)

1.3.2 Beweglichkeit und damit zusammenhängende Begriffe

Hinsichtlich der Beschreibung von aktuell wahrgenommener Bewegung und der grundsätzlichen Befähigung hierzu wird die Definition auf Grundlage von Matthaei u. a. (2011a) verwendet und erweitert. Diese definieren die Eigenschaften *beweglich*, *stationär*, *statisch* und *dynamisch*. Hierbei bezeichnen die Begriffe *statisch* und *dynamisch* den *aktuellen* Bewegungszustand. Dem gegenüber berücksichtigen die Begriffe *beweglich* und *stationär* explizit die Historie des betrachteten Elements. In Ergänzung zu Matthaei u. a. (2011a) wird dies um die prinzipielle Befähigung eines Elements zu einer Bewegung *aus eigenem Antrieb*⁸ ergänzt.

⁸ Diese Eigenschaft bezieht sich auf die Befähigung eines Elements, Bewegungen ohne die Einwirkung externer Kräfte auszuführen und ist in der Regel verknüpft mit seinem Typ. Beispiel hierfür ist ein parkendes Fahrzeug, welches ebenfalls dem beweglichen Umfeld zuzuordnen ist. Hiervon abzugrenzen ist beispielsweise eine umher wehende Mülltüte. Diese ist zwar ebenfalls *beweglich*, jedoch aufgrund der beobachteten Bewegung, nicht aufgrund ihres Typs.