

Generierung hochdetaillierter Karten für das automatisierte Fahren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Fabian Poggenhans

Tag der mündlichen Prüfung: 12.09.2019
Referent: Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller
Korreferent: Apl. Prof. Dr.-Ing. Claus Brenner

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons “Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International” Lizenz.



Kurzfassung

Karten sind für das automatisierte Fahren unverzichtbar. Sie stellen eine zusätzliche Sicherheitsebene dar, die gewährleistet, dass ein automatisiertes Fahrzeug die wahrgenommene Umgebung richtig interpretiert. Viele der zu beachtenden Regeln im Straßenverkehr sind darüber hinaus für solche Systeme schwer zu interpretieren. Von geübten Autofahrern werden sie jedoch intuitiv verstanden. Beispielsweise erfassen sie zuverlässig, was für das korrekte Abbiegen auf einer komplexen Kreuzung beachtet werden muss, welche Vorfahrtsregeln beachtet werden müssen und welche Verkehrsregeln dabei für andere beteiligte Verkehrsteilnehmer gelten.

Während der Fahrt muss eine zeitkritische Entscheidung aufgrund einer beschränkten Informationsbasis getroffen werden. Die Kartenerzeugung geschieht dagegen auf Basis einer deutlich besseren Informationslage und ist zeitlich nicht eingeschränkt. Das komplexe Interpretationsproblem bleibt allerdings bestehen. Dies ist ein Grund, warum hierfür bislang ein erheblicher personeller Aufwand erforderlich ist, der es zurzeit unmöglich macht, flächendeckend die dringend benötigten hochdetaillierten Karten zu erzeugen und aktuell zu halten.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Methoden zu entwickeln, mit denen sich die Generierung der Karten soweit wie möglich automatisieren lässt. Dazu wird zunächst die Frage geklärt, welche Informationen mit heutiger Sensorik überhaupt zuverlässig beobachtet werden können. Darauf aufbauend wird untersucht, welche Karteninformationen für ein automatisiertes Fahrzeug überhaupt benötigt werden und wie diese auf der Grundlage des Verkehrsrechts zu interpretieren sind. Auf dieser Basis werden Verfahren vorgestellt, mit denen durch Fahrzeugsensorik beobachtete und um Fehldetektionen bereinigte Informationen für die Erstellung einer solchen Karte interpretiert werden können. Die Verfahren kombinieren Wissen über die geometrische Lage der Beobachtungen zueinander mit einer aus den Verkehrsregeln motivierten Regelbasis, um iterativ die unbekannteren Kartenregionen zu erschließen. So können auch komplexe, mehrstreifige Kreuzungen und durch Verkehrszeichen und Ampeln ausgedrückte Verkehrsregeln verstanden werden.

Das vorgestellte Verfahren wird anhand einer umfangreichen Kartenbasis evaluiert, welche mit 102 km Straßenlänge und etwa 250 Kreuzungen einen größeren Teil des *Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg* in der Region Karlsruhe umfasst. Dabei zeigt sich das Verfahren durchaus in der Lage, komplexe reale Szenarien zu bewältigen und dabei gegebenenfalls Konflikte und Widersprüche in den Eingangsdaten aufzuzeigen.

Danksagung

Eigentlich hatte ich vor diesem Kapitel immer den größten Respekt. Aber jetzt, da nun alle anderen Kapitel hinter mir liegen und die Abgabe bevorsteht, erscheint es mir gerade wie die leichteste Übung. Es ist so befreiend, in der ersten Person zu schreiben.

Es sind anstrengende Monate gewesen und der vor mir liegende Text ist ein größerer Brocken geworden, als ich es erwartet hatte. Aber ich bin stolz auf ihn und freue mich darüber, dass ich ihn geschrieben habe. Es würde mich noch mehr freuen, nicht der einzige zu sein, der das so sieht.

Ich danke meinem Hauptreferenten Prof. Christoph Stiller, in dessen Forschungsgruppe am FZI Forschungszentrum Informatik diese Arbeit entstand, für die Möglichkeit, an diesem Thema zu arbeiten und es ohne Zeitdruck nach meinen eigenen Vorstellungen zu gestalten. Das ist eine Freiheit, die ich sehr zu schätzen weiß. Natürlich danke ich auch Prof. Claus Brenner für die Übernahme des Korreferats. Ich hoffe, er weiß, worauf er sich eingelassen hat. Meine Korrekturleser wissen es bereits genauer. Ihnen danke ich für ihr Durchhaltevermögen und seitenweise Anmerkungen. Und das trotz aller Paper-Deadlines.

Und damit bleibt mir jetzt noch, allen zu danken, die indirekt dazu beigetragen haben, dass ich diese Danksagung jetzt schreiben kann. Der Mensa für die Aufrechterhaltung der Nahrungszufuhr, dem Hersteller unserer Whiteboards für jetzt für immer verewigte Skizzen und Entwürfe, meinen Kollegen für die in so vielen Diskussionen geraubte und zugleich geschenkte Zeit, meinem Cello für die Nachsicht meiner schmählichen Vernachlässigung und meiner Familie und meinen Freunden für die viele erduldeten Abwesenheit.

Und zuletzt danke ich Linda. Dafür, dass ich ihr nicht danken muss. Die Liste der Gründe hätte die Dissertation unhandlich gemacht.

Karlsruhe, im April 2019

Fabian Poggenhans

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Analyse des Problems	3
1.3	Ziele dieser Arbeit	6
2	Stand der Forschung	7
2.1	Kartenrepräsentation	7
2.2	Beobachtung von Karteninformation	9
2.3	Inferieren von Karteninformation	11
3	Karten für das automatisierte Fahren	17
3.1	Bestehende Arbeiten zu Anforderungen an Karten für automatisierte Fahrzeuge	17
3.2	Arten von Regeln und Beschränkungen im Straßenverkehr	18
3.3	Anwendungsbereiche für Karten	18
3.4	Anforderungen für Karten und Repräsentation	22
4	Straßengestaltung	25
4.1	Anwendbarkeit von Verkehrsregelwerken	25
4.2	Annahmen für die Straßengestaltung	31
4.3	Relevante Merkmale für die Kartierung	36
5	Inferieren von Fahrstreifen	39
5.1	Ein Iteratives Verfahren zur Inferenz von Fahrstreifen	39
5.2	Bestimmung von Straßenabschnitten und Kreuzungsflächen	43
5.3	Inferenz von Fahrstreifeninformation	50
6	Inferieren der Kreuzungstopologie	59
6.1	Lösungsansatz	59
6.2	Überblick über das Verfahren	61
6.3	Analyse der Kreuzungsgeometrie	62
6.4	Regelbasierte Lösung der Kreuzung	64
6.5	Bestimmung valider Pfade innerhalb der Kreuzungsgeometrie	69
7	Inferieren von Verkehrsregeln	77
7.1	Arten von Verkehrszeichen und Bedeutung für die Kartierung	77
7.2	Verfahren zur Inferenz der Verkehrsregeln	79
8	Evaluation	85
8.1	Implementierung	86
8.2	Datensatz	86

8.3	Evaluationsmethode	88
8.4	Ergebnisse und Diskussion	91
9	Schlussbetrachtung und Ausblick	101
	Literaturverzeichnis	103
	Eigene Veröffentlichungen	107

Begriffsverzeichnis

Fahrbahn	Fahrzeugen vorbehalten Teil der Straße.
Fahrbahnhypothese	Gruppe von Fahrstreifen, von denen angenommen wird, dass sie zusammen eine Fahrbahn bilden.
Fahrradwegmarkierung	Spezielle gestrichelte Markierungen, die zur Begrenzung von Fahrradwegen und Schutzstreifen verwendet werden.
Fahrstreifen	Exklusiv einem einzigen Fahrzeug vorbehalten Teil des Fahrbahnquerschnitts.
Fahrstreifengraph	Netzwerk, das aus den Beziehungen aufeinander folgender oder über Fahrstreifenwechsel erreichbarer Fahrstreifensegmente gebildet wird.
Fahrzeug	Gesamtheit motorisierter Fahrzeuge. Fahrräder werden in dieser Arbeit gesondert betrachtet.
Konfiguration	Mögliche (Teil-)Lösung für die Verknüpfung hineinführender Fahrstreifen einer Kreuzung mit herausführenden Fahrstreifen.
Korridor	Befahrbare Fläche innerhalb einer Kreuzung, die zwei an die Kreuzung angrenzende Fahrstreifen verbindet.
Kreuzungsarm	Gesamtheit der in die Kreuzung einmündenden Fahrbahnen, die von einem gemeinsamen Straßenabschnitt ausgehen.
Kreuzungsfläche	Für den Verkehr nutzbare Fläche einer Kreuzung.
Lanelet	Bezeichnung in <i>Lanelet2</i> für einen Fahrstreifenabschnitt, innerhalb dessen sich die Verkehrsregeln nicht ändern.
Liniensegment	Von zwei Punkten beschränkter Teil einer Geraden.
Physische Ebene	Ebene der Karte, die die beobachtbaren, regelgebenden Elemente einer Karte beinhaltet und global verortet.
Polygonzug	Offene Kette von miteinander verbundenen Liniensegmenten ohne Selbstüberschneidungen.
Regelgebende Elemente	Gesamtheit aller Straßenränder, Markierungen, Verkehrsschilder, welche Fahrzeuge im Straßenverkehr beeinflussen.
Regulatory Element	Bezeichnung in <i>Lanelet2</i> für eine verallgemeinerte Verkehrsregel, die auf einem Lanelet beachtet werden muss.
Richtungsbezeichnung	Bezeichnung für den Verlauf eines Fahrstreifens nach entweder links, rechts oder geradeaus.
Straßenabschnitt	Bereich der Straßenfläche zwischen zwei Kreuzungen.
Straßenfläche	Zusammenhängende, dem öffentlichen Verkehr zur Verfügung stehende Fläche.
Straßenrand	Gesamtheit der Ränder, welche die Verkehrsfläche einschränken: Asphaltgrenze, Wände, Leitplanken, etc.

Straßensegment	Unterteilung des Straßenverlaufs in einen Abschnitt mit unveränderlicher Anzahl von Verkehrstreifen.
Straßenverlauf	Zusammenhängende Kette von Straßenabschnitten über Kreuzungen hinweg.
Strecke	Zusammenhängende Kette von Fahrstreifen, die entweder an den Verlauf einer Vorfahrtsstraße oder den Straßenverlauf gebunden ist.
Verkehrstreifen	Überbegriff für einen Fahrstreifen, Radweg, Fußweg, Seitenstreifen oder Sperrfläche.
Verkehrstreifensegment	Teil eines Verkehrstreifens, der innerhalb eines Straßensegments liegt.
Zone	Regionen des Straßennetzes, in denen bestimmte Verkehrsregeln gültig sind, z.B. Innenstadt, Autobahn, Tempo-30-Zone.
Expliziter Fahrstreifen	Durch sichtbare Ränder begrenzter Fahrstreifen.
Impliziter Fahrstreifen	Fahrstreifen, der nicht durch sichtbare Ränder begrenzt ist, sondern dessen Verlauf sich aus dem Straßenverlauf ergibt.
Eventuelle Kreuzungsausfahrt	Kreuzungsarm, der mindestens einen eventuell herausführenden Fahrstreifen enthält.
Eventuelle Kreuzungszufahrt	Kreuzungsarm, der mindestens einen eventuell hineinführenden Fahrstreifen enthält.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Entwicklung und die beachtlichen Fortschritte, die in den letzten Jahren beim automatisierten Fahren erzielt worden sind, stützen sich schon von den frühen Anfängen an auch auf zunehmend genaueres Vorwissen über die statische Umgebung eines Fahrzeugs, Karten also. Für die Zukunft lässt sich bereits absehen, dass eigenständig fahrende, automatisierte Fahrzeuge in komplexen Szenarien, wie etwa Innenstädten, trotz aller Fortschritte für viele Jahre nicht ohne hochdetaillierte Karteninformation auskommen können. Hochdetaillierte Karten bezeichnet hierbei Karten, welche nicht oberflächliche Informationen, wie den Straßenverlauf beinhalten, sondern individuelle Fahrstreifenverläufe, Vorfahrtsregeln, Ampelposition sowie Informationen über das mögliche Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer und die von diesen zu berücksichtigenden Verkehrsregeln.

Ein offensichtlicher Grund für den Bedarf an solchen Karten ist, dass die Reichweite der Sensorik eines Fahrzeuges beschränkt ist und Verdeckungen die Wahrnehmung beeinträchtigen können. So kann durch verdeckte Verkehrsschilder vorenthaltene Information zur Folge haben, dass eine Straßenszene falsch interpretiert wird. Resultiert dies beispielsweise darin, dass ein Fahrzeug irrtümlicherweise auf die Gegenfahrbahn fährt, kann das fatale Konsequenzen haben. Jedoch ist nicht nur die Detektion relevanter Informationen ein Problem, auch deren Interpretation ist es. Wie eine Analyse des Stands der Technik in Kap. 2.2 zeigen wird, sind moderne Verfahren immer dann zunehmend unzuverlässig, wenn es darum geht, abstraktere Informationen oder deren Effekt auf das Fahrzeug zu inferieren. Auch die komplexe Wechselwirkung zwischen der Straßengestaltung und den darauf anzuwendenden Verkehrsregeln spielt hier eine Rolle.

Aus Studien geht hervor, dass auch menschlichen Fahrern hierbei regelmäßig Fehler unterlaufen (vgl. [BKFC07, Sta10]), weil sie die Verkehrssituation falsch wahrnehmen oder fehlinterpretieren. Einer repräsentativen Umfrage [For15] zufolge sind 36 % der deutschen Autofahrer bereits in die falsche Fahrtrichtung gefahren, davon geben 66 % fehlende Ortskenntnis als Mitursache an.

Bei menschlichen Fahrern erscheint es einleuchtend, dass sie sich mit besserer Kenntnis der Strecke sicherer verhalten, weil ihnen Vorfahrtssituationen, Streckenverläufe und Gefahrenstellen bereits bekannt sind und sie kritische Situationen besser vermeiden können. Sie haben sich gewissermaßen eine Art geistiges Abbild der Strecke erstellt, welches einer bestimmten Position in der Welt gesammeltes (Handlungs-)Wissen zuordnet. Das kommt der Definition einer Karte sehr nahe.

Vor diesem Hintergrund ist es nur folgerichtig, dass automatisierte Fahrzeuge einen ähnlichen Mechanismus beherrschen sollten, um gesammeltes Wissen über eine Strecke über mehrere Fahrten hinweg zu transportieren. Das klingt umso einleuchtender, da mit Sensoren ausgestattete Fahrzeuge dieses Wissen teilen und so gemeinsam davon profitieren können. So muss nicht jedes Fahrzeug erneut die für die Fahrt wichtigen Informationen über die Umgebung rekonstruieren, sondern kann auf die gemeinsame Karteninformation zurückgreifen.

Für automatisierte Fahrzeuge stellen Karten außerdem eine zusätzliche Sicherheitsebene dar, welche die Fehlinterpretation einer Straßenszene verhindert. Denn nicht nur das reine Erkennen des Umfelds eines Fahrzeugs ist



Abbildung 1.1: Situationen wie diese sind eine enorme Herausforderung für automatisierte Fahrzeuge. Um die Situation zu verstehen, müssen Fahrstreifen bestimmt, teilweise verdeckte Verkehrsschilder und Ampeln zugeordnet, sowie mögliche Pfade anderer Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger bestimmt werden.

wichtig, sondern auch dessen korrekte Interpretation: Was bedeutet ein bestimmtes Verkehrsschild für ein Fahrzeug und andere Fahrzeuge in der Umgebung? Ist es überhaupt relevant oder betrifft es einen anderen Fahrstreifen oder andere Gruppen von Verkehrsteilnehmern – beispielsweise Linienbusse?

Abb. 1.1 zeigt beispielhaft eine Kreuzung, die für ein Fahrzeug schwer zu interpretieren ist. Mehrere markierte Fahrstreifen enden, beziehungsweise beginnen an der Kreuzung, eine schraffierte Fläche sperrt den Verkehr, es gibt mehrere Ampeln, aber manche davon sind nur für Straßenbahnen oder Fußgänger gültig. Zudem regeln Schilder an den Inseln, die größtenteils durch andere Verkehrsteilnehmer verdeckt sind, die Zufahrt in die Straßenarme. Der mittlere Arm ist ihnen zufolge nicht befahrbar, sondern der Straßenbahn vorbehalten. Zusätzlich gibt es noch mehrere Fußgängerüberwege und Fahrradwege, die beachtet werden müssen, deren Markierungen aber kaum noch zu erkennen sind. Derartige Szenen finden sich in Innenstädten oft und stellen für automatisierte Fahrzeuge eine große Herausforderung dar, die ohne Karteninformationen kaum zu bewältigen ist.

Eine Karte vereinfacht aber nicht nur das Situationsverständnis eines Fahrzeugs. Sie ermöglicht auch einen angemessenen Umgang mit Gefahrensituationen, die nicht von vornherein als solche erkennbar sind. Beispielsweise können Stellen, an denen mit querenden Fußgängern zu rechnen ist, markiert werden. Auch das rechtzeitige Einordnen auf den passenden Fahrstreifen wird ermöglicht, sodass die Zahl der nötigen oder kurzfristigen Fahrstreifenwechsel minimiert werden kann. Eine hochdetaillierte Karte muss also sowohl präzise Informationen über Fahrstreifen und ihren Verlauf – insbesondere auf Kreuzungen – als auch über die Umgebung der Fahrstreifen enthalten.

Aus dem Bedarf an solch hochgenauen Karten ergeben sich aber auch neue Herausforderungen. Neben der Notwendigkeit, die Position innerhalb einer Karte genau bestimmen zu müssen, ist vor allem die Erstellung der Karten selbst eine Herausforderung. Es ist abzusehen, dass der personelle und somit auch finanzielle Aufwand zur Erstellung und Aktualisierung der Karten, der bei den heutigen Methoden notwendig ist, um flächendeckend weltweit hochgenaue Karten erzeugen und aktualisieren zu können, viel zu groß wird. Konsequenterweise bezeichnen beispielsweise Aeberhard *et al.* [ARB⁺ 15] in einer Analyse der Fortschritte von BMW im automatisierten Fahren die großflächige

Generierung dieser Karten als eines der größten zu lösenden Probleme für die weitere Entwicklung auf dem Weg zu marktreifen Fahrzeugen.

Dafür, dass das bislang nicht möglich ist, gibt es viele Gründe. Einer davon ist das massenhafte, flächendeckende Sammeln der hierzu nötigen Informationen über die kartierten Strecken. Hierfür wird bereits umfassend Forschung betrieben, siehe auch Kap. 2.2. Ein weiterer Grund ist, dass das Auswerten dieser Informationen bislang immer noch einen hohen personellen Aufwand bedeutet, weil bestehende Verfahren nur in den einfachsten Fällen Karteninformation selbst ermitteln können. Ganze Länder oder sogar Kontinente lassen sich aber so nicht kartieren, sondern nur durch das Erreichen eines möglichst hohen Automatisierungsgrades. Verfahren, die selbstständig, robust und konform mit den Verkehrsregeln Karten aus den Eingangsdaten generieren können, gibt es jedoch bislang nicht.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag leisten, diese Lücke durch die Entwicklung von Methoden für eine möglichst vollständige, automatische Generierung hochgenauer Karten zu schließen. Sie soll zeigen, dass das automatisierte Interpretieren und Verstehen der statischen Straßenszene auch in Innenstädten flächendeckend möglich ist und dass ein solches Verfahren mit beträchtlich weniger Aufwand als bislang zu präziseren Karten führt, deren Integrität idealerweise schon im Verlauf des Verfahrens sichergestellt werden kann.

1.2 Analyse des Problems

Karten fällt im automatisierten Fahren die Aufgabe zu, ein verkehrsregelkonformes Verhalten sicherzustellen, indem Informationen über die statische Umgebung abgebildet werden, die Fahrzeuge während der Fahrt nicht zuverlässig und rechtzeitig ermitteln können. Mit automatisiertem Fahren (AF) ist hier die Fortbewegung von Fahrzeugen gemeint, welche ohne Beaufsichtigung durch einen Fahrer selbstständig im Straßenverkehr agieren. Dies wird auch hoch- bzw. vollautomatisiertes Fahren genannt.

Sensordaten

Eine der Ursachen, warum Fahrzeuge außerstande sind, die Informationen zuverlässig ermitteln zu können, ist die unzuverlässige Sensorik und deren verlustbehaftete Auswertung. Das führt dazu, dass die Umgebung falsch oder bestimmte Bestandteile gar nicht erkannt werden. Insbesondere bei dichtem Verkehr stellt die Verdeckung von Teilen der Umgebung ein großes Problem dar. Die beschränkte Reichweite der Sensorik kann zudem dazu führen, dass nicht genügend Informationen zur Verfügung stehen, um die Umgebung eindeutig interpretieren zu können. Das Problem wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass Verkehrsregeln oft nicht redundant vermittelt werden, sondern nur einmalig an einer bestimmten Stelle im Straßenverlauf.

Um beispielsweise feststellen zu können, ob ein benachbarter Fahrstreifen zur Gegenfahrbahn gehört oder nicht, reicht es nicht aus, den Straßenrand und die Markierungen korrekt zu erkennen. Zunächst muss aus der geometrischen Anordnung der Markierungen auf die Existenz von Fahrstreifen geschlossen und schließlich deren Fahrtrichtung bestimmt werden. Die befahrbare Richtung ergibt sich mitunter allein aus der Beschilderung einer vorangegangenen Kreuzung, denn mitten auf der Straße ist meist nicht mehr erkennbar, ob es sich um eine Einbahnstraße handelt oder nicht. Ist beispielsweise eine Straße keine Einbahnstraße und hat sie zwei Fahrstreifen, bedeutet das zwangsläufig, dass es sich bei dem zweiten Fahrstreifen um die Gegenfahrbahn handeln muss. Wird ein Einbahnstraßenschild übersehen oder kann der Straßenrand aufgrund parkender Fahrzeuge nicht beobachtet werden, führt das also zu einer Kette falscher Schlussfolgerungen. Diese können nicht mehr revidiert werden, weil die kritische Information, hier also das Einbahnstraßenschild, nicht wiederholt wird. Das Nichterkennen eines Verkehrsschildes bedeutet also einen *Single Point of Failure*.

Da prinzipiell jedes Ergebnis der Fahrzeugsensorik als unsicher betrachtet werden muss, folgt daraus, dass solche Schlussfolgerungen aus Sicherheitsgründen nicht während der Fahrt getroffen, sondern aus der Karte entnommen werden sollten. Die Fahrzeugsensorik wird dadurch allerdings nicht überflüssig, sie wird weiterhin benötigt, um dynamische Objekte zu detektieren und die Validität der Karte sicherzustellen.

Vollständiges Weltbild

Will man die Karten automatisch generieren und diese Generierung auf Sensordaten aufbauen, ist man mit genau demselben Problem konfrontiert wie Fahrzeuge während der Fahrt, denn den Sensordaten kann nicht vertraut werden. Eine Aufgabe von Karten ist es aber, die letzte Rückfallebene eines Fahrzeugs zu bilden, der unbedingt vertraut werden können muss. Ungenaue Eingangsdaten bilden daher kein solides Fundament für die Kartengenerierung, denn daraus erwachsene Fehler sind wegen der Sicherheitsfunktion, welche eine Karte erfüllen muss, nicht akzeptabel.

Kann dagegen davon ausgegangen werden, dass alle relevanten *regelgebenden Elemente* bekannt sind, also alle Verkehrsschilder, Straßenmarkierungen, etc., so muss es möglich sein, daraus eindeutig eine verkehrsregelkonforme Karte abzuleiten. Diese Annahme ist die Arbeitshypothese der vorliegenden Arbeit.

Wäre die Ausgestaltung der Straße mit regelgebenden Elementen unvollständig, würde dies bedeuten, dass eine Situation auch für Menschen missverständlich ist, was für eine hohe Verkehrssicherheit unbedingt vermieden werden muss. Dies führt also zu der Annahme, dass es nur eine einzige sinnvolle Interpretation des beobachtbaren Straßenumfelds geben darf, welche durch ein deterministisches Verfahren gefunden werden kann.

Es gibt allerdings nicht nur explizite, beispielsweise durch Straßenränder vermittelte Regeln, sondern auch Regeln, welche sich entweder aus der Verkehrsgesetzgebung ergeben oder solche, die rein auf Konvention beruhen. In dieser Hinsicht sind hier Analogien zu anderen Disziplinen der künstlichen Intelligenz, wie etwa dem Verstehen natürlicher Sprache, zu erkennen: In beiden Fällen findet hier eine Kommunikation statt, bei der Information nicht klar und unmissverständlich, sondern anhand einer für Maschinen schwer zu erfassenden gemeinsamen Wissens- und Regelbasis übermittelt wird.

Beispielsweise ist ein wichtiges Konzept bei Verkehrsregeln die Einteilung in die Begriffe *links*, *rechts* und *geradeaus*. Kreuzungen sind, wenn möglich, so gestaltet, dass Verkehrsteilnehmer immer höchstens diese drei Optionen haben. Im Straßenverkehr verwendete Symbole und die Straßenverkehrsordnung selbst (beispielsweise „rechts vor links“) bauen darauf auf. Bei genauer Betrachtung fällt eine Definition aber schwer: Zwar ist *links* offensichtlich links von *geradeaus*, aber eine absolute Definition gibt es nicht: Wie viel genau muss eine Straße nach links abknicken, bis man von *linksabbiegen* reden kann? Dennoch würden Menschen selten falsch verstehen, was damit gemeint ist. Es muss also formalisierbare Regeln geben, die Menschen in dieser Situation anwenden.

Anders als bei natürlicher Sprache kann in diesem Fall davon ausgegangen werden, dass diese Regelbasis weitgehend unveränderlich, allgemein verständlich und daher letztlich überschaubar ist. Es sind somit einige Grundvoraussetzungen für den Einsatz von maschinellen Systemen zur wissensbasierten Informationsverarbeitung, sogenannten Expertensystemen, erfüllt: Es kann von einem vollständigen Weltbild ausgegangen werden und es gibt eine abgeschlossene Wissensbasis, mit der dieses Weltbild interpretiert werden kann.

Die Lücke, die sich aus der Tatsache ergibt, dass die Ergebnisse von Sensorik immer unsicherheitsbehaftet sind, andererseits aber ein vollständiges Weltbild benötigt wird, um eine korrekte Kartengenerierung zu gewährleisten, kann nur durch einen zusätzlichen Validierungsschritt geschlossen werden. In diesem Schritt wird sichergestellt, dass die Ergebnisse der Sensorik vollständig und korrekt sind, indem Fehler korrigiert werden. Dies erfordert

menschliches Eingreifen und ist somit ein Arbeitsschritt, der schlecht automatisiert werden kann. Durch Fortschritte bei der Sensorik lässt sich der Aufwand zwar minimieren, aber da alleine durch Verdeckungen ein perfektes Sensorergebnis ausgeschlossen ist, kann dieser Schritt auf absehbare Zeit nicht ganz entfallen.

Zudem besteht die Gefahr, dass die oben erwähnte Annahme einer eindeutigen Interpretation der Karteninformation in Einzelfällen nicht zutrifft, beispielsweise weil Fehler bei der Beschilderung unterlaufen sind oder durch Verwitterung Schilder oder Markierungen unleserlich geworden sind. Auch diese Defekte müssen durch menschliche Überwachung korrigiert werden. Solche Fälle entlarven möglicherweise auch eine missverständliche und somit gefährliche Straßengestaltung, welche besser durch bauliche Veränderungen als durch eine Korrektur der Karte behoben werden kann.

Es ergibt sich also eine Verarbeitungskette zur automatischen Kartengenerierung, die zunächst grob aus drei Schritten besteht: das Beobachten von Karteninformation durch Aufzeichnung von Sensordaten und Erkennung von regelgebenden Elementen, die Korrektur der Karteninformation durch den Menschen zu einem vollständigen Weltbild und schließlich das automatisierte Inferieren der Straßentopologie aus diesem Weltbild. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird dieses Weltbild die *physische Ebene* der Karte genannt.

Struktur des Straßennetzes

Da es ein Hauptziel dieser Arbeit ist, Methoden zur automatischen Inferenz aus der *physischen Ebene* zu entwickeln, ist es wichtig, sich zunächst die grundsätzliche Struktur des Straßennetzes vor Augen zu halten. Wie es für Netze im technischen Sinn typisch ist, besteht es aus Kanten (den Straßen) und Knoten (den Verkehrsknotenpunkten, bzw. Kreuzungen). Die Unterscheidung zwischen Straßen und Knotenpunkten findet sich auch in internationalen Vereinbarungen (siehe [Uni68a, Kap. 1, Art. 1]) und spielt eine wesentliche Rolle in der Verkehrsgesetzgebung. Technisch gesehen lässt sich die Struktur als ein Graph interpretieren: den *Straßengraph*. Die Interpretation dieses Graphen bildet bekanntlich die Grundlage für Navigationsgeräte.

Für automatisiertes Fahren ist diese grobe Betrachtung aber nicht ausreichend. Hierfür sind vielmehr die einzelnen Fahrstreifen relevant. Auch hier lässt sich eine Netzstruktur erkennen: Innerhalb einer Straße gibt es Abschnitte, in denen sich die Konfiguration der Fahrstreifen nicht ändert, und Bereiche, in denen neue Fahrstreifen hinzukommen, sich verzweigen oder enden. Es ergibt sich ein feinmaschiges Netz aus Fahrstreifen und Verknüpfungen zwischen diesen, das ebenfalls ein Graph ist: der *Fahrstreifengraph*. Dieser bildet aufgrund des höheren Detailgrads für automatisierte Fahrzeuge eine wesentlich geeignetere Entscheidungsgrundlage als der Straßengraph.

Während innerhalb der Straßenabschnitte der genaue Verlauf der Fahrstreifen in der Regel klar ist, da sie üblicherweise durch Markierungen voneinander getrennt werden, ist in den Knotenpunkten der Verlauf oft nicht eindeutig. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, werden Markierungen in Knotenpunkten oft weggelassen, oder nur auf Hauptverkehrsarme beschränkt [For80, Kap. 4.1]. Der Verlauf der Fahrstreifen ist hier also nicht fest vorgegeben, sondern beruht auf durch Konvention festgelegten Regeln. Auch die Verbindungen zwischen den Fahrstreifen am Eingang und am Ausgang einer Kreuzung sind oft nicht explizit markiert, sondern durch Verkehrsregelwerke vorgeschrieben. Wie in Kap. 4.1 gezeigt wird, geschieht das nicht immer auf eindeutige Art und Weise.

Das Bestimmen der Fahrstreifen innerhalb eines Knotenpunktes setzt also Kenntnis über die angrenzenden Straßenabschnitte voraus. Es liegt daher nahe, das Inferieren der Karte im Sinne der international gültigen Unterscheidung aufzuteilen in das Bestimmen der Straßenabschnitte und das anschließende Auflösen der Knotenpunkte. Darauf aufbauend können Verkehrsregeln betrachtet werden, die nicht den Verlauf der Fahrstreifen beeinflussen, wie etwa Geschwindigkeitsbeschränkungen. Die Zuordnung dieser Verkehrsregeln zu den einzelnen Fahrstreifen erfolgt dann in einem letzten Schritt der automatisierten Kartengenerierung.

1.3 Ziele dieser Arbeit

In Kap. 2 werden einzelne Vorarbeiten zur automatischen Kartengenerierung für automatisiertes Fahren vorgestellt. Wie eine Karte, deren Qualität für das automatisierte Fahren ausreicht, erzeugt werden kann, ist bislang nicht untersucht worden. Nicht einmal die Fragen, welche Informationen eine solche Karte überhaupt enthalten muss oder was dafür benötigt wird, scheinen bislang befriedigend beantwortet worden zu sein. Diese Lücken behandelt die vorliegende Arbeit, indem zunächst Anforderungen an Karten für das automatisierte Fahren definiert werden. Aus einer Analyse der im Straßenverkehr gültigen Regeln werden grundsätzliche Annahmen über die Straßengestaltung aufgestellt und basierend darauf Methoden und Regeln für ein geeignetes Expertensystem zur Kartengenerierung entwickelt und an Realdaten validiert.

Hierfür wird in Kap. 3 zunächst untersucht, welche Informationen für automatisierte Fahrzeuge relevant sind und somit kartiert werden müssen. Außerdem werden verfügbare Kartenformate für das automatisierte Fahren vorgestellt und die Repräsentation der darin abgelegten Daten erläutert.

Die in Abschnitt 1.1 formulierten Überlegungen bilden dabei die Grundstruktur der daran anschließenden Kapitel. Zunächst wird in Kap. 4 untersucht, wie Informationen und Verkehrsregeln im Straßenverkehr vermittelt werden. Daraus werden Anforderungen an die Eingangsdaten formuliert und Annahmen über die Straßengestaltung getroffen, die aus algorithmischer Sicht für die Datenverarbeitung relevant sind. In Kap. 5 wird basierend darauf eine Methodik entwickelt, mit der in den Eingangsdaten Straßenabschnitte und darin die Fahrstreifen sowie – soweit möglich – deren Richtung identifiziert werden können. In Kap. 6 werden dann ein Verfahren und eine Regelbasis erarbeitet, mit denen der Verlauf der Fahrstreifen innerhalb von Kreuzungen bestimmt werden kann. Der letzte Verfahrensschritt besteht dann in dem Bestimmen der zu beachtenden Verkehrsregeln auf den Fahrstreifen und wird in Kap. 7 vorgestellt.

Als Nachweis der Eignung der entwickelten Methoden für die Kartengenerierung wird in Kap. 8 eine Implementierung des Expertensystems auf einen umfassenden realen Datensatz angewendet. Dafür müssen zunächst Metriken entwickelt werden, mit denen fahrstreifengenaue Karten verglichen werden können. Auf Basis dieser Metriken wird schließlich die so generierte Karte mit einer Referenzkarte verglichen und daraus Schlussfolgerungen für die Eignung des beschriebenen Ansatzes gezogen.

Die Arbeit schließt in Kap. 9 mit einer Schlussbetrachtung über die möglichen Implikationen des hier vorgestellten Ansatzes für die zukünftige Entwicklung von automatisierten Fahrzeugen.

2 Stand der Forschung

In der Literatur finden sich zahlreiche Ansätze, die das Ziel verfolgen, im Straßenverkehr die beobachtbaren Informationen für ein automatisiertes Fahrzeug in verarbeitbarer Form zu repräsentieren. Dieses Kapitel stellt die Ansätze dar und analysiert ihre Implikationen auf die vorliegende Arbeit. Es gibt dabei zwei Schwerpunkte, auf die sich diese Arbeit konzentriert und deren Stand der Forschung im Folgenden diskutiert wird. Dies ist zunächst die Repräsentation des Umweltwissens für automatisierte Fahrzeuge in Form von Karten, welche in Abschnitt 2.1 untersucht werden soll. Karten zur Wegfindung haben eine weit zurückreichende Geschichte, die natürlich lange vor die Entwicklungen zum automatisierten Fahren zurückreicht. Das automatisierte Fahren stellt aber neue und immer größer werdende Anforderungen an den Detailgrad der Karten. Das betrifft sowohl die Auflösung der Kartendaten als auch den Umfang der Informationen. Wie sich zeigen wird, herrscht dabei zusehends eine hinderliche Diskrepanz zwischen dem, was heutige Kartenrepräsentationen leisten können, und den Anforderungen, die ein sicheres automatisiertes Fahrzeug stellt.

Im zweiten Teil schließt sich eine Analyse der bisherigen Arbeiten im Bereich der Sensordatenverarbeitung für automatisierte Fahrzeuge an. Der Fokus liegt auf der Darstellung der aktuellen technischen Herausforderungen und auf der Untersuchung, welches Potenzial bei der Verarbeitung der Sensordaten im Hinblick auf die Interpretation von Straßenszenen bzw. Straßenabschnitten zur Verfügung steht.

2.1 Kartenrepräsentation

Weil die Erstellung von Karten für Fahrzeuge, beispielsweise für Navigationsgeräte, schon deutlich länger intensiv betrieben wird als die Forschung zum automatisierten Fahren, gibt es viele kommerzielle und freie Anbieter für Kartendaten. Allerdings wurde erst in den letzten Jahren begonnen, diese Karten um Daten zu erweitern, die für das automatisierte Fahren von vorrangiger Bedeutung sind.

Herkömmliche Navigationskarten

Besonders zu erwähnen ist hier das Projekt OpenStreetMap (OSM) [HW08], welches es sich zum Ziel gesetzt hat, frei nutzbare digitale Landkartendaten zu erstellen. Die Datenbasis wird von Freiwilligen erzeugt. Für das automatisierte Fahren ist das Projekt aber nicht weitreichend genug, da nur Straßenverläufe und gegebenenfalls die Anzahl der Fahrstreifen einer Straße im Kartenmaterial enthalten sind. Qualität, Aktualität und Detailgrad der Daten unterscheiden sich regional erheblich [Hak10, SMA⁺17] und garantieren keine Aktualität oder Fehlerfreiheit.

Im kommerziellen Bereich findet in der Regel das Format Geographic Data Files (GDF) Verwendung, das in der Norm ISO 14625:2011 spezifiziert ist. Es nutzt eine mit OSM vergleichbare Repräsentation basierend auf dem Verlauf von Straßenabschnitten (*Road Element*) und Kreuzungen (*Junction*).

Auch wenn das Format überhaupt nicht für die Anwendung in automatisierten Fahrfunktionen entwickelt worden ist, bieten kommerzielle Kartenanbieter, beispielsweise Here [HER19] und TomTom [Tom19] auf dieser Basis

bereits gezielt Karten für das automatisierte Fahren an. Das zur Verfügung gestellte Kartenmaterial erweitert die bestehenden Informationen über den Straßenverlauf um spezielle Eigenschaften, beispielsweise Anzahl, Verlauf und Breite der einzelnen Fahrstreifen. Dies reicht aber selbst für grundlegende Anforderungen des automatisierten Fahrens an solche Karten nicht aus, wie beispielsweise die Validierbarkeit der enthaltenen Information.

Da diese erweiterte Kartenrepräsentation hauptsächlich für automatisierte Fahrfunktionen auf Autobahnen entwickelt wurde, stößt die Darstellungsform der Daten bei Kreuzungen an ihre Grenzen: Der komplexe Verlauf einzelner Fahrstreifen innerhalb einer Kreuzung lässt sich schlecht anhand der Eigenschaften der angrenzenden Kreuzungsarme ausdrücken. Daher existieren zusätzliche Erweiterungen des Kartenformats speziell für Kreuzungsgeometrien, was zu einer inhomogenen und gegebenenfalls sogar inkonsistenten Darstellung führt.

Darüber hinaus finden sich auch Anwendungen, die das Kartenformat OpenDRIVE [VIR18] nutzen, welches speziell für die vereinheitlichte Weltbeschreibung bei der Fahrzeugsimulation entwickelt wurde. Der Vorteil gegenüber den oben genannten Formaten ist hier, dass die Spezifikation frei verfügbar ist. Allerdings gibt es keine frei verfügbare Software zur Auswertung der Karten. Die Darstellung der Karteninformation orientiert sich an den bereits erwähnten Formaten.

Diese Formate haben gemeinsam, dass sie im Wesentlichen nur eine Erweiterung bestehender Kartenrepräsentationen für Navigationsanwendungen oder Simulationsanwendungen für teilautomatisierte Fahrfunktionen darstellen. Diese werden auch als die niedrigeren Stufen des automatisierten Fahrens betrachtet [J3018], in denen eine Überwachung durch den Fahrer vorausgesetzt werden kann. Hierfür muss das Kartenmaterial keine Anforderungen im Bezug auf Validierbarkeit oder einen hohen Detailgrad erfüllen, weil der für eine sichere Fahrt erforderliche Funktionsumfang gering ist und notfalls der Fahrer als Sicherheitsebene zur Verfügung steht. Für das automatisierte Fahren müssen die Kartendaten höheren Anforderungen genügen, um Sicherheit dadurch zu erreichen, dass die Karte die Sensordaten stützt, erklärt und so eine Plausibilisierung des Gesamtsystems erlaubt.

Obwohl die oben beschriebenen Formate für solche Anforderungen ungeeignet sind, werden sie bis heute – wohl auch in Ermangelung verbreiteter Alternativen – häufig für Verfahren verwendet, die eigentlich den höheren Stufen des automatisierten Fahren zuzurechnen sind. Deshalb allerdings sehen sich viele Publikationen gezwungen, bestehende Formate zu erweitern, weil die bestehende Information nicht ausreichend ist (vgl. z.B. [AGV17, FZL⁺18, LBI17]) – oder gleich ein eigenes Format zu verwenden (vgl. z.B. [BLSII16, CG16, VBC⁺18]).

Formate für automatisiertes Fahren

Darüber hinaus gibt es auch Kartenformate, die speziell für AF entwickelt wurden. Hierbei ist insbesondere das *Lanelet*-Kartenformat [BZS14] zu nennen. Anders als die oben erwähnten Formate, welche durch Erweiterungen im Stile eines *Top-Down*-Ansatzes für detailliertere Karteninformationen immer mehr verfeinert wurden, zeichnet sich das Format durch einen *Bottom-Up*-Ansatz aus. Zentrales Element sind *Lanelets*. Ein *Lanelet* repräsentiert einen Fahrstreifenabschnitt, auf dem sich die Verkehrsregeln nicht ändern. Aus deren Nachbarschaftsbeziehungen ergibt sich die Gesamtheit des Straßennetzes. Diese deutlich feingranularere Modellierung erlaubt es, beliebige Kreuzungs- und Straßengeometrien darzustellen.

Für dieses Format existiert eine Erweiterung, *Lanelet2* [2], welche ein allgemeingültiges Kartenformat für AF zu entwickeln sucht, das auch Zukunftsaspekte wie eben die Validierung von Karteninformation berücksichtigt. Aufgrund der Allgemeingültigkeit und der frei verfügbaren Softwarebasis wird dieses Format auch in der Softwareimplementierung der in dieser Arbeit dargestellten Methoden verwendet. Zu den für diese Arbeit relevanten Details wird auf Kap. 3.4 verwiesen.

Eine Ursache, weshalb es kaum weitere Formate dieser Art gibt, könnte sein, dass der Aufwand zur Erstellung dieser Karten erheblich ist. Der Fortschritt des OSM-Projektes, das auch nach über zehn Jahren Existenz und über einer Million Helfern [Woo18] längst nicht abgeschlossen ist, gibt einen Vorgeschmack auf den Aufwand zur Erstellung von AF-Karten, der nur durch einen sehr hohen Automatisierungsgrad überhaupt zu bewältigen ist. Die Anforderungen an die Genauigkeit können zurzeit nur durch einen großen Personalaufwand erfüllt werden, sodass die Verfügbarkeit von entsprechendem Kartenmaterial so gering ist, dass die Frage nach einem geeigneten Format bislang nachrangig war.

Es existieren auch weitere Darstellungsformen für Karteninformation, welche sich allerdings oft auf die Repräsentation von während der Fahrt aufgezeichneten Informationen konzentrieren. Ein Beispiel sind Rasterkarten (Grid-Maps) [FH16]. Hierfür wird die Bodenebene in Quadrate eingeteilt, welchen aufbereitete Sensorinformation zugewiesen wird. Auch wenn diese Darstellung effizient während der Fahrt mit ausgewerteten Sensorinformationen befüllt werden kann, wächst der Speicherbedarf mit höherer Auflösung quadratisch und übersteigt denjenigen konventioneller Karten bei weitem. Ohne weitere Verarbeitung eignen sich diese Karten nicht zur Assoziation und Interpretation der Daten hin zu einer Bewertung der Verkehrssituation oder gar der Beantwortung der Frage, ob eine bestimmte Aktion im aktuellen Kontext verkehrsregelkonform ist oder nicht.

2.2 Beobachtung von Karteninformation

Die Detektion der regelgebenden Merkmale im Straßenverkehr stellt für diese Arbeit eine wichtige Grundlage dar. Schließlich soll gewährleistet sein, dass die benötigten Eingangsdaten für das im weiteren Verlauf beschriebenen Verfahren tatsächlich in absehbarer Zeit in hinreichender Qualität erzeugt werden können.

Arbeiten auf diesem Gebiet lassen sich generell in zwei allgemeinen Forschungsfelder der Sensordatenverarbeitung einordnen. Diese beiden Forschungsfelder werden häufig mit *Computer Vision* und *Image* oder *Scene Understanding* beschrieben. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Verfahren lassen sich überwiegend ersterem zurechnen, wobei es auch zunehmend Mischformen gibt. Verfahren zum *Scene Understanding* werden im folgenden Abschnitt 2.3 vorgestellt.

Auch wenn die Namen dies suggerieren, sind die Methoden nicht auf Kamerabilder beschränkt, vielmehr geht es darum, mit einem Bild der Welt zu arbeiten, das von Sensoren beobachtet wird. Allerdings liegt der Fokus tatsächlich häufig auf der Verarbeitung von visueller Information, da regelgebende Elemente im Straßenverkehr für Menschen ausschließlich visuell vermittelt werden. Während *Computer Vision* Methoden zur Detektion von konkreten Objekten in Sensordaten anbietet (Markierungen, Schilder, Fahrzeuge, . . .), liegt der Fokus bei *Scene Understanding* auf der Interpretation dieser Objekte. Es geht darum, zu einem höheren Verständnis einer Szene zu gelangen oder abstrakte Konzepte zu identifizieren (Fahrstreifen, Verkehrsregeln, Intentionen anderer Verkehrsteilnehmer, . . .), die durch beobachtete Objekte und Objektzustände ausgedrückt werden.

Das Beobachten statischer Umgebungsinformationen ist ein wichtiges Thema für das automatisierte Fahren. Deshalb existiert hierzu eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren für alle möglichen Sensoren. Dieser Abschnitt beschränkt sich auf Bilddaten. Aber auch zu anderen Sensoren, namentlich Lidar und Radar, existieren viele Verfahren.

In der Literatur lassen sich spezialisierte Detektoren zu allen Objekten finden, die für das automatisierte Fahren relevant sind. Da regelgebende Elemente im Straßenverkehr zur Verbesserung der Verkehrssicherheit so ausgeführt werden, dass sie leicht erkannt werden können, funktionieren diese Verfahren sehr zuverlässig und sind in einfacher Form bereits in heutigen Serienfahrzeugen zu finden. Beispiele hierfür sind Detektoren für Verkehrsschilder [MTM12, SVP19], Markierungen [BLR⁺17, 4], Straßen bzw. Straßenränder [CBSW19, HRL15, BHLLR14] oder

Ampeln [JPM⁺16]. Auch wenn diese Ansätze teilweise eine sehr hohe Zuverlässigkeit erreichen, ist der Einsatz eines spezialisierten Detektors für jeden Objekttyp nicht zielführend, da die Verarbeitungsschritte, die dafür ausgeführt werden, oft sehr ähnlich sind.

Die neuesten Fortschritte im Bereich des *Semantic Labelling* [COR16] mittels Künstlicher Neuronaler Netze machen spezialisierte Detektoren dagegen zunehmend überflüssig. Hierbei wird jedem Bildpunkt eines Kamerabildes eine Klasse zugeordnet, wobei potentiell zwischen beliebig vielen Klassen unterschieden werden kann. Hierbei werden bislang unerreichte Erkennungsraten möglich, auch in Bereichen, in denen konventionelle Verfahren nur unbefriedigende Ergebnisse erreichen konnten. Dazu gehören etwa abgeflachte Bordsteine, für deren Erkennung oft Kontextwissen nötig ist, das konventionelle Detektoren nur unzureichend berücksichtigen können. Aktuelle Verfahren unterscheiden beispielsweise acht unterschiedliche Klassen (Straße, Fahrzeug, Person, Vegetation, etc.) mit einer Genauigkeit von über 92% (Intersection-Over-Union, IoU). Für Semantic Labelling auf Luftbildern finden sich vergleichbare Arbeiten mit ähnlicher Güte [She16, MWG⁺16], allerdings, bedingt durch die Bildqualität von Luftbildern, mit einer geringeren Auflösung.

Für eine umfassende Umgebungsrepräsentation, wie sie für die Kartengenerierung nötig ist, reicht die reine Detektion aber nicht aus. Es gilt auch, Mehrfacherkennungen und Falscherkennungen auszusortieren, sowie fragmentierte Detektionen, wie dies häufig bei Straßenmarkierungen und Bordsteinen vorkommt, zusammenzufügen. Hierfür bieten sich Ansätze an, welche die Detektionen zueinander in Bezug setzen, wie etwa *Conditional Random Fields* (siehe z.B. [MNP15]). Alternativ existieren auch geometrisch motivierte Gruppierungsverfahren, die dieses Problem angehen [1]. Mit Erkennungsraten von etwa 90% zeigt sich aber auch hier ein gewisser Genauigkeitsverlust, der auch mit mehrfacher Kartierung derselben Strecke nicht völlig ausgeglichen werden kann, da mit einer zunehmenden Zahl von Befahrungen zufällige Muster in den detektierten Informationen das Ergebnis verschlechtern.

Zudem existieren Verfahren, die kontextuelle Information nutzen, um abstraktere Objekte wie beispielsweise einzelne Fahrstreifen, meistens den Ego-Fahrstreifen, zu detektieren. Weil hierfür oft die oben genannten Bildmerkmale in Vorstufen des Verfahrens verwendet werden, ist die Erkennungsrate im Gesamtergebnis mit aktuell typischerweise etwa 93% (F-Maß, siehe z.B. [BS14, CC17, GZYK17]) bei der Erkennung der Gesamtfläche des Ego-Fahrstreifens im Bildraum schlechter als diejenige beispielsweise für reine Markierungserkennung, wo Erkennungsraten von 98%-99% keine Seltenheit sind. Hinzu kommt, dass Verfahren zur Erkennung von Fahrstreifen sich oft die Annahme zunutze machen, dass der Bereich direkt vor einem Fahrzeug ohnehin immer zum Ego-Fahrstreifen gehört. Dadurch erreichen selbst naive Methoden, die immer einen geraden Fahrstreifen konstanter Breite vorhersagen, bereits Erkennungsraten von über 50%. Die genannten 93% vermitteln daher eher einen zu positiven Eindruck der Leistungsfähigkeit dieser Verfahren.

Die Entwicklungen im Bereich des *Deep Learning* haben auch Verfahren möglich gemacht, die mehrere Fahrstreifen und deren Fahrtrichtung in Kamerabildern detektieren können. Diese Verfahren funktionieren besser, wenn die Informationen explizit aus der Bildinformation entnommen werden können. Das ist dann der Fall, wenn andere Verkehrsteilnehmer sichtbar sind oder die Fahrstreifen klar durch Markierungen getrennt sind. Die Erkennungsraten liegen im günstigsten Fall bei etwa 80% IoU, bezogen auf die Bildfläche. In der Nähe von Knotenpunkten, bei dichtem Verkehr und in engen, einspurigen Straßen sinkt die Erkennungsrate auf das Niveau von zufälligem Rauschen, weswegen diese Fälle in aktuellen Arbeiten nicht betrachtet werden [LYWW18, MSOS18].

Das hat unter anderem damit zu tun, dass Kontextwissen in Künstlichen Neuronalen Netzen bislang nur räumlich effektiv genutzt werden kann. Ansätze, wie etwa Rekurrente Neuronale Netze, die zeitliches Kontextwissen (etwa passierte Schilder und Pfeile) berücksichtigen können, haben sich bislang nicht als leistungsfähig genug erwiesen. Gerade dieses zeitliche Kontextwissen ist aber zum Verständnis komplexer Straßenszenen entscheidend.

Insgesamt zeigt sich der Trend, dass sich die Leistungsfähigkeit der existierenden Verfahren zunehmend verschlechtert, je abstrakter die Merkmale sind, die erkannt werden sollen. Allerdings können selbst vergleichsweise einfache Merkmale wie Markierungen nicht fehlerlos erkannt oder kategorisiert werden.

Für die Kartengenerierung ist das sehr problematisch, wie ein einfaches Beispiel zeigt: Innerstädtische Hauptstraßen beinhalten pro gefahrenem Kilometer etwa zwei Kilometer Markierungslänge. Selbst eine sehr hohe Genauigkeit von 99% (F-Maß) bedeutet praktisch, dass pro Kilometer beispielsweise alleine 20 m Markierungen nicht detektiert wurden und ergänzt werden müssen, während weitere 20 m falsch detektiert werden und entfernt werden müssen. Dass fehlende oder falsche Informationen in höheren Verarbeitungsebenen bei der Kartenerstellung durch Nutzung von Umgebungsinformation sinnvoll ergänzt werden können, erscheint vor diesem Hintergrund illusorisch. Hinzu kommt, dass manche Fehldetektionen gar nicht zuverlässig plausibilisiert werden können, weil die Information gar nicht redundant vermittelt wird. Das gilt insbesondere für falsch erkannte Verkehrsschilder, die einer Straßenszene eine ganz andere Interpretation geben können, wie bereits in Kap. 1.2 ausgeführt.

Es ist daher auf absehbare Zeit erst einmal unerlässlich, dass beobachtete Karteninformation vor der Kartengenerierung von Menschen begutachtet und korrigiert wird. Zukünftige Entwicklungen im Bereich der *Computer Vision* werden den Arbeitsaufwand aber stetig senken können. Zugleich wird deutlich, dass die Qualität der Ergebnisse sich spürbar verschlechtert, wenn statt konkret beobachtbarer Objekte eher abstrakte Konzepte wie Fahrstreifen erkannt werden sollen, da Kontextwissen in die bestehenden Methoden nur schwer integriert werden kann. Der Aufwand zur Korrektur der Daten erhöht sich bei abstrakteren Detektionen bislang derart übermäßig, dass der höhere Grad der Vorverarbeitung keine Erleichterung darstellt.

2.3 Inferieren von Karteninformation

Im Unterschied zu den bislang vorgestellten Methoden ist das Inferieren von Karteninformation dem Scene Understanding zuzurechnen. Scene Understanding baut in einer hierarchischen Struktur auf den Ergebnissen der Computer Vision auf und ist somit auf eine möglichst hohe Qualität der Objektdetektion bzw. Klassifikation angewiesen. Dies ist auch der Grund, warum zu diesem Gebiet allgemein wenige Forschungsarbeiten vorliegen. Der Umgang mit unvollständigen Eingangsdaten der Computer Vision führt entweder zu unbefriedigenden Ergebnissen oder zu Ansätzen, die in ihrer Funktionsweise an ein bestimmtes verwendetes Verfahren, das die Eingangsdaten generiert, angepasst sind und nicht ohne Weiteres auf andere Eingangsdaten übertragen werden können.

Durch Methoden des Scene Understanding könnten möglicherweise unvollständige oder falsche Informationen aus früheren Verarbeitungsschritten durch den größeren Kontext erkannt und somit das Gesamtergebnis verbessert werden. Allerdings hat sich das zumindest für das Anwendungsgebiet des automatisierten Fahrens bislang nur für die Detektion konkreter Objekte, nicht aber für eher abstrakte Konzepte erfüllt. Das könnte daran liegen, dass es im Straßenverkehr eine überschaubare Anzahl relevanter und zumeist markanter Objekttypen – wie beispielsweise Markierungen – gibt, aber schier endlose Möglichkeiten, diese zu einer Straßenszene zu kombinieren. Die Wahrscheinlichkeit ist also hoch, dass es gleich mehrere mögliche Szenarien gibt, die gleichermaßen die beobachteten Sensordaten erklären.

Aufgrund der hohen Komplexität und der Abhängigkeit von zuverlässigen Sensordetektionen finden sich nur wenige Ansätze, die aus erkannten Merkmalen tatsächlich Karteninformationen in einem größeren Zusammenhang inferieren. Sie lassen sich unterteilen in Verfahren, die für den Einsatz während der Fahrt entwickelt wurden und somit mit unvollständiger Information umgehen und Verfahren, die für die Kartierung entwickelt wurden und somit einen umfangreicheren, möglichst vollständigen Kontext voraussetzen.

2.3.1 Verfahren für den Einsatz während der Fahrt

Verfahren zum Inferieren von Karteninformationen während der Fahrt sollen hochdetaillierte Karten zumindest in Teilen überflüssig zu machen. Da hierbei mit unvollständiger, unsicherer Sensorinformation gearbeitet werden muss, bieten sich Bayes'sche Netze an [Kjæ13]. Nahezu die gesamte Literatur zu unsicherheitsbehafteter Inferenz basiert auf diesen Methoden.

Bayes'sche Netze modellieren die Abhängigkeit zwischen Weltwissen und unsicherheitsbehafteten Beobachtungen mithilfe eines Graphenproblems. Dabei stellt jeder Knoten entweder eine beobachtbare, unsicherheitsbehaftete Information (*beobachtbare Variablen*) oder eine dahinterliegende zu inferierende Information (*latente Variablen*) dar, welche jeweils durch eine a-priori Wahrscheinlichkeitsverteilung über ihren unbekanntem Zustand beschrieben wird. Kanten zwischen den Variablen drücken Abhängigkeiten zwischen den Variablen aus, also bedingte Wahrscheinlichkeiten zwischen zwei Knoten. Ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung über den Zustand der beobachtbaren Variablen bekannt, kann auf diese Weise die Gesamtwahrscheinlichkeitsverteilung aller Variablen des Netzes bestimmt werden. Diese stellt gleichzeitig das optimale Gesamtwissen über den modellierten Sachverhalt dar, einschließlich der Unsicherheit darüber.

Das Problem Bayes'scher Netze besteht allerdings darin, dass nur in Sonderfällen (z.B. bei ungerichteten Graphen oder bei diskreten Zufallsvariablen) eine geschlossene analytische Lösung des Graphen möglich ist. Für alle anderen existieren nur approximative Lösungsansätze. Am erfolgreichsten sind hierbei Sampling-Verfahren, welche gleichzeitig diskrete und kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen berücksichtigen können, um den wahrscheinlichsten Gesamtzustand zu approximieren. Mit zunehmender Anzahl zu schätzender Variablen eines Bayes'schen Netzes steigt die Anzahl der zu ziehenden Samples allerdings exponentiell an, weil das dahinterstehende kombinatorische Problem um jeweils eine weitere Dimension erweitert wird.

Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die Topologie eines Netzes unveränderbar ist, was die Modellierung von Problemen erschwert, bei denen die maximale Anzahl an Zuständen nicht bekannt oder unbeschränkt ist. Der Graph muss zudem gerichtet sein und darf keine Zyklen enthalten, was die Modellierung wechselseitiger Abhängigkeiten, wie etwa geometrischer Beziehungen, erschwert.

Ein Beispiel für die Anwendung Bayes'scher Netze ist die Arbeit von Geiger [Gei13]. Hier wird aus einer Menge inhomogener, aus Bildern gewonnener Merkmale – wie Freiraum, Objekttrajektorien und semantischer Information – mithilfe eines Bayes'schen Netzes auf die Topologie von Kreuzungen geschlossen. Sieben mögliche Typen von Kreuzungen (z.B. dreiarmlige und vierarmige Kreuzungen) werden dabei unterschieden und unter anderem durch ihren Kreuzungsmittelpunkt und die Winkel der Kreuzungsarme und ihre Breite charakterisiert. Die einzelnen Fahrstreifen und ihre Verknüpfung in der Kreuzung werden nicht modelliert. Das Verfahren stellt damit einen ersten Schritt zum Szenenverstehen für automatisiertes Fahren dar. Wegen des geringen Detailgrads handelt es sich allerdings noch um keine endgültige Lösung.

Für Straßen mit mehreren Fahrstreifen wurde durch Töpfer [Töp14] ein Verfahren entwickelt, das Bayes'sche Netze nutzt, um die Topologie von Straßenabschnitten zu schätzen. Dafür wird ein hierarchischer Graph aufgebaut, mit welchem aus der Beobachtung einzelner Fahrstreifenränder auf die Existenz von Fahrstreifen und so auf den Aufbau eines ganzen Straßenabschnittes geschlossen werden kann. Durch die feste Struktur des Graphen können aber nur Straßengeometrien abgeschätzt werden, die vorher in dieser Form modelliert wurden. Bislang unbekannte Geometrien werden dadurch nicht als solche erkannt. Der Aufbau des Problems erfordert zudem eine feste Rasterung der Straße in Fahrtrichtung, was bereits Vorwissen über den Straßenverlauf erfordert, das erst in späteren Verarbeitungsschritten vorliegt. Bedingt durch die Rasterung lassen sich Kreuzungsgeometrien ebenfalls

nicht abbilden. Sie hätten auch allein durch die kombinatorische Menge möglicher Konfigurationen von Kreuzungen einen erheblichen Einfluss auf die Anzahl der zu ziehenden Samples.

Es existieren auch Verfahren, bei denen anstatt Bayes'scher Netze *Künstliche Neuronale Netze* verwendet werden, beispielsweise bei der Arbeit von Bittel et al. [BRWZ17]. Das Inferenzproblem wird somit in ein Klassifikationsverfahren bzw. Regressionsverfahren umgewandelt. Die Ausgabeschicht des Neuronalen Netzes beschreibt die Konfiguration eines Straßenabschnittes. Auch hier entsteht das Problem, dass durch die feste Topologie des Neuronalen Netzes nur Geometrien erkannt werden können, die bei der Modellierung berücksichtigt wurden und mit denen das Netz zuvor trainiert worden ist. Ein generischer Ansatz zur Beschreibung und Erkennung beliebiger Straßengeometrien bei unvollständiger Informationsbasis ist jedoch noch nicht Teil des Stands der Technik.

Die beschriebenen Ansätze können oft nur die wahrscheinlichste Lösung bestimmen, aber keine Aussage darüber treffen, ob es auch die einzige Lösung ist, es also keine konkurrierenden Möglichkeiten gibt, die zu denselben beobachteten Merkmalen führen. Gerade diese Information wäre für ein automatisiertes Fahrzeug wichtig, da es so eine Handlung ausführen könnte, die in allen möglichen Szenarien als sicher erachtet wird. Noch wichtiger wäre diese Information für die Generierung von Karten, denn hier soll sichergestellt sein, dass es nur *eine* mögliche Lösung gibt. Mehrere Möglichkeiten wären ein Hinweis auf unvollständiges Umgebungswissen, einen Fehler bei der Kartengenerierung oder einen bei der Straßengestaltung unzureichend oder mehrdeutig interpretierbaren Straßenabschnitt.

2.3.2 Verfahren zur Kartierung

Anders als Verfahren, die für den Einsatz im Fahrzeug bestimmt sind, profitieren Verfahren für die Kartierung von einer besseren Informationsbasis. Während erstere darauf abzielen, die vor dem Fahrzeug befindliche Straße zu erfassen, können letztere auf die volle Information eines Streckenabschnitts zurückgreifen. Diese unterscheiden sich vor allem durch die Herkunft der Eingangsdaten. *Crowd Mapping*-Verfahren nutzen dafür die Daten, die durch viele Fahrzeuge erfasst werden. Eine andere Datenquelle bieten Luftbilder, weil hier, anders als bei Fahrzeugdaten, alle Informationen gleichzeitig in einem Bild vorliegen und nicht als Zeitreihen. Die angewandten Methoden unterscheiden sich hier also stark. Eine weitere Alternative stellen schließlich inferierende Verfahren dar, in denen regelbasiert aus den Eingangsdaten abstraktere Informationen abgeleitet werden. Sie stellen keine besonderen Voraussetzungen an die Datenquelle, setzen aber eine hohe Qualität der Eingangsdaten voraus.

Diese drei unterschiedlichen Ansätze werden im Folgenden genauer erläutert.

Crowd Mapping

Als Crowd Mapping werden Verfahren bezeichnet, bei denen die Kartenerstellung mithilfe gesammelter Daten mehrerer Agenten erfolgt, in der Regel durch Fahrzeuge, besser durch ganze Fahrzeugflotten [KSB16, RBP⁺17]. Dazu werden die Eingangsdaten mithilfe statistischer Analysen untersucht. Idealerweise gibt es pro Straßenabschnitt Hunderte Messungen, sodass die Anwendung von solchen Methoden, die aus dem Bereich des *Data Mining* stammen, gerechtfertigt ist. Die technischen Fortschritte bei der Sensorausstattung von Serienfahrzeugen haben das Potential, mittelfristig die bisherige Vorgehensweise – die Kartierung durch spezielle Fahrzeuge – zu ersetzen. Hierfür werden allerdings neue Verfahren benötigt, welche der allgemein geringeren Qualität der individuellen Daten gerecht werden. Andererseits liefert die Verfügbarkeit von Fahrzeugtrajektorien Informationen über übliche Verhaltensmuster oder Anhaltspunkte über geltende Verkehrsregeln. Messfahrzeuge befahren Strecken oft nur einmal und eignen sich daher nur schlecht für solche Methoden.

Als Beispiel findet sich in der Arbeit von Ruhhammer [RBP⁺17] ein Verfahren, das es ermöglicht, aus rauschbehafteten Fahrzeugtrajektorien mit statistischen Methoden auf die Lage von Fahrstreifen zu schließen. Nachteilig für solche Ansätze ist, dass die Kartenerstellung dadurch in Abhängigkeit von den Verhaltensmustern der verfolgten Fahrer gerät. Rückschlüsse darauf, ob dieses Verhalten auch verkehrsregelkonform ist oder ob wirklich alle Karteninformationen beobachtet werden konnten, sind nicht möglich.

Luftbilder und Geoinformationssysteme

Ein schon lange praktizierter Ansatz zur Gewinnung von Karteninformation ist die Analyse von Luftbildern [BSM⁺99]. Diese Methode ist vor allem bei der Erstellung von Straßenkarten für Geoinformationssysteme (GIS) seit Jahren verbreitet. In der zitierten Arbeit wird die Topologie des Straßennetzes mithilfe von Luftbildern durch die Kombination von Bildinformation mit der Annahme eines möglichst zusammenhängenden Straßennetzes bestimmt. So können Lücken im Straßennetz, die durch Waldstücke oder Schattenwurf entstehen, geschlossen werden. Wegen der fehlenden Möglichkeit, Ampeln und Verkehrsschilder zu detektieren, reichen Luftbilder allein nicht aus.

Weil außerdem für die Hauptanwendungsgebiete von GIS in der Regel keine hochdetaillierten Straßenkarten benötigt werden, sind Arbeiten zur Detektion einzelner Fahrstreifen rar. Eines der wenigen Beispiele ist der Ansatz von Mátyus et al. [MWFU16]. Hier werden Luftbilder mit Bildern eines Fahrzeugs kombiniert, mit dem Ziel, die Vorteile beider Perspektiven für die Detektion von Fahrstreifen zu kombinieren. Zur Klassifikation wird Semantic Labelling verwendet und mit einem *Markov Random Field* (MRF) verknüpft, um eine räumliche Konsistenz der Ergebnisse zu erzwingen. Die präsentierten Ergebnisse deuten aber nicht darauf hin, dass das Verfahren die beiden Quellen vorteilhaft kombinieren kann. Die erreichte Qualität ist eher schlechter als diejenige der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Ansätze, die rein aus der Fahrzeugperspektive agieren – ebenfalls ohne Kreuzungen berücksichtigen zu können.

Inferierende Verfahren

Ein Problem der oben beschriebenen Verfahren besteht darin, dass entweder keine beliebig geformten Fahrstreifen- bzw. Straßennetze bestimmt werden können (z.B. bei Künstlichen Neuronalen Netzen und bei Bayes'schen Netzen), oder dass nicht garantiert werden kann, dass die erhaltenen Informationen über das Straßennetz verkehrsregelkonform sind. Für die Generierung von AF-Karten sind beide Nachteile sehr ungünstig. Bei der konsequenten Weiterentwicklung dieser Ansätze ist es sicherlich denkbar, dass ein automatisiertes Fahrzeug in typischen Verkehrssituationen sicher und zuverlässig verkehrsregelkonform agiert. Von einem hochautomatisierten Fahrzeug muss dies aber auch in ungewöhnlichen Situationen erwartet werden können, auch dann, wenn menschliche Fahrer diese Regeln ebenfalls nicht immer konsequent befolgen oder dabei Fehler machen.

Ein Beispiel dafür bilden die zahlreichen Situationen, in denen das Überholen anderer Verkehrsteilnehmer erlaubt ist. Die Regeln unterscheiden sich beispielsweise in Deutschland innerorts und außerorts (StVO §7.3). Sie werden durch Schilder beeinflusst (StVO §5.3), unterscheiden sich je nach Verkehrsteilnehmer (LKW-Überholverbot) und können teilweise durch lokale Gegebenheiten modifiziert werden: Haltestellen (§20.3), Fußgängerüberwege (§26.3), vor und auf Kreuzungen (§19.1), bei durchgezogenen Linien, bei Linksabbiegerstreifen (§5.7), Staus (§7.2) oder Fahrbahnen mit drei Fahrstreifen (§7.3a). Die Regeln zum Überholen von Radfahrern unterscheiden sich je nach Straßensituation (§5.8).

Das Beispiel verdeutlicht die Komplexität von Regeln, die ein Fahrzeug durch regelgebende Elemente auferlegt bekommt. Kap. 4.1 setzt sich weiterführend damit auseinander. Die Regeln sind länderspezifisch und können jederzeit

aktualisiert oder durch neue Gerichtsurteile modifiziert werden. Vor diesem Hintergrund ist es unwahrscheinlich, dass ein Verfahren langfristig erfolgreich sein kann, in dem diese Verkehrsregeln nicht explizit und veränderlich hinterlegt, sondern durch lernende Verfahren implizit Teil des Algorithmus geworden sind.

Eine Alternative stellen regelbasierte, inferierende Verfahren dar, welche häufig als Teil eines Expertensystems eingesetzt werden. Solche Systeme leiten mithilfe einer Datenbasis und Wissen über diese Daten Handlungen oder Handlungsempfehlungen für Menschen ab. Diese Verfahren haben den Vorteil, dass generierte Lösungen immer konform mit der geltenden Regelbasis sind, was insbesondere für Karten eine sinnvolle Eigenschaft ist. Allerdings wird dies mit dem Nachteil erkauft, dass einmal mithilfe der Regelbasis getroffene Schlüsse nicht revidierbar sind, also keine widersprüchlichen Informationen aus unsicherheitsbehafteten Informationsquellen genutzt werden können. Sich daraus ergebende Konflikte lassen sich zwar oft erkennen, das System ist aber nicht selbst in der Lage, die Ursache des Konfliktes zu finden und zu beheben. Diese Eigenschaft macht diese Verfahren für den Einsatz im Fahrzeug ungeeignet, für die Kartierung allerdings ist dieser Nachteil akzeptabel. Es muss an anderer Stelle sichergestellt werden, dass die Eingangsdaten fehlerfrei und exakt sind, wie eben durch einen Menschen, der mit dem System interagiert.

Eine Anwendung solcher Verfahren auf den Straßenverkehr findet sich in der Arbeit von Hummel [Hum09]. Anhand von Beschreibungslogiken (DL, *description logic*) werden von Verkehrsregeln und Richtlinien abgeleitete Regeln definiert, um die Konfiguration von Fahrstreifen, also deren Verknüpfungen über eine Kreuzung hinweg, sowie deren Richtung zu bestimmen. Auch wenn als Ausgangsdatenbank bereits ein sehr stark abstrahiertes Vorwissen vorausgesetzt wurde, zeigen die Ergebnisse, dass die fehlenden Informationen meist vollständig inferiert werden können. Sie unterstreichen damit das Potenzial dieses Ansatzes.

Das wird allerdings damit erkauft, dass an vielen Stellen Vereinfachungen getroffen werden, welche die effektive Anwendung erschweren. So werden für Knotenpunkte und Straßenabschnitte unterschiedliche Regeln angewendet, ohne dass der Ansatz selbst zwischen diesen beiden Situationen unterscheiden kann. Diese Unterscheidung muss also vorweg, ggf. manuell, getroffen werden. Ebenso wird angenommen, dass die Topologie des Straßennetzes bereits vorab bekannt ist. Dazu gehört auch das Wissen darüber, von welchem Straßenarm in welche anderen Arme abgebogen werden kann und wie viele Fahrstreifen ein Arm hat. Es wird außerdem vorausgesetzt, dass ein Fahrzeug die Kreuzung auf einem bestimmten Fahrstreifen in eine bekannte Richtung befahren hat und dessen Verhalten gesetzeskonform war.

Die aufgestellte Regelbasis besteht aus fünf zentralen Regeln [Hum09, S. 90ff]:

- Jeder Fahrstreifen für Fahrzeuge muss mit mindestens einem anderen Fahrstreifen eines anderen Arms verbunden sein,
- Fahrstreifen, die nach links abbiegen, befinden sich links von solchen, die geradeaus gehen (usw.),
- jede Straße hat mindestens einen Fahrstreifen für Fahrzeuge und höchstens einen für Fahrräder,
- Straßen mit mehreren Fahrstreifen haben keine bidirektionalen Fahrstreifen und
- schmale gestrichelte Linien trennen Fahrstreifen für Fahrzeuge. Breite gestrichelte Linien trennen Fahrstreifen für Fahrzeuge von Fahrradstreifen und durchgezogene Linien grenzen Fahrstreifen in unterschiedliche Richtungen ab.

Während die ersten vier Regeln plausibel erscheinen, ist die letzte Regel nicht zutreffend. Tatsächlich trennen durchgezogene Linien oft auch Fahrstreifen, welche in dieselbe Richtung führen. An Kreuzungen werden so oft Überholverbote markiert. Außerdem ist die Aussage über schmale und breite Striche unzutreffend. Schmalstriche trennen oft auch nicht benutzungspflichtige Radwege, während Breitstriche oft – und gerade in Kreuzungsnähe –

Fahrstreifen in unterschiedliche Richtungen trennen und eben nicht ausschließlich Radwege. Für einen Einsatz auf beliebigen Kreuzungen muss die Regelbasis daher weiter generalisiert werden.

Da die Regelbasis auch kaum Aussagen über die Art und Weise trifft, in der mehrere Fahrstreifen zwei Kreuzungsarme miteinander verbinden, können Verbindungen in diesen Fällen nicht immer bestimmt werden, da dann die Zuordnung der Fahrstreifen am Eingang und Ausgang nicht klar ist. Eine Regel, die sich überkreuzende Fahrstreifen verhindert, gibt es nicht.

Trotz dieser überschaubaren und auch für Menschen leicht anzuwendenden Regelbasis und des umfangreichen Vorwissens zeigte sich die zur Evaluation verwendete Software der Aufgabe kaum gewachsen und brauchte zum Inferieren einer Kreuzung über eine Stunde [Hum09, S. 128f]. Die Implementierung einer direkt auf das Problem zugeschnittenen Software hätte die Problemlösung wohl auch mit damaliger Hardware auf Bruchteile einer Sekunde beschleunigt, denn die formulierten Regeln erfordern keine komplexen Berechnungen. Dies wäre allerdings auf Kosten der Generalisierbarkeit der Methode und bei einer weniger explizit lesbaren Regelbasis geschehen.

Dass Beschreibungslogiken als Methoden der Künstlichen Intelligenz bislang immer noch eher ein Nischendasein führen, hat sicherlich auch mit dem unverhältnismäßig hohen Rechenaufwand zu tun und erklärt, warum in vielen produktiven Expertensystemen stattdessen selbst implementierte Lösungen zum Einsatz kommen. Hinzu kommt, dass das Implementieren der Inferenzkomponente und der Regelbasis einen eher unwesentlichen Teil des Gesamtaufwandes für die Implementierung eines Expertensystems ausmacht.

Viel aufwändiger ist die Vorverarbeitung und Aufbereitung der Eingangsdaten hin zu einer für die Inferenz geeigneten Repräsentation – in diesem Fall wäre das die Detektion der Straßenabschnitte und Fahrstreifen – sowie die Nachverarbeitung und Auswertung der Ergebnisse. Denn selbst wenn die Konfiguration einer Kreuzung bekannt ist, muss erst bestimmt werden, auf welchen Wegen sich Fahrzeuge bewegen können.

Die Regelbasis selbst muss für eine flächendeckende Anwendung auf Straßennetze erweitert werden. Verkehrsschilder und deren komplexe Auswirkung auf die Interpretation einer Kreuzung oder eines Straßenabschnittes werden beispielsweise in der Literatur nur unzureichend berücksichtigt. Dass das nicht hinreichend sein kann, verdeutlicht zum Beispiel, dass ein einziges, Hunderte Meter weit entferntes Schild aus einem vermeintlichen Fahrstreifen einen Fahrradweg machen kann.

3 Karten für das automatisierte Fahren

Bislang wurden AF-Karten zwar immer wieder erwähnt, ohne jedoch genauer darauf einzugehen, was der Begriff konkret bedeutet. Auch in der Literatur findet sich dafür keine eindeutige Definition. In Kap. 1.2 wurde dazu bereits festgehalten, dass Karten Informationen über die statische Umgebung eines Fahrzeuges bereitstellen müssen, die für ein verkehrsregelkonformes Verhalten benötigt werden. Zudem sollen sie die Interpretation der beobachteten Daten erleichtern.

Das Einhalten von Verkehrsregeln ist hierbei ein wesentlicher Aspekt. Solange sichergestellt ist, dass ein Fahrzeug jederzeit die Verkehrsregeln einhält, kann es auch als sicher gelten. Über die dynamische Umgebung eines Fahrzeuges können Karten zwangsläufig keinen Aufschluss geben, aber je mehr statische Information einem Fahrzeug vorliegt, desto geringer ist das Risiko, dass während der Fahrt Fehlschlüsse gezogen werden. Karten bilden so eine Redundanzebene, die die Sensorik während der Fahrt stützt und so die Sicherheit erhöht. Vor diesem Hintergrund muss man zu dem Ergebnis kommen, dass Karten niemals zu viel Informationen enthalten können – zumindest solange sichergestellt ist, dass diese auch korrekt sind. Die Methoden zur Inferenz abstrakterer Information, etwa Kreuzungstopologien, aus unsicherheitsbehafteten Sensordaten direkt während der Fahrt werden möglicherweise noch für längere Zeit zu unzuverlässig und rechenintensiv sein (siehe auch Kapitel 2.3). Daraus folgt, dass das Interpretieren der beobachteten Informationen stattdessen auf Basis der Karte geschehen muss, welche die benötigten Interpretationen des Beobachteten bereits enthält.

3.1 Bestehende Arbeiten zu Anforderungen an Karten für automatisierte Fahrzeuge

Forschungsarbeiten, welche sich mit diesem Thema auseinandersetzen, sind erstaunlich rar. Zwar beanspruchen viele Publikationen für sich, hochgenaue Karten zu verwenden (siehe Kap. 2.1), allerdings werden hier immer genau jene Aspekte der Karte verwendet, welche für die Forschungsarbeit relevant sind, ohne sich auf eine einheitliche Definition zu stützen. Eine der wenigen Ausnahmen bildet die Arbeit von Schindler [Sch13, Kap. 5.1], die Anforderungen an AF-Karten vor dem Hintergrund einer hochgenauen Lokalisierung aufstellt. Hier wird gefordert, dass Karten Merkmale speichern müssen, welche eine Lokalisierung innerhalb der Karte ermöglichen. Als Beispiel werden hier Straßenmarkierungen, Verkehrsschilder und Pfosten genannt. Ebenso wird gefordert, dass eine Karte Aufschluss über die Beobachtbarkeit dieser Merkmale geben sollte, sodass auch Merkmale, die beispielsweise durch Bodenwellen oder Gebäude verdeckt sind, identifiziert werden können.

Als weitere Anforderungen wird in [Sch13] genannt, dass Karten Informationen enthalten müssen, um anderen Fahrzeugen ihre Fahrstreifen zuordnen zu können, sowie dass Karten für Kreuzungen Informationen bereitstellen müssen, wie etwa über Fahrstreifen und Haltelinien. Allerdings werden diese Anforderungen in der Arbeit nicht aus einer einheitlichen Überlegung hergeleitet und erheben daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

In der Arbeit zum Kartenformat *Lanelet2* [2] finden sich detaillierte Anforderungen, auf die sich die nachfolgenden Überlegungen stützen.

3.2 Arten von Regeln und Beschränkungen im Straßenverkehr

Betrachtet man exemplarisch die in Deutschland verwendeten regulatorischen Elemente [VzK17], so lassen sich folgende Arten von Verkehrsregeln und Beschränkungen identifizieren, die Fahrzeugen auferlegt werden:

- Geometrische Bewegungsbeschränkungen (durch Fahrbahn­ränder und Fahrstreifenmarkierungen),
- bedingte Bewegungsbeschränkungen (durch Überholverbote, Fahrrad/Busfahrstreifen, Haltelinien),
- Geschwindigkeitsbeschränkungen (durch außerorts/innerorts, Autobahn, Beschilderung),
- Vorfahrt, Vorrang und Nachrang (durch Schilder, Ampeln, Verkehrsregeln oder bspw. an Fußgängerüberwegen),
- Warnungen und Hinweise (z.B. Warnungen vor Gefälle oder Kurven, Wegweiser),
- Parken/Halten (z.B. Verbotsschilder, Zick-Zack-Linien, Verkehrsregeln).

Von den genannten Kategorien sind vor allem die ersten vier von unmittelbarer Bedeutung für automatisierte Fahrzeuge. Während geometrische Bewegungsbeschränkungen die Fahrstreifen oder Straßen definieren, sind die folgenden Regeln stets für eine Gesamtheit von Fahrstreifen gültig, stehen also immer in direkter Relation zu einem oder mehreren Fahrstreifen. Verkehrsregeln zum Parken und Halten sind während der Fahrt zwar nicht relevant, aber umso mehr beim Erreichen eines Ziels. Sie beziehen sich mitunter auf Fahrstreifen, beziehungsweise deren Ränder oder auch auf Flächen entlang der Straße. Da Manöver außerhalb der normalen Fahrt in dieser Arbeit nicht betrachtet werden, wird im Folgenden nicht weiter darauf eingegangen. Warnungen und Hinweise sind weiterhin für ein automatisches Fahrzeug von untergeordneter Bedeutung, da sie eher an Menschen gerichtet sind und keine verbindlichen Regeln vermitteln.

Es folgt daraus, dass für die Kartenrepräsentation Fahrstreifen das zentrale Element sind, da sich während der Fahrt alle Verkehrsregeln immer auf einen bestimmten Fahrstreifen oder auf Gruppen von Fahrstreifen (nämlich auf Fahrbahnen oder ganze Straßen beziehen, vgl. [Uni68a, Kap. 1, Art. 1]). Diese zentrale Erkenntnis wird in *Lanelet2* ausgenutzt. Dort werden atomische Fahrstreifenabschnitte (*Lanelets*) als Grundbaustein für die Repräsentation von Karteninformation verwendet.

3.3 Anwendungsbereiche für Karten

Auf Basis der vorangegangenen Überlegungen werden im Folgenden einige Anwendungsfelder von Karten im automatisierten Fahren betrachtet, um daraus konkrete Anforderungen an die Beschaffenheit von AF-Karten abzuleiten. Es handelt sich hierbei um zentrale Funktionen, die ein automatisiertes Fahrzeug beherrschen muss: Routenplanung, Detektion und Prädiktion anderer Verkehrsteilnehmer, Szenenverstehen, Verhaltensgenerierung, Bewegungsplanung, Lokalisierung, Simulation, Validierung und Sondermanöver.

Routenplanung

Routenplanung ist eine der ältesten Anwendungsgebiete von Karten für Fahrzeuge überhaupt. Die Anforderungen unterscheiden sich im automatisierten Fahren aber durch den Detailgrad. Reicht für Navigationsgeräte eine Abfolge der zu befahrenden Straßen für die Routenplanung aus, muss für automatisierte Fahrzeuge auch klar sein, welche Fahrstreifen innerhalb einer Route genutzt werden können. Bei Abbiegemanövern kann sich das Fahrzeug so

rechtzeitig auf einem richtigen Fahrstreifen einordnen und so zeitkritische Fahrstreifenwechsel „in letzter Sekunde“ vermeiden. Hierfür muss aus der Karte hervorgehen, wie viele Fahrstreifen ein Straßenabschnitt hat und wie die Relationen zwischen den einzelnen Fahrstreifen sind, ob also Fahrstreifenwechsel möglich sind und an welchen Stellen sich Fahrstreifen verzweigen oder zusammenführen. Die Karte muss also fahrstreifengenaue Routenfindung erlauben.

Fahrstreifengenaue Routenfindung kann dabei technisch fast genauso umgesetzt werden wie straßengenaue Routenfindung. Dabei wird jeder Fahrstreifenabschnitt als ein Knoten eines Graphen interpretiert. Kanten und Kantengewichte repräsentieren dann erreichbare Fahrstreifen und die im Sinne des betrachteten Routenfindungsproblems anfallenden Kosten. Für den optimalen Pfad zwischen einem Start und einem Zielpunkt wird dann typischerweise der bekannte A*-Algorithmus verwendet.

Anders als bei der Routenfindung in herkömmlichen Navigationskarten ist der Graph feiner aufgelöst und muss auch Kanten zwischen parallelen Fahrstreifen enthalten, wenn dort ein Fahrstreifenwechsel möglich ist. Ein angenehmer Nebeneffekt ist, dass für die so berechneten Routen auch sichergestellt werden kann, dass das Fahrzeug ausreichend Zeit für notwendige Fahrstreifenwechsel hat. Die Karte ermöglicht so ein frühzeitiges Einordnen auf dem richtigen Fahrstreifen.

Detektion von Verkehrsteilnehmern

Die zuverlässige Detektion anderer Verkehrsteilnehmer ist eine schwierige Aufgabe für automatisierte Fahrzeuge. Das gilt insbesondere für Fußgänger, weil sie vergleichsweise klein sind und leicht verdeckt werden. Kontextwissen kann helfen, Situationen und Stellen zu identifizieren, in denen verstärkt mit anderen Verkehrsteilnehmern gerechnet werden muss. In einer engen, mit parkenden Fahrzeugen gesäumten Straße kann es sinnvoll sein, zur Verbesserung der Sicherheit auch auf unsichere Detektionen zu reagieren und Fehlbremungen in Kauf zu nehmen, wohingegen auf Autobahnen das Gegenteil angebracht ist. Das Konzept lässt sich beliebig erweitern. Abgeflachte Bordsteine, nahegelegene Schulen und Spielstraßen sind mögliche Indikatoren für plötzlich querende Fußgänger. Grünstreifen oder Zäune für das Gegenteil. Für diese Informationen sind Karten eine effiziente und zuverlässige Quelle.

Prädiktion von Verkehrsteilnehmern

Für die Prädiktion anderer Verkehrsteilnehmer wird in der Regel ebenfalls angenommen, dass sich diese verkehrskonform verhalten. Das bedeutet also, dass diese sich entweder innerhalb ihrer Fahrstreifen bewegen oder, sofern das erlaubt ist, Fahrstreifenwechsel und Überholmanöver durchführen können. Insofern ist die Bewegungsprädiktion anderer Verkehrsteilnehmer vergleichbar mit der Verhaltensgenerierung für das eigene Fahrzeug. Allerdings gelten für andere Verkehrsteilnehmer möglicherweise andere Verkehrsregeln, insbesondere wenn es sich hierbei um einen Bus oder ein Fahrrad handelt. Aus einer Karte müssen also auch die Fahrstreifen und Verkehrsregeln hervorgehen, denen andere Verkehrsteilnehmer zu folgen haben. Technisch betrachtet gibt es also nicht nur einen Routengraph, der aus der Karte hervorgeht, sondern mehrere. Das erfordert eine Trennung zwischen der eigentlichen Karteninformation und deren Interpretation im Hinblick auf einen bestimmten Verkehrsteilnehmer.

Die Interpretation kann dabei durchaus unterschiedlich ausfallen. Beispielsweise benutzen Fußgänger zwar Fußwege und Fußgängerüberwege, aber queren manchmal auch spontan eine Straße, ohne dass dies gekennzeichnet wäre. Während es möglicherweise sinnvoll ist, Stellen zu kartieren, an denen das gehäuft passiert, kann es nicht zielführend sein, jede erdenkliche Situation in die Karte aufzunehmen. Abrupte Bremsmanöver, bspw. wegen plötzlich querender Fußgänger müssen auch ohne Karteninformation einkalkuliert werden.

Ähnlich verhält es sich bei Radfahrern, die zwar bevorzugt Radfahrstreifen benutzen, diese aber unerwartet verlassen können, etwa um abzubiegen oder auf den Fußweg zu fahren. Fahrradfahrer können sich in dieser Hinsicht spontan wie normale Fahrzeuge oder auch Fußgänger verhalten, was ebenfalls nicht in einer Karte abgebildet kann, und deshalb immer einkalkuliert werden sollte.

Szenenverstehen

Mit Szenenverstehen sind alle Verfahrensschritte gemeint, bei denen die Beobachtungen eines Fahrzeuges mit anderen Beobachtungen oder der Karte in Bezug gebracht werden. Beispielsweise, welche Fahrzeuge anderen Fahrzeugen folgen, ob eine Gruppe Fußgänger an einer Ampel wartet, oder welche Fahrzeuge anderen Fahrzeugen Vorfahrt gewähren müssen. Wie in Kap. 2.2 erwähnt, sollten Karten hierfür die wesentlichen Informationen bereitstellen, sodass während der Fahrt die statischen Bestandteile einer Szene nicht mehr zueinander in Bezug gesetzt werden müssen, um Informationen über die Situation zu inferieren. Eine Karte muss daher die enthaltenen Elemente semantisch verknüpfen: Welche Ampeln steuern welchen Fahrstreifen, welche Fahrstreifen müssen anderen Fahrstreifen Vorfahrt gewähren, auf welchen Flächen warten Fußgänger typischerweise an einer Ampel, etc.?

Verhaltensgenerierung

Verhaltensgenerierung ist die Aufgabe, aus einer beobachteten Szene und den eigenen Fahrtzielen konkrete Handlungsoptionen in Form von Fahrmanövern abzuleiten. Dazu gehören beispielsweise Überholmanöver oder Einschermanöver. Die möglichen Handlungsoptionen auf einer Route müssen aus der Karte hervorgehen. Beispielsweise, an welchen Stellen ein Überholen erlaubt ist und wie lang die Überholmöglichkeit ist oder an welchen Stellen genau Fahrstreifen enden und somit ein Fahrstreifenwechsel zwingend erforderlich ist. Ähnlich wie bei der Prädiktion anderer Verkehrsteilnehmer ist hierfür umfangreiches Wissen über die Beziehungen der Fahrstreifen zueinander erforderlich. Auch Verkehrsregeln müssen der Karte entnommen werden, wie etwa Überholverbote und Geschwindigkeitslimits. Diese können zwar auch oft während der Fahrt erkannt werden, jedoch nicht mit Sicherheit. Die komplexen Regeln, ab wann ein Geschwindigkeitslimit oder Überholverbot aufgehoben ist, erfordern darüber hinaus erneut Inferenzmethoden, wobei ebenfalls vermieden werden sollte, dass diese sich allein auf Sensordaten stützen müssen.

Bewegungsplanung

Bewegungsplanung bezeichnet die Aufgabe, aus einem vorgegebenen Fahrmanöver konkrete Steuerbefehle für das Fahrzeug herzuleiten. An dieser Stelle wird aus einer bislang rein topologischen Betrachtung in der Verhaltensgenerierung eine geometrische: Es müssen Steuersignale gefunden werden, mit denen ein Fahrzeug innerhalb eines geforderten Korridors bleibt, ohne mit anderen Verkehrsteilnehmern zu kollidieren und ohne dabei Geschwindigkeitsvorgaben zu verletzen. Die Basis hierfür bilden ebenfalls Informationen über Fahrstreifengeometrien aus der Karte und ermöglichen so eine genaue Bewegungsplanung innerhalb eines Korridors. So können auch in den Fahrstreifen hineinragende Hindernisse umfahren werden, ohne den übrigen Verkehr durch Verlassen des Fahrstreifens zu gefährden.

Lokalisierung

Je höher eine Karte aufgelöst ist, desto größere Anforderungen stellt dies an die Lokalisierung, denn damit das Wissen in einer Karte sinnvoll genutzt werden kann, muss auch die Position darin mit vergleichbarer Präzision bestimmt werden können. Idealerweise entstammen die Merkmale, welche für die Positionsbestimmung genutzt werden, selbst wieder der Karte. So kann sichergestellt werden, dass die Positionsbestimmung mit der Karte konsistent ist. In diesem Fall muss die Karte Elemente enthalten, welche für die Positionsbestimmung geeignet sind, indem sie leicht detektiert werden können und in hoher Dichte zur Verfügung stehen. Dafür kommen die ohnehin genutzten Fahrstreifen bzw. Fahrbahnränder in Frage, aber auch Objekte, welche oft entlang der Straße vorkommen, wie etwa Pfosten, Fassaden oder Bäume. Darüber, dass eine solche Lokalisierung möglich und hinreichend genau sein kann, gibt es bereits einige Arbeiten [3, SKF13, VBC⁺18].

Eine andere Anforderung in diesem Zusammenhang ist eine möglichst korrekte Georeferenzierung der Karte, sodass beispielsweise über globale Satellitennavigationssysteme bestimmte Fahrzeugpositionen zur Karte passen. Da allerdings auf diese Weise bestimmte Positionen insbesondere in der Innenstadt um mehrere Meter abweichen können, ist ein solches Verfahren für eine genaue Lokalisierung allein nicht geeignet. Wichtiger ist daher die Anforderung, dass Karten überall gleichermaßen längentreu und winkeltreu sind, also keine großen lokalen Verzerrungen enthalten. Auch wenn dies selbstverständlich erscheint, bedeutet die Erstellung längen- und winkeltreuer Karten, die zugleich innerhalb einer gewissen Toleranz global korrekt sind, einen hohen Aufwand.

Simulation

Die Simulation automatisierter Fahrzeuge ist für die Entwicklung von Algorithmen von hoher Bedeutung. Die Funktionsfähigkeit eines Systems kann in Simulationsumgebungen viel effektiver untersucht werden, weil dafür kein Personal erforderlich ist und keine Sicherheitsrichtlinien zu beachten sind und kritische Situationen unkompliziert je nach Bedarf getestet werden können. Je höher der Detailgrad der Karten ist, desto mehr Teilsysteme eines Fahrzeugs lassen sich auf Basis dieser Karten validieren. Dies ist umso aussagekräftiger, da die Karten gleichzeitig reale Straßen abbilden und so die Systeme so realitätsnah wie möglich getestet werden können. Kritische Situationen, die auf einer bestimmten Strecke entstehen könnten, lassen sich identifizieren, ohne sie überhaupt befahren zu müssen.

Validierung

Eine der größten Herausforderungen bei dem Fahren mit hochgenauen Karten ist der Umgang mit baulichen Veränderungen, welche zu Abweichungen zwischen Karte und realer Welt führen. Um zu vermeiden, dass dies zu Problemen führt, muss ein Fahrzeug kontinuierlich prüfen, ob die beobachtete Information mit der Karte konsistent ist. Ist dies nicht der Fall, bedeutet das, dass entweder die Qualität der Beobachtungen beispielsweise infolge eines Sensorausfalls schlecht ist oder dass die Karte nicht mehr valide ist. In beiden Fällen kann dann die Sicherheit des Fahrzeuges nicht mehr gewährleistet werden.

Damit es möglich ist, Karten zu validieren, müssen Informationen der Karte nachvollziehbar sein. Diese Nachvollziehbarkeit ist nur sichergestellt, wenn klar ist, wie beobachtbare Elemente der Karte und daraus abgeleitete Informationen zusammenhängen. Ist beispielsweise ein Verkehrsschild nicht mehr zu beobachten, so sollte daraus gefolgert werden können, dass die durch das Verkehrsschild ausgedrückte Verkehrsregel nicht mehr existiert, sofern sie nicht an anderer Stelle wiederholt wird. Im Idealfall kann dann während der Fahrt bestimmt werden, welche Konsequenzen das fehlende Schild hat. Unter Umständen ist die durch das Schild ausgedrückte Information im

aktuellen Fahrzustand gar nicht relevant und die Kartenabweichung kann als unkritisch betrachtet werden. Eine Karte darf also nicht nur Verkehrsregeln beinhalten, es muss auch klar sein, woher diese Verkehrsregeln kommen.

Sondermanöver

Parken und Notfallmanöver werden bei dem Aufgabenspektrum eines automatisierten Fahrzeuges oft vergessen. Dennoch sind sie wichtig, da eine vollautomatisierte Fahrt zwangsläufig mit einem Park- oder Haltemanöver endet. In Notfallsituationen – beispielsweise bei einem Ausfall der Fahrzeugsensorik, einer Panne, oder um einem anderen Fahrzeug auszuweichen – muss ein Fahrzeug in der Lage sein, einen sicheren Zustand abseits der üblichen Fahrstreifen zu erreichen. Auch diese Information muss durch die Karte zur Verfügung gestellt werden, da die Sensorik eventuell nicht mehr genügend Informationen dazu bereitstellen kann. Um Sicherheit über alle Fahrzustände hinweg zu gewährleisten, darf eine Karte also nicht auf Fahrstreifen beschränkt sein, sie muss auch Informationen über potentiell befahrbare Flächen seitlich der Straße liefern.

Aber auch für weniger kritische Situationen muss eine Karte eine Rückfallebene bilden: Zum Ausweichen auf die Gegenfahrbahn beim Umfahren von Baustellen und Hindernissen, zum Ausweichen auf den Fußweg, um Fahrzeuge in Engstellen passieren zu lassen oder für Wendemanöver. In allen Fällen wird Information jenseits der standardmäßig vorgesehenen Fahrstreifen benötigt.

Tatsächlich ist diese Aufgabe sehr ähnlich zu der geforderten Kompatibilität der Karte mit unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern. Ein ausweichendes Fahrzeug wird temporär zu einem anderen Verkehrsteilnehmertyp, interpretiert die Karteninformation auf eine andere Art und gewinnt daraus einen anderen Routengraphen für die Bestimmung möglicher Pfade. Damit das möglich ist, müssen die Karteninformationen stark miteinander verknüpft sein. Nur wenn bekannt ist, dass die Gegenfahrbahn direkt an die aktuelle Fahrbahn angrenzt, kann gefolgert werden, dass sie für Manöver zur Verfügung steht.

3.4 Anforderungen für Karten und Repräsentation

Insgesamt ergeben sich so die folgenden Anforderungen für AF-Karten, welche bei der Generierung der Karte erfüllt werden sollten:

- Längen- und Winkeltreue,
- Nachvollziehbarkeit der Informationen,
- Verknüpfung der Verkehrsregeln mit den Fahrstreifen, die sie betreffen,
- Beobachtbarkeit möglichst vieler in der Karte enthaltener Elemente,
- Verkehrsregeln für alle Verkehrsteilnehmer,
- Informationen über die Fahrstreifen und mögliche Fahrstreifenwechsel,
- Informationen über befahrbare Flächen jenseits der Fahrstreifen sowie die genaue Geometrie der einzelnen Fahrstreifen.

In dem Kartenformat *Lanelet2* werden die Anforderungen an die Verknüpfung der Informationen durch ein hierarchisches Modell gelöst (siehe Abb. 3.1). Auf der einfachsten Ebene, welche die *physische Ebene* genannt wird, besteht die Karte aus einzelnen Punkten, die Polygonzüge (*Linestrings*) bilden. Dabei wird zugelassen, dass dersel-

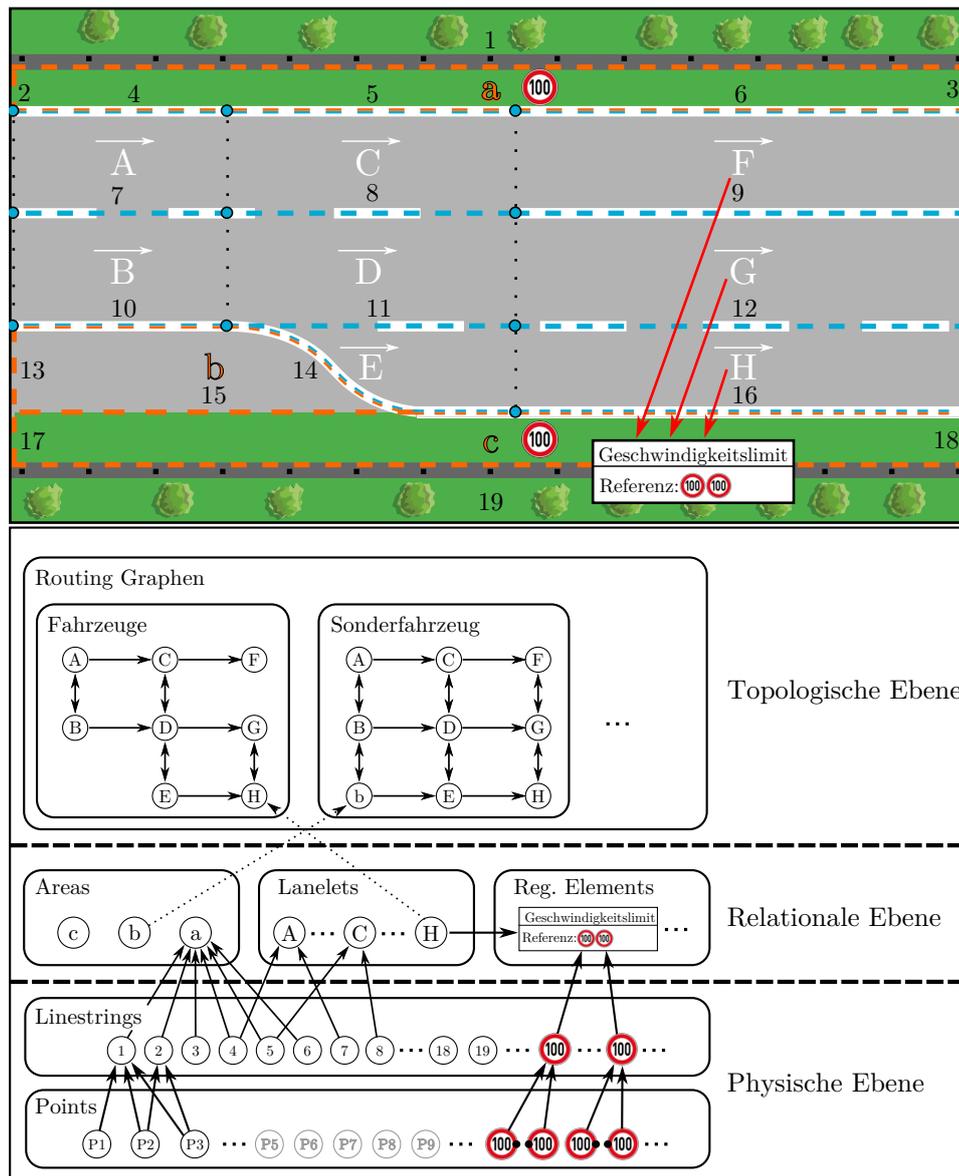


Abbildung 3.1: Modell von Lanelet2 zur Repräsentation von Kartendaten. Oben: Geometrische Repräsentation, unten: Verknüpfung der Informationen (aus [2])

be Punkt Teil unterschiedlicher Polygonzüge sein kann. Polygonzügen können zusätzlich Eigenschaften zugewiesen werden, sodass hinterlegt werden kann, welches physische Objekt der Polygonzug repräsentiert, beispielsweise eine Markierung. Da diese Elemente von Sensoren beobachtet werden können, lassen sich die Elemente dieser Ebene zur Lokalisierung, Validierung oder Simulation nutzen. Je mehr Elemente eine Karte enthält, die dafür genutzt werden können, desto genauer fällt das Ergebnis aus.

Polygonzüge bieten sich als Repräsentationsform an, weil sie eine kompakte und homogene Darstellung der abzubildenden Primitive erlauben und lediglich durch eine Abfolge von Punkten repräsentiert werden können. Weil Straßen oft über Kilometer keine nennenswerte Krümmung aufweisen, können beispielsweise Autobahnabschnitte über einige Kilometer durch ein einzelnes Liniensegment dargestellt werden, ohne dass die entstehende Ungenauigkeit den einstelligen Zentimeterbereich übersteigt. Durch Erhöhen der Diskretisierung lassen sich Formen bei Bedarf beliebig genau annähern. Gegenüber Polynomzügen (*Splines*) können sie wegen ihrer expliziten Darstellung effizienter in geometrischen Berechnungen verwendet werden.

Aus den Polygonzügen setzen sich dann die Objekte der *relationalen Ebene* zusammen: Fahrstreifenabschnitte (Lanelets), Flächen (Areas) und Verkehrsregeln (Regulatory Elements). Dabei wird ebenfalls zugelassen, dass ein Polygonzug mehrfach verwendet werden kann. Ein Lanelet besteht aus exakt zwei solcher Polygonzüge, von denen einer den linken, der andere den rechten Rand definiert, wodurch ebenfalls die Fahrtrichtung festgelegt ist. Areas bestehen aus einer zusammenhängenden Kette von Polygonzügen, die zusammen ein geschlossenes Polygon formen. Regulatory Elements referenzieren Polygonzüge, die beispielsweise Verkehrsschilder darstellen, und verknüpfen diese mit weiteren Informationen über die von ihnen repräsentierte Verkehrsbeschränkung. Einem Lanelet oder Area kann ein Regulatory Element zugeordnet werden, was ausdrückt, dass es von einer Verkehrsregel betroffen ist.

Die Tatsache, dass ein Lanelet einen atomischen Fahrstreifenabschnitt darstellt – also einen Abschnitt entlang dessen dieselben Verkehrsregeln gelten – macht es erforderlich, einen Fahrstreifen in zwei Lanelets zu unterteilen, wenn beispielsweise der Typ des Randes wechselt. Denn dann kann ja die Möglichkeit eines Fahrstreifenwechsels hinzukommen.

Da ein Lanelet aus demselben Grund nur je einen seitlichen Nachbarn haben kann, müssen also alle lateral angrenzenden Lanelets einer Straße ebenfalls geteilt werden. So ergibt sich über den Straßenverlauf hinweg automatisch ein regelmäßiges Gitter aus Lanelets, wie auch in Abb. 3.1 zu sehen.

Die Eigenschaft, dass Primitive der physischen Ebene mehrfach verwendet werden, wird nun ausgenutzt, um Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Objekten auszudrücken: Zwei Lanelets, die sich einen Punkt teilen, müssen folglich benachbart sein. Auf Basis dieser Informationen kann dann der Fahrstreifengraph für einen bestimmten Teilnehmer erzeugt werden.

In Abb. 3.1 bedeutet das am Beispiel eines Autos, dass ausgehend vom Lanelet B nacheinander die Lanelets D und G befahren werden können, während Fahrstreifenwechsel auf die Lanelets A, C, E und H möglich sind. Zum Lanelet F ist kein direkter Fahrstreifenwechsel möglich, weil dies durch die durchgezogene Linie unterbunden wird. Wird stattdessen der Routengraph für ein Fahrzeug mit Sonderrechten (bspw. Krankenwagen) generiert, wäre dort dagegen ein Fahrstreifenwechsel möglich. All diese Informationen können in *Lanelet2* automatisiert und allein aus den Nachbarschaftsbeziehungen der Lanelets und den Eigenschaften der Ränder abgeleitet werden.

Die Darstellungsform auf der Basis von Lanelets reduziert die Kartenerzeugung auf das Problem, korrekt parametrisierte Fahrstreifen sowie gültige Verkehrsregeln zu bestimmen und den Fahrstreifen zuzuordnen. Zusätzlich muss die Information über den Typ der Fahrstreifenränder aus den Eingangsdaten generiert werden. Ähnliches gilt für die Bereiche abseits der Fahrbahn, da Fußgängerwege und Fahrradwege auf dieselbe Art durch Lanelets beschrieben werden können.

4 Straßengestaltung

Im vorausgegangenen Kapitel wurde erläutert, welche Informationen Kartenformate für das automatisierte Fahren brauchen und wie sie dargestellt werden können. Es wurden also die Anforderungen an das Ausgabeformat eines Kartengenerierungs-Verfahrens beschrieben.

Da die Hauptaufgabe eines Verfahrens zur Bestimmung dieser Karteninformation im Wesentlichen darin besteht, Verkehrsregeln mit den Eingangsdaten – also den regelgebenden Merkmalen – zu kombinieren, soll in diesem Kapitel dargestellt werden, welche Eingangsdaten und Verkehrsregeln dafür relevant sind. Um zu gewährleisten, dass die geforderten Eingangsdaten überhaupt geeignet sind, das im Straßenverkehr benötigte Kartenwissen zu repräsentieren, muss untersucht werden, welche Informationen dafür nötig sind und wie sie dargestellt werden können. In Kap. 2.2 wurde dargelegt, was aktuelle *Computer Vision*-Verfahren zu leisten imstande sind. Diese Erkenntnisse sollen nun genutzt werden, um sicherzustellen, dass Möglichkeiten existieren, die benötigten Eingangsdaten zu generieren.

Damit nun Verkehrsregeln auf die Eingangsdaten angewendet werden können, wird ein Modell darüber benötigt, wie Straßen aufgebaut sind und auf welche Weise Verkehrszeichen Verkehrsteilnehmer beeinflussen. Dieses Modell bildet dann das Fundament des in den folgenden Kapiteln entwickelten Verfahrens. Wie sich allerdings zeigen wird, kann ein solches Modell nur teilweise aus Verkehrsregelwerken abgeleitet werden, welche ebenfalls in diesem Kapitel behandelt werden sollen.

Zusätzlich müssen auch Vereinfachungen getroffen werden, die dazu führen, dass Straßengestaltungsformen ausgeschlossen werden, die zwar theoretisch möglich und verkehrsrechtlich zulässig sind, aber selten bis nie genutzt werden. Sie zu berücksichtigen, würde den hier vorgestellten Ansatz unmäßig verkomplizieren. In Kap. 8 wird untersucht, inwiefern die getroffenen Vereinfachungen zumindest im Hinblick auf den Evaluationsdatensatz angemessen sind.

4.1 Anwendbarkeit von Verkehrsregelwerken

Die Regelwerke für den Straßenverkehr sind in einer hierarchischen Struktur aufgebaut. Die oberste Ebene bilden internationale Vereinbarungen, nämlich das *Übereinkommen über den Straßenverkehr* [Uni68a] und das *Übereinkommen über Straßenverkehrszeichen* [Uni68b]. Diese Vereinbarungen wurden von fast allen Ländern unterschrieben, eine prominente Ausnahme bilden die Vereinigten Staaten von Amerika. Die Regelwerke sollen internationale Standards schaffen, um ausländischen Fahrern die Umstellung zu erleichtern. Für den Straßenverkehr relevante Begriffe werden definiert und Vorgaben gemacht, welche die nationale Verkehrsgesetzgebung berücksichtigen muss. Dabei handelt es sich insbesondere um Vorgaben für die Gestaltung von Fahrzeugen, die Gestaltung der Straße sowie für die international einheitliche Gestaltung und Bedeutung von Verkehrszeichen.

Es finden sich auch Definitionen für die Begriffe *Straße*, *Fahrbahn*, *Fahrstreifen* und *Kreuzung* [Uni68a, Kap. 1, Art. 1], wobei *Straße* als „die gesamte Fläche jedes dem öffentlichen Verkehr dienenden Weges“ definiert wird. Fahrbahnen sind Teile von Straßen und Fahrstreifen sind wiederum definiert als Teile von Fahrbahnen, wobei ein

Fahrstreifen nicht durch Ränder begrenzt sein muss. Wodurch ein Fahrstreifen in diesem Fall definiert ist, wird nicht deutlich gemacht. Ebenfalls ist nicht definiert, was ein Weg ist.

Kreuzungen werden als Plätze der „Kreuzung, Einmündung oder Gabelung von Straßen“ definiert [Uni68a, Kap. 1, Art. 1h], wobei nicht festgelegt wird, wodurch die Fläche dieses Platzes begrenzt wird. Darüber hinaus handelt es sich bei der Definition um einen Zirkelschluss. Zwar handelt es sich bei juristischen Texten nicht um ein geschlossenes, formales System im mathematischen Sinne. Dennoch sind diese Ungenauigkeiten bei der Modellierung problematisch. Insbesondere die Tatsache, dass ein Fahrstreifen nicht exakter definiert ist, führt zu zahllosen Unklarheiten bei allen darauf aufbauenden Verkehrsregeln, wie sich im Folgenden zeigen wird.

Auf nationaler Ebene ist in Deutschland bekanntermaßen die Straßenverkehrsordnung (StVO) das oberste Regelwerk für den Straßenverkehr. Neben den eigentlichen Regelungen enthält die StVO drei Anlagen, in welchen die gültigen Verkehrszeichen beschrieben sind. Ergänzend dazu gibt es die ebenfalls rechtsverbindliche Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur StVO (VwV-StVO), welche unklare Formulierungen der StVO für die Verkehrsbehörden präzisiert. Zusätzlich gibt es noch Richtlinien, die bestimmte Aspekte der Straßengestaltung weiter präzisieren. Besondere Bedeutung hat die Richtlinie für die Markierung von Straßen (RMS) [For80], welche die VwV-StVO als verbindliches Regelwerk festlegt. Abweichungen dürfen nur von der obersten Verkehrsbehörde genehmigt werden [For80, Teil 1, Kap. 1.1]. Weiterhin existieren noch Richtlinien, welche den aktuellen Stand der Technik bei der Straßengestaltung dokumentieren und nicht bindend sind, wie etwa die Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen, Landstraßen und Autobahnen (RASt, RAL und RAA). Ältere Straßenbauwerke entsprechen diesen Richtlinien aber oft nicht und auch neuere Bauwerke entsprechen diesen nur, sofern es die Gegebenheiten erlauben.

Die in den internationalen Richtlinien festgehaltenen Definitionen von beispielsweise Straßen und Kreuzungen werden in der nationalen Gesetzgebung nicht einheitlich übernommen, auch wenn diese Begriffe nirgends explizit definiert werden. Eine „Straße“ bezeichnet hier nicht eine Gesamtfläche, sondern eher eine über mehrere Kreuzungen hinweg führende Kette von einzelnen Wegen. Dabei können auch parallel zueinander verlaufende, baulich getrennte Wege als eine Straße gelten, etwa die Richtungsfahrbahnen einer Autobahn, selbst wenn diese stellenweise Hunderte Meter entfernt sind.

Aus technischer Sicht ist diese Definition problematisch, da an einer Kreuzung keineswegs immer eindeutig ist, welche angrenzenden Wege zusammen eine Straße im Sinne der StVO bilden. Das ist vor allem dann der Fall, wenn bei Straßen mit Richtungsfahrbahnen an einer Kreuzung häufig vier Wege zur derselben Straße gehören.

Fahrbahnen und Fahrstreifen

StVO und VwV-StVO präzisieren und ergänzen die oben beschriebene Hierarchie aus Straße, Fahrbahn und Fahrstreifen, indem sie darlegen, dass Fahrbahnen neben Fahrstreifen auch Sonderfahrstreifen und Schutzstreifen für Radfahrer einschließen können. Neben Fahrbahnen können zu Straßen auch Sonderwege (Fußwege und Radfahrstreifen) gehören. Radfahrstreifen sind also nicht Teil der Fahrbahn (StVO §1 Abs. 1) und dürfen, anders als Schutzstreifen, nicht von Fahrzeugen befahren werden. Sonderfahrstreifen sind dagegen Fahrstreifen, die dem Bus- und ggf. dem Taxiverkehr und Radfahrern vorbehalten sind. Schließlich werden in der StVO noch Sperrflächen und Seitenstreifen beschrieben, welche nicht, bzw. nur aufgrund von expliziter Freigabe, befahren werden dürfen (StVO zu Zeichen 298 und Zeichen 223). Abb. 4.1 fasst diesen Sachverhalt zusammen. Fußgänger und Radfahrer müssen Radwege und Gehwege verwenden, sofern vorhanden. Falls nicht, darf die Fahrbahn genutzt werden (StVO §25, Abs. 1). Fahrzeuge dürfen hingegen nur Fahrstreifen verwenden, sofern nicht explizit anders geregelt. Auch wenn das normalerweise nicht so angewendet wird, gibt es aber keine Pflicht, innerhalb von markierten Fahrstreifen zu fahren, solange andere Verkehrsteilnehmer nicht gefährdet sind (StVO zu Zeichen 340).

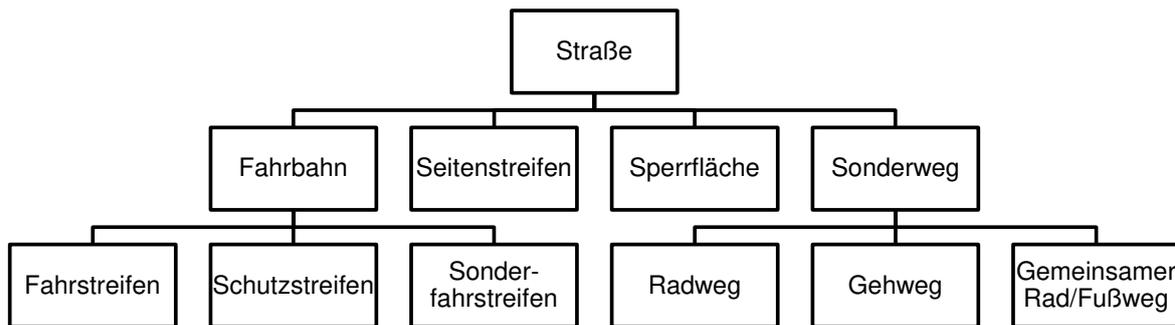


Abbildung 4.1: Hierachische Struktur der Bestandteile einer Straße

So klar diese Struktur ist, so unklar ist stellenweise die Definition, wie die Bereiche aus Abb. 4.1 erkannt werden können und wie sie abgegrenzt sind. Generell werden zur Abgrenzung verschiedene Typen unterschieden: Bauliche Trennungen, durchgezogene Linien (Zeichen 295), Doppellinien (ebenfalls Zeichen 295), einseitig durchgezogene Linien (Zeichen 296) und gestrichelte Linien (Zeichen 340). Gestrichelte und durchgezogene Linien werden dabei nochmals in Breitstriche und Schmalstriche unterteilt. Bauliche Trennungen bzw. Einrichtungen sind ein Überbegriff für alles, was nicht zur befestigten Straßenfläche gehört. Dazu gehören etwa Bordsteine, Leitplanken oder das Ende der befestigten, asphaltierten Straße.

Es ist zwar klar geregelt, welche Abgrenzungen in einer bestimmten Situation verwendet werden dürfen, aber leider können die selben Abgrenzungen für unterschiedliche Situationen verwendet werden, sodass deren Interpretation mehrdeutig wird. Beispielsweise trennen Breitstriche Fahrbahnen, Seitenstreifen, Sperrflächen und Sonderwege voneinander sowie Fahrstreifen von Sonderfahrstreifen [For80, Teil 1, Kap. 2.1.2]. Durchgezogene Schmalstriche können alles von allem trennen. Doppellinien trennen nur Fahrstreifen in entgegengesetzter Richtung voneinander. Einseitig durchgezogene Linien begrenzen nur Fahrstreifen. Gestrichelte Linien trennen ebenfalls nur Fahrstreifen oder Schutzstreifen für Radfahrer, die einzige Ausnahme – und hier widerspricht die RMS der StVO – sind Fahrbahnen in der Nähe von Knotenpunkten, welche durch gestrichelte Breitstriche von anderen Fahrbahnen und Radwegen getrennt werden dürfen. In dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt werden Markierungen für den Richtungswechselbetrieb, also Fahrstreifen, die dynamisch nach Verkehrslage ampelgesteuert die Richtung ändern.

Weil mit diesen Regelungen nicht unterschieden werden könnte, ob zwei Fahrstreifen in unterschiedliche Richtungen links und rechts einer durchgezogenen Linie zu zwei Fahrbahnen gehören oder zu einer, regelt die VwV-StVO (zu §2, Absatz 1, Ziffer I), dass nur bauliche Einrichtungen Fahrbahnen in unterschiedliche Richtungen trennen dürfen. In allen anderen Fällen handelt es sich um mehrere Fahrstreifen derselben Fahrbahn.

Da Berandungen also kein eindeutiges Indiz sind, um welchen Abschnitt der Straße es sich handelt, werden Schilder und Symbole zur Präzisierung verwendet. Sonderfahrstreifen für Busse werden durch ein entsprechendes Schild gekennzeichnet (Zeichen 245), welches zusätzlich auch Fahrräder oder Taxis zulassen kann. Schutzstreifen werden durch ein Fahrradsymbol auf der Straße markiert. Radwege werden durch ein Fahrradschild (Zeichen 237) gekennzeichnet, gemeinsam genutzte Rad- und Fußwege ebenfalls (Zeichen 240 und 241). Fußwege werden hingegen nur dann explizit durch Zeichen 239 ausgewiesen, wenn sich der Zweck „nicht aus dessen Ausgestaltung ergibt“ (VwV-StVO zu Zeichen 239). Was genau diese Ausgestaltung ist, wird nicht weiter ausgeführt.

Schließlich verbleiben noch Fahrstreifen und Seitenstreifen, für die es keine explizite Beschilderung gibt. Seitenstreifen sind demzufolge nur deswegen von normalen Fahrstreifen unterscheidbar, weil sie nicht erreicht werden können, ohne eine durchgezogene Linie zu queren. Zur Abgrenzung von Fahrstreifen zueinander hält die StVO schließlich die folgende Definition bereit: „Fahrstreifen ist der Teil einer Fahrbahn, den ein mehrspuriges Fahrzeug

zum ungehinderten Fahren im Verlauf der Fahrbahn benötigt“ (StVO §7, Abs. 1), was offensichtlich unbefriedigend ist.

Die Richtungen, in die Fahrzeuge auf Fahrstreifen fahren dürfen, werden in der StVO nicht explizit festgelegt. Stattdessen wird geregelt, dass Fahrzeuge im Zweifel den rechtsäußeren Fahrstreifen benutzen sollen. Welche anderen Fahrstreifen genutzt werden dürfen, hängt von der Anzahl der Fahrstreifen ab. Ist eine Straße nur in eine Richtung befahrbar oder Teil einer Autobahn, ist klar, dass alle Fahrstreifen auch nur eine Richtung haben können. Dass eine Straße nur in einer Richtung befahrbar ist, wird aber nur an Kreuzungen etwa durch ein Einbahnstraßenschild, manchmal auch nur durch ein Schild wie „hier rechts“ geregelt. Bei Straßen mit Grünstreifen in der Mitte müsste der Fahrer erkennen, dass es sich bei der Fahrbahn auf der anderen Seite des Streifens um dieselbe Straße handelt, um daraus zu folgern, dass er sich auf einer Richtungsfahrbahn befindet.

Ist ein Straßenabschnitt in mehrere Richtungen befahrbar, kommt es auf die Anzahl der Fahrstreifen an, sofern es keine durchgezogenen Linien gibt. Bei einem Fahrstreifen, dürfen Fahrzeuge nur am rechten Rand fahren. Sind es zwei, ist der linke dem Gegenverkehr vorbehalten (StVO §2 Abs. 2), darf aber zum Überholen genutzt werden (StVO §5 Abs. 1). Sind es drei, ist der linke dem Gegenverkehr vorbehalten und die Mitte kann in beide Richtungen zum Linksabbiegen, aber nicht zum Überholen genutzt werden (StVO §7 Abs. 3a). Auch für mehr als drei Fahrstreifen finden sich Vorschriften, die Liste ließe sich also fortsetzen. Davon abweichend schreibt die VwV-StVO aber vor, dass der Verkehr auf Straßen mit mehr als einer Fahrbahn pro Richtung in der Regel mit einer durchgezogenen Linie oder einer Doppellinie getrennt werden soll (VwV-StVO zu Zeichen 340), was die Regelungen zu Straßen mit mehr als drei Fahrstreifen faktisch überflüssig macht.

In der Praxis erschließen sich die Fahrtrichtungen für Verkehrsteilnehmer eher aus dem Straßenverlauf, indem auf Kreuzungen sichergestellt wird, dass Fahrzeuge nicht in Straßen oder Fahrstreifen abbiegen, die sie nicht befahren sollen. Daher stellt sich die Frage nach der Fahrtrichtung für Fahrzeuge in der Regel nicht, in Einzelfällen aber eben schon, etwa wenn ein Fahrzeug über eine Grundstücksausfahrt auf die Fahrbahn fährt.

Verkehrsschilder

So zentral Verkehrsschilder dafür sind, herauszufinden, um welche Art von Straßenabschnitt es sich handelt, so schwierig gestaltet sich deren Zuordnung zu einem Straßenabschnitt. Tatsächlich wird in der StVO nicht in allen Fällen geregelt, wie ein Verkehrsteilnehmer bestimmen kann, auf welchen Teil der Straße sich ein Schild bezieht. Insbesondere Schilder für Radwege und Busstreifen dürfen neben diesen aufgestellt werden, was die Zuordnung erschwert. Bei parallel verlaufenden Straßen können Fehlzusordnungen ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Sie werden nur dadurch erleichtert, dass Schilder nur dann links der Straße aufgestellt werden dürfen, wenn Fehlzusordnungen ausgeschlossen sind (VwV-StVO zu §§39-43, Rdnr. 28ff), außerdem müssen sie rechtwinklig zur Straße neben der Fahrbahn aufgestellt werden. Über einem Fahrstreifen angebracht gelten sie nur für diesen, sonst für alle Fahrstreifen, es sei denn, Verwechslungen sind ausgeschlossen (ebenda).

Der Gültigkeitsbereich von Verkehrsschildern ist ebenfalls nicht immer eindeutig geregelt, wie bereits in Kap. 2.3 erwähnt. In der StVO werden beispielsweise Geschwindigkeitsbeschränkungen und Überholverbote den Streckenverbotten zugerechnet, welche so lange gelten, bis diese Strecke endet oder sie durch ein Schild aufgehoben werden. Sie müssen nicht zwangsläufig an Kreuzungen wiederholt werden. In diesem Punkt widerspricht die gängige Rechtsprechung auch den internationalen Vereinbarungen, welche vorschreiben, dass Verkehrsschilder nach jeder Kreuzung wiederholt werden müssen [Uni68a, Art. 13.3]. Von ortskundigen Fahrern wird erwartet, dass sie diese Verbote berücksichtigen, auch wenn sie beim Einbiegen auf die Strecke kein Schild passiert haben (Urteil OLG Düsseldorf 18.03.1988 - 5 Ss (OWi) 96/88). Was genau eine Strecke ist, ist nicht festgelegt, im Allgemeinen wird

aber angenommen, dass dies identisch mit dem Verlauf der Vorfahrtsstraße ist, das heißt, es gilt im Zweifel auch so lange, wie die betroffene Straße Vorfahrt hat.

Kreuzungen

Die exakte Definition des Kreuzungsbereichs existiert trotz einer Vielzahl von darauf aufbauenden Regelungen nicht. Die eingangs erwähnte internationale Definition eignet sich nur dafür, Orte zu identifizieren, an denen Kreuzungen sind, aber nicht dazu, deren Dimension festzustellen. Eine Definition dazu fehlt in der StVO. Die auf Gerichtsurteilen aufbauende Definition in der Literatur zum Verkehrsrecht ist entsprechend komplex und geprägt von vielen Einzelfallentscheidungen [KD13, S. 538].

Ebenfalls ist nicht klar geregelt, exakt welche Abbiegemöglichkeiten Fahrzeuge auf einem Fahrstreifen einer bestimmten Kreuzung nutzen dürfen. Das beginnt damit, dass gar nicht genau definiert ist, wo eine Kreuzung beginnt und wo sie endet. Gerade in Innenstädten können Kreuzungen so nahe beieinander liegen, dass es schwerfällt, sie auseinanderzuhalten. In Extremfällen beziehen sich Schilder und Pfeile auf der Fahrbahn bereits auf die nächste Kreuzung. Generell sieht die StVO vor, dass mögliche Richtungen an den Kreuzungszufahrten entweder durch Schilder oder Pfeile auf Fahrstreifen vorgeschrieben werden. Da in der StVO aber nur geregelt ist, dass Pfeile verbindlich sind, wenn auf mehreren Fahrstreifen Pfeile markiert wurden (vgl. StVO zu Zeichen 297), ist bereits geurteilt worden, dass sie nicht verbindlich sind, wenn nur auf einem Fahrstreifen Pfeile sind (Urteil BayObLG, 24.06.1974 - RReg. 2 St 546/74 OWi).

Auch innerhalb von Kreuzungen kann die Fahrtrichtung noch vorgeschrieben oder verändert werden. Hierzu wird insbesondere das Verkehrszeichen 222 (Rechts vorbei), 267 (Verbot der Einfahrt) oder natürlich 215 (Kreisverkehr) verwendet. Das ist deswegen nötig, weil große Kreuzungen oft deutlich mehr als nur die drei möglichen Ausfahrten haben, welchen sich die Pfeile links, rechts und geradeaus eindeutig zuordnen ließen.

Welche Fahrstreifen ein abbiegendes Fahrzeug befahren darf, ist nicht geregelt und umstritten. Relativ eindeutig ist, dass Fahrzeuge, die nebeneinander von derselben Fahrbahn losfahren, einander nicht gefährden dürfen. Das linke Fahrzeug muss also beispielsweise weiterhin den linken Fahrstreifen erreichen. Juristisch umstritten sind hingegen Fälle wie der Folgende: Ein Fahrzeug fährt auf einer einstreifigen Straße an die Kreuzung heran und biegt rechts ab. Auf dieser Straße wählt es dann den linken Fahrstreifen.

Es könnte sich hierbei um ein einziges Abbiegemanöver handeln oder eine Kombination aus einem Abbiegemanöver und einem Fahrstreifenwechsel, wobei das Fahrzeug in diesem Fall etwaige Vorfahrtsrechte verlieren würde. Hier hängt die Unterscheidung offenbar vom Einzelfall ab.

Die Regelung zum Wenden auf Kreuzungen ist aus ähnlichen Gründen kompliziert. Während einerseits Wenden als eine Art Linksabbiegen gesehen wird (auf einer Fahrspur mit einem Pfeil nach links zu wenden ist zulässig), ist es doch kein zweimaliges Linksabbiegen, was dem wendenden Fahrzeug eventuell Vorfahrtsrechte einräumen würde, obwohl wendende Fahrzeuge grundsätzlich Nachrang haben (StVO §9 Abs. 5). Ist die Kreuzung jedoch weitläufig, kann Wenden wiederum als zweimaliges Abbiegen betrachtet werden (KG Berlin 28.06.2004 - 12 U 94/03).

Weil die juristische Bewertung von Wendemanövern ungeklärt ist und weil Wendemanöver für automatisierte Fahrzeuge in der Regel keine Rolle spielen und ohnehin kein alltägliches Fahrmanöver darstellen, werden sie im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Vorfahrt und Ampeln

Nimmt man an, dass an einer Kreuzung die Begriffe *linksabbiegen*, *geradeausfahren* und *rechtsabbiegen* eindeutig geklärt sind, so sind die Vorfahrtsregelungen an Kreuzungen ohne Ampeln vergleichsweise eindeutig. Das hat vermutlich damit zu tun, dass die hohe Gefahr von Kollisionen bei unklarer Vorfahrt eine eindeutige Rechtslage erfordert. Demzufolge haben Fahrzeuge, die auf sich einer Vorfahrtsstraße befinden, grundsätzlich Vorfahrt vor Fahrzeugen, die nicht auf einer Vorfahrtsstraße sind oder in eine solche Straße abbiegen. Dass sie auf einer Vorfahrtsstraße sind, entnehmen sie den jeweiligen Verkehrszeichen (301 oder 306). Der Verlauf der Vorfahrtsstraße ist immer geradeaus, sofern nicht anders angegeben (Zusatzzeichen zu 306 abknickende Vorfahrt) und endet beim ersten Verkehrszeichen, das Nachrang ankündigt (205, 206 oder 307), vgl. VwV-StVO zu Zeichen 306. Zudem wird in der Regel der Verlauf der Vorfahrtsstraße auf der Kreuzung durch gestrichelte Breitstriche verdeutlicht [For80, Teil 1, Kap. 4.1.1]. Nicht geregelt ist hingegen, welche Vorfahrt Fahrzeuge auf den beiden nachrangigen Fahrbahnen bei abknickender Vorfahrt zueinander haben. Die StVO schließt „rechts vor links“ an durch Verkehrszeichen geregelten Kreuzungen eigentlich aus (StVO §9, Abs. 1, Ziffer 1). Die gültige Rechtsauffassung scheint zu sein, dass es aber bei einem solchen Straßenverlauf dennoch gilt (Urteil OLG Bayern 17.02.1978 - RReg 1 St 1/78).

Auf nicht durch Verkehrszeichen geregelten Straßen gilt dagegen der Grundsatz „rechts vor links“ (StVO §8 Abs. 1). Bei Fahrzeugen aus entgegengesetzter Richtung haben Geradeausfahrende und Rechtsabbieger Vorrang vor Linksabbiegern. Biegen beide links ab, müssen sie voreinander abbiegen (StVO §9 Abs. 3-4).

Bei Ampeln verhält sich die Vorfahrtsregelung allgemein unproblematischer, aber es gibt einige Sonderfälle. Zunächst unterscheidet die Regelung zwischen Ampeln mit Pfeilen und Ampeln ohne Pfeile (StVO §37, Abs. 2). Bei Ampeln mit Pfeilen verhält es sich am einfachsten, da einerseits klar ist, worauf sie sich beziehen, nämlich auf die Fahrzeuge, die in dieser Richtung abbiegen wollen. Andererseits garantieren sie, dass kein anderer Verkehrsteilnehmer Grün hat, der in der Fahrtrichtung queren könnte. Die Frage nach der Vorfahrt stellt sich in diesem Fall also gar nicht (VwV-StVO zu §37, Rdnr. 18).

Ampeln ohne Pfeil dürfen nur dann unterschiedliche Grünphasen haben, wenn die Fahrstreifen, auf die sie sich beziehen, baulich voneinander getrennt sind (VwV-StVO zu §37, Rdnr. 22). Sie garantieren aber keine konfliktfreie Fahrt. Es gelten also die normalen Vorschriften für das Abbiegen, jedoch nicht rechts vor links (StVO §37 Abs. 2 Nummer 1). Außerdem haben Fußgänger auf Fußgängerüberwegen Vorrang. Treffen Fahrzeuge aber auf Fahrzeuge aus einer früheren Grünphase, etwa wegen eines Rückstaus, haben diese Vorrang. Das geht ebenfalls nicht aus der StVO hervor, nur aus Gerichtsurteilen (Urteil BGH vom 11.05.1971 - VI ZR 11/70). Was für Fahrzeuge der gleichen Grünphase gilt, ist nicht geregelt. In Ermangelung einer alternativen Regelung wird davon ausgegangen, dass hier weiterhin die üblichen Vorfahrtsregeln gelten, obwohl die StVO nahelegt, dass Ampeln anderen Vorfahrtsregeln gegenüber Vorrang haben (StVO §37, Abs. 1).

Obwohl die Straßengestaltung verkehrsregelkonformes Verhalten häufig offensichtlich erscheinen lässt, fehlt der Verkehrsgesetzgebung ebendiese Klarheit und Eindeutigkeit, so lässt sich zusammenfassend konstatieren. Es ließen sich endlose Beispiele konstruieren, bei denen die Straßengestaltung gesetzeskonform ist, wo es aber selbst einem Autofahrer völlig unklar ist, wie viele Fahrstreifen es gibt, und in welche Richtung sie befahren werden dürfen. Viele Streitfälle im Verkehr müssen situationsabhängig individuell vor Gericht geklärt werden. Diese umstrittenen Fälle aber juristisch belastbar zu klären, liegt weit außerhalb des Rahmens dieser Arbeit, auch wenn dies im Hinblick auf die Zukunft des automatisierten Fahrens wünschenswert wäre. Tatsächlich wird eine eindeutige Interpretierbarkeit von Straßensituationen in der Gesetzgebung gar nicht gefordert. Sie ergibt sich vielmehr aus der praktischen Notwendigkeit, Gefahrensituationen zu vermeiden, die sich aus mehrdeutigen Situationen zwangsläufig ergeben. Als letzte Instanz dient daher §1 StVO, welcher gegenseitige Rücksicht und Vorsicht vorschreibt, sodass die Verantwortung für falsches Verhalten in mehrdeutigen Situationen letztendlich auf die Verkehrsteilnehmer

übergeht, da sie sich angesichts der unklaren Verkehrssituation offensichtlich nicht hinreichend vorsichtig verhalten haben.

In der Praxis werden daher viele Konfliktsituationen, die durch unklare Straßengestaltung oder Unkenntnis der Verkehrsregeln entstehen, durch Vorsicht und gegenseitige Verständigung zwischen den Verkehrsteilnehmern gelöst, auch wenn die Lösung nicht den Verkehrsregeln entspricht. Von automatisierten Fahrzeugen kann das nicht erwartet werden, zudem könnte ihnen jeder Regelverstoß durch die aufgezeichneten Daten nachgewiesen werden.

Für den Rahmen dieser Arbeit wird daher als Ausgangspunkt angenommen, dass die Straßengestaltung korrekt und ihre Interpretation bei einer bestimmten Regelbasis eindeutig und konfliktfrei ist. Von diesem Ausgangspunkt aus lassen sich dann im weiteren Verlauf dieser Arbeit reale Straßensituationen im Hinblick auf ihre Eindeutigkeit beurteilen. Dafür werden im folgenden Abschnitt, ergänzend zu den Verkehrsregelungen, Annahmen definiert, wie solche Straßen gestaltet sind, und unscharfe Begriffe präzisiert. Viele dieser Annahmen mögen selbstverständlich erscheinen, aber sie sind dennoch nicht durch entsprechende gesetzliche Regelungen oder Vorschriften belegbar. In den weiteren Kapiteln wird bei Bedarf auf die hier getroffenen Annahmen verwiesen.

4.2 Annahmen für die Straßengestaltung

Die getroffenen Annahmen werden im Folgenden aufgelistet. Sie sind kategorisiert in Grundbegriffe, Annahmen über Straßenabschnitte, Kreuzungen und Verkehrszeichen. In der Regel stützen sie sich in Teilen auf die oben beschriebenen Richtlinien oder Verkehrsregeln. Wo das nicht der Fall ist, wird es im Weiteren erläutert.

Gestaltung und Grundbegriffe

- A1 Die Gestaltung der Straße erfordert von einem Verkehrsteilnehmer kein Vorwissen über den vor ihm liegenden Teil der Straße. Das Wissen über die bisher zurückgelegte Strecke und die neben ihm liegenden Straßenteile sowie die sichtbaren Verkehrszeichen vor ihm reichen aus, um zu bestimmen, welches Verhalten verkehrsregelkonform ist.
- A2 Das Ende der Straßenfläche ist immer durch einen Straßenrand definiert. Das können beispielsweise das Ende der asphaltierten Fläche, Fassaden, Zäune, Leitplanken, usw. sein.
- A3 Die Straßenfläche kann durch Bordsteine und Markierungen weiter unterteilt sein. Bordsteine dürfen sich untereinander oder mit Markierungen berühren, aber nicht schneiden.
- A4 Es gehören nur Punkte zur Straßenfläche, die zwischen zwei Straßenrändern liegen.
- A5 Die Straßenfläche ist zusammenhängend. Es gibt also immer einen Pfad innerhalb der Straßenfläche, der zwei beliebige Punkte verbindet.
- A6 Die Straßenfläche kann sich in Fahrbahnen für Fahrzeuge und Radfahrer, Sonderwege für Fußgänger und Radfahrer und unerreichbare Abschnitte, wie Seitenstreifen und Sperrflächen unterteilen. Bordsteine und Markierungen (und nur diese) trennen je zwei dieser Abschnitte voneinander. Bordsteine trennen nie gleichartige Verkehrsteilnehmer.
- A7 Es gibt eine Ebene, auf die die Straßenfläche projiziert werden kann, sodass es keine Überschneidungen zwischen Rändern gibt, die eigentlich getrennt sind.

A8 Das Straßennetz ist unterteilt in Kreuzungsflächen und Straßenabschnitte dazwischen ([Uni68a, Kap. 1, Art. 1])

A9 Kreuzungsflächen befinden sich immer dort, wo es einen Zentrumspunkt gibt, der von drei oder mehr Rändern gleich weit entfernt ist. Die Kreuzungsfläche umfasst dann mindestens das Areal der Straßenfläche, das durch die Punkte der Ränder, die dem Zentrumspunkt am nächsten gelegen sind, sowie deren orthogonale Projektionen auf die anderen Ränder aufgespannt wird. Daran angrenzende Flächen können aber ebenfalls Teil der Kreuzungsfläche sein, jedoch nur bis zu einer Maximaldistanz. Grenzen mehrere dieser Flächen aneinander, gehören sie zu einer Kreuzungsfläche.

A10 Ein *Straßenabschnitt* ist der Bereich des Straßennetzes zwischen genau zwei Kreuzungsflächen.

A11 Die Fläche einer Fahrbahn unterteilt sich wiederum in einen oder mehrere *Fahrstreifen*, die durch einen linken und einen rechten Rand definiert werden. Diese Fahrstreifen können *implizit* sein, dann ist einer ihrer Ränder nicht durch eine Markierung oder einen Bordstein abgegrenzt, oder *explizit*.

A12 Die Fahrbahnen eines Straßenabschnittes enthalten an der Stelle, an der sie an eine Kreuzungsfläche angrenzen, nur explizite Fahrstreifen.

A13 Alle regelgebenden Elemente eines Kartenabschnitts sind bekannt und haben auch eine Bedeutung.

A1 ist eine Grundhypothese dieser Arbeit. Sie fordert, dass die Straßengestaltung für einen Verkehrsteilnehmer niemals mehrdeutig ist, sodass er Vorwissen zu Hilfe nehmen müsste, um diese Mehrdeutigkeit aufzulösen. Viele der folgenden Annahmen präzisieren dies noch in bestimmten Belangen. Von dieser Annahme explizit ausgenommen sind Streckenverbote, bei denen nicht verlangt wird, dass Schilder stets für jeden in eine Strecke einbiegenden Verkehrsteilnehmer wiederholt werden.

Die Definition einer Kreuzungsfläche aus A9 wird in Abb. 4.2 veranschaulicht. Da mindestens drei Ränder vorausgesetzt werden, ist implizit gewährleistet, dass eine Kreuzung immer mindestens drei Arme hat. A6 orientiert sich an der Unterteilung der StVO, trifft aber härtere Einschränkungen, wer welche Abschnitte benutzen darf. Fußgängern ist grundsätzlich, die Fahrbahn oder den Standstreifen zu benutzen, wenn es keinen Fußweg gibt. Stattdessen wird hier angenommen, dass es immer einen Fußweg gibt, oder die Straße andernfalls nicht von Fußgängern benutzt werden darf.

Da die Definition einer Straße in der StVO, wie in Abschnitt 4.1 angesprochen, problematisch ist, wird an ihrer Stelle die Begriffsbestimmung eines Straßenabschnitts (A10) verwendet. Weil ein Straßenabschnitt definitionsgemäß an einer Kreuzung endet, fällt die Unterteilung des Straßennetzes in Kreuzungen und Straßenabschnitte als einzelne Elemente deutlich leichter als die Unterteilung in Straßen. Für die meisten Regeln im Straßenverkehr wird die exakte Definition einer Straße zur Interpretation der Verkehrsregeln nicht benötigt, da Verkehrsteilnehmern die Gesamtübersicht über den Verlauf einer Straße ebenfalls nicht zur Verfügung steht. Die Frage nach dem Straßenverlauf über Kreuzungen hinweg stellt sich nur bei der Betrachtung von Verkehrsregeln wie Geschwindigkeitslimits (vgl. Kap. 7).

A7 lässt zu, dass die Straße Erhebungen und Gefälle haben kann, es darf aber keine Überschneidungen eigentlich getrennter Straßen geben, wie etwa Brücken über Straßen. A13 schließt weiterhin aus, dass es Elemente geben kann, die sinnlos sind, etwa Geschwindigkeitsbegrenzungen an Stellen, an denen keine Fahrzeuge fahren können. Ebenso wird dadurch gefordert, dass Markierungen, die etwa durch Baustellenmarkierungen aufgehoben wurden, nicht Teil der regelgebenden Elemente sind.

Dass Bordsteine keine gleichen Verkehrsteilnehmer trennen können, begründet sich daraus, dass Bordsteine in der Regel die Straße durch bewusste Höhenunterschiede unterteilen. Es ergibt keinen Sinn, Fußwege auf diese

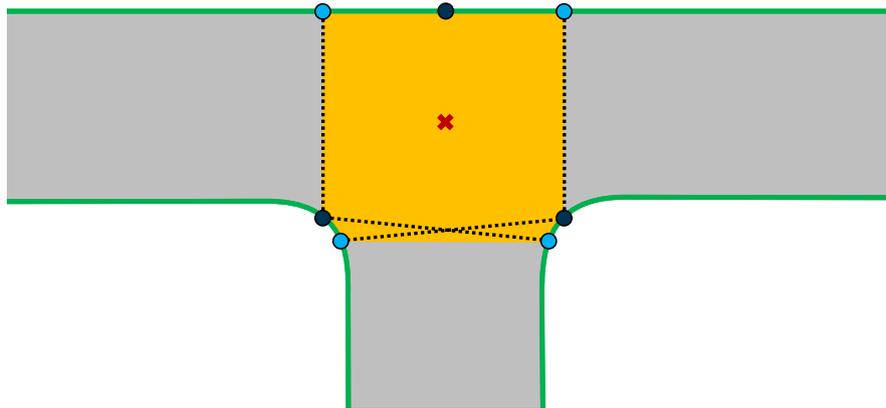


Abbildung 4.2: Definitionsgemäße Straßenfläche (grau und gelb) und Kreuzungsfläche (gelb), die sich aus dem Straßenrand (grün) ergibt. Der Zentrumschwerpunkt ist rot markiert, die ihm nächstgelegenen Punkte dunkelblau und deren Projektionen auf die anderen Ränder hellblau.

Art voneinander zu trennen und es ist ebenso wenig sinnvoll, Fahrzeuge dadurch zu trennen. Ausnahmen bilden Grundstücksausfahrten, welche aber nicht Teil der Fahrbahn sind und daher nicht Teil der Karte sein sollen. Bordsteine werden in sehr seltenen Fällen auch auf normalen Kreuzungen für nachrangige Straßen verwendet, dies wird hier aber vernachlässigt.

Straßenabschnitte

- A14 Fahrstreifen können einen oder mehrere Vorgänger oder Nachfolger haben. In diesem Fall teilen sie sich die Endpunkte des jeweils linken und rechten Randes.
- A15 Ein Fahrstreifen, der in einer bestimmten Richtung befahrbar ist, hat immer einen Nachfolger oder einen parallel verlaufenden, durch einen Fahrstreifenwechsel erreichbaren Fahrstreifen, der ebenfalls in diese Richtung befahrbar ist.
- A16 Fahrstreifen können von Fahrradfahrern, Kraftfahrzeugen oder beiden genutzt werden. Die Fahrtrichtung eines Fahrstreifens kann bidirektional oder unidirektional sein, wobei die Regelung für Fahrradfahrer und Kraftfahrzeuge unterschiedlich sein kann.
- A17 Straßenabschnitte mit mehreren Fahrstreifen enthalten keine bidirektionalen Fahrstreifen.
- A18 Implizite Fahrstreifen sind immer nur temporär und in ihrer Länge beschränkt. Verkehrsschilder beziehen sich nie auf einen einzelnen impliziten Fahrstreifen. Auf Straßenabschnitten gibt es implizite Fahrstreifen nur bei Fußgängerüberwegen und als Übergang vor verzweigenden bzw. unmittelbar nach zusammenführenden Fahrstreifen.
- A19 Fahrstreifen überkreuzen sich nicht. Explizite Fahrstreifen überlappen sich zudem nicht.
- A20 Wird ein Straßenabschnitt an einer bestimmten Stelle durch Bordsteine lateral in drei Abschnitte geteilt, so sind die beiden äußeren Abschnitte nicht für Fahrzeuge und der mittlere Abschnitt nicht für Fußgänger.
- A21 Sperrflächen und Seitenstreifen sind vollständig von durchgezogenen Linien umgeben, sodass kein Fahrzeug in sie hineinfahren kann, ohne eine Linie zu überqueren

Für enge Straßen in mehrere Richtungen mit einer Breite von weniger als 5,50 m schreibt die RMS die Markierung von Fahrstreifen nicht verpflichtend vor [For80, Teil 1, Kap. 3.2.2.1]. Gemäß A16 handelt es sich dann immer um einen einzigen, bidirektionalen Fahrstreifen.

Für mehrstreifige Straßen gibt es einige Gestaltungsmöglichkeiten, die im Straßenverkehr nicht genutzt werden, weil sie zu Verwirrung führen könnten. Diese soll A17 teilweise ausschließen. Eine ähnliche Annahme findet sich auch in [Hum09, S. 92]. Zwar erwähnt die StVO als Gegenbeispiel explizit, dass auf Fahrbahnen mit drei Fahrstreifen der mittlere bidirektional, nämlich zum Abbiegen, verwendet werden soll (StVO §7, Abs. 3a), wegen der hohen Kollisionsgefahr werden solche Ausführungen aber überall vermieden. In den gängigen Richtlinien (RMS und RAS) findet sich jedenfalls kein Vorschlag für eine solche Gestaltung.

A15 liegt zugrunde, dass Verkehrsteilnehmer, die sich auf einem Fahrstreifen befinden, irgendwohin weiterfahren müssen. Ausgenommen sind natürlich Fahrstreifen, die am Rand der Karte liegen, da die zwar einen Nachfolger haben dürften, dieser aber nicht Teil des betrachteten Gebiets ist.

Es wird nirgends geregelt, wie Fahrstreifen sich außerhalb der Kreuzungen zueinander verhalten. Daher wird dies durch A19 präzisiert. Es erscheint logisch, dass sich explizite Fahrstreifen nicht überlappen, da sich ein solche Straßengestaltung mit Markierungen alleine nicht ausdrücken ließe. Dass sich Fahrstreifen außerhalb von Kreuzungen nicht überschneiden, gebietet die Verkehrssicherheit. Außerdem besteht abseits von Kreuzungen überhaupt kein Grund dazu.

Da die StVO nicht genau festlegt, wie ein Fußweg beschaffen ist, wird mit A20 erzwungen, dass Fußwege tendenziell außen und Fahrbahnen innen liegen.

Kreuzungen

- A22 Es existiert ein endlicher Abstand $d > 0$ zum Rand einer Kreuzungsfläche, bis zu dem alle für die Kreuzung relevanten Informationen hinterlegt sind. Das bedeutet implizit, dass Kreuzungen nicht so nahe aneinander liegen dürfen, dass sie zu einer Kreuzungsfläche zusammenfallen, da dann Information fehlt.
- A23 Jeder Fahrstreifen für Fahrzeuge, der an eine Kreuzung angrenzt, wird über die Kreuzung hinweg fortgesetzt, verschwindet also nicht.
- A24 Fahrstreifen auf Kreuzungen verlaufen derart, dass Fahrzeuge, die auf unterschiedlichen Fahrstreifen desselben Arms starten, nicht kollidieren können.
- A25 Ein Kreuzungsarm ist die Gesamtheit aller in eine Kreuzungsfläche mündenden Fahrbahnen, die aneinander angrenzen oder einen gemeinsamen Vorgänger haben, von dem sie nicht durch eine andere Kreuzung getrennt sind.
- A26 Innerhalb von Kreuzungsflächen überlappen oder schneiden sich die Fahrstreifen nicht, welche dieselben beiden Kreuzungsarme verbinden, es sei denn, sie beginnen am selben einmündenden Fahrstreifen.
- A27 Fahrstreifen verlaufen so, dass Fahrzeuge, die von Kreuzungsarm A kommen und Kreuzungsarm B erreichen wollen, nicht mit Fahrzeugen kollidieren können, die von B kommen und A erreichen wollen.
- A28 Ein herausführender Fahrstreifen ist von einem hineinführenden Fahrstreifen erreichbar, wenn es einen Pfad gibt, der die beiden Fahrstreifen verbindet ohne eine durchgezogene Linie zu kreuzen oder ein Verkehrsschild zu missachten.

- A29 Ist es erlaubt, von einem bestimmten hineinführenden Kreuzungsarm zu einem anderen herausführenden Kreuzungsarm zu fahren, so darf jeder der herausführenden Fahrstreifen befahren werden, sofern er erreichbar ist.
- A30 Ist mehrdeutig, von welchem Fahrstreifen aus ein bestimmter Fahrstreifen erreicht werden kann, wird die Zuordnung durch Markierungen in der Kreuzungsfläche verdeutlicht.
- A31 Wenn nichts dagegen spricht, dass ein angrenzender Fahrstreifen von einem bestimmten hineinführenden Fahrstreifen angefahren werden kann, dann ist es auch erlaubt.
- A32 Wo Kollisionen durch das Fahren einer bestimmten Trajektorie vermieden werden können, wird durch gestrichelte Linien verdeutlicht, wo gefahren werden muss (z.B. beim Abbiegen voreinander).

Die Annahmen zielen vor allem darauf ab, Klarheit bei der Kreuzungsgestaltung hinsichtlich der möglichen Richtungen zu schaffen. Abweichende Annahmen wären hier problemlos möglich, aber da die Verkehrsregelung sehr unklar ist, bedarf es hier einer Festlegung. Zu A29 soll erwähnt werden, dass hiermit nicht gemeint ist, dass von allen Fahrstreifen alle anderen Fahrstreifen erreicht werden können. Es gilt nach wie vor A24. A26 spezifiziert genauer, wie Fahrzeuge in Kreuzungen aufeinander Rücksicht zu nehmen haben: Indem nämlich nicht zugelassen wird, dass Fahrzeuge desselben Kreuzungsarms andere Fahrzeuge schneiden. Dadurch wird auch gefordert, dass die Fahrstreifen eines Kreuzungsarms nicht zusammenführen dürfen, da es gefährlich ist, von Fahrern mitten auf der Kreuzung die Anwendung des Reißverschlussverfahrens zu erwarten.

Ergänzend dazu fordert A31, dass ein Fahrer kein Vorwissen über die Straße braucht, in die er hineinfahren will. Wenn er in eine Straße oder einen Fahrstreifen nicht einfahren darf, weil diese dem Gegenverkehr vorbehalten sind, dann wird das entweder an der Kreuzungseinfahrt oder im Kreuzungsverlauf angezeigt. Alles andere würde es ortsunkundigen Verkehrsteilnehmern unmöglich machen, sich verkehrsregelkonform zu verhalten.

Verkehrszeichen

- A33 Schilder sind so platziert und ausgerichtet, dass Verwechslungen mit anderen Straßenabschnitten an Kreuzungen bei parallel laufenden Straßen ausgeschlossen sind. Im Zweifel gilt das Verkehrszeichen für die Fahrbahn, die links vom Schild liegt, wenn man es von der Vorderseite betrachtet.
- A34 Die Entfernung von einem Schild zu der Straße, die es betrifft, überschreitet nicht einen Maximalwert. Schilder, die Fußwege oder geteilte Fußwege kennzeichnen, stehen immer auf dem Fußweg, auf den sie sich beziehen, oder unmittelbar daneben am Straßenrand.
- A35 Jede Zone (etwa Tempo 30) wird an jeder Straße, über welche die Zone verlassen werden kann, auch wieder aufgehoben
- A36 Pfeilmarkierungen sind immer nur auf Fahrbahnen aufgebracht und beziehen sich nur auf Fahrzeuge.
- A37 Der weitere Verlauf einer Straße an einer Kreuzung ist immer geradeaus. Gibt es keine solche Fortführung, endet die Straße an der Kreuzung.
- A38 Streckenverbote gelten immer maximal für die Länge einer Vorfahrtsstraße, bei nachrangigen Straßen maximal bis zum Ende des Straßenverlaufs. Ansonsten gelten sie, bis die angegebene Streckenlänge erreicht ist oder sie durch ein anderes Schild aufgehoben werden.
- A39 Innerhalb von Kreuzungsflächen gibt es nur Schilder, die die Richtung weisen.

A40 Grünpfeile sowie dynamische Verkehrszeichen und semantische Angaben auf Verkehrsschildern (z.B. „bei Nässe“) werden nicht berücksichtigt, ebenso Sonderfahrstreifen für Busse.

A41 Die Position, an der vor Ampeln und Stoppschildern gehalten muss, wird immer durch eine Haltelinie verdeutlicht. Durch ihren Abstand ist die Zuordnung eindeutig.

A42 Ampeln für Fahrstreifen und Pfeile auf dem Boden der Fahrstreifen haben konsistente Richtungen.

Dass in A40 Grünpfeile, dynamische Verkehrszeichen und Busfahrstreifen nicht berücksichtigt werden, hat einen praktischen Grund: Es gab im untersuchten und für die Evaluation verwendeten Straßengebiet keine Anwendung dieser Gestaltungselemente für den Straßenverkehr. Eine Berücksichtigung wäre aber möglich gewesen, denn die Wirkungsweisen unterscheiden sich nicht wesentlich von den übrigen Verkehrszeichen. Im Falle dynamischer Verkehrsregeln, wie etwa je nach Verkehrsaufkommen für den Verkehr freigegebene Fahrstreifen, stellt sich allerdings zusätzlich die Frage, welche automatisierten Fahrzeuge von dieser Karteninformation Gebrauch machen können, denn dazu müssten die zur dynamischen Regelung verwendeten Verkehrszeichen zuverlässig erkannt werden können. Semantische Angaben werden nicht berücksichtigt, da ihre Interpretation erheblichen Aufwand und umfangreiches Kontextwissen voraussetzt.

Die übrigen Regeln zielen darauf ab, Klarheit in Bezug auf die Wirkungsweise von Verkehrszeichen zu schaffen. Insbesondere muss dafür eine Definition für den weiteren Verlauf einer Straße (A37) und einer Strecke (A38) ab einem Verkehrsschild gefunden werden. Voraussetzung für deren Anwendung ist eine befriedigende Definition von „geradeaus“, wofür auf Kap. 7 verwiesen wird.

Es soll darauf hingewiesen werden, dass die hier beschriebenen Annahmen keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Konfliktfreiheit haben können. Angesichts der Komplexität und Widersprüchlichkeit realer Straßenszenarien wäre ein solcher Nachweis auch kaum zu führen. Ebenso wenig kann ein Anspruch darauf erhoben werden, dass sich die hier getroffenen Annahmen langfristig als korrekt erweisen. Für den weiteren Verlauf der Arbeit ist das jedoch kaum relevant, da dies nur die genaue Ausprägung der benötigten Regelbasis beeinflussen dürfte, nicht den Lösungsansatz als Ganzes.

4.3 Relevante Merkmale für die Kartierung

Da die Beschaffenheit einer Straße nun klar festgelegt ist, fällt es leicht, die Merkmale zu definieren, die zur Kartengenerierung benötigt werden. Das sind genau die Elemente, die weiter oben als Grundbausteine der Straße erwähnt wurden. Diese sind in Abb. 4.3 in ihrer Begriffshierarchie zusammengefasst. Dabei wurden einige Elemente weggelassen, die für ein automatisiertes Fahrzeug nicht weiter relevant sind, wie etwa Wegweiser oder Warnsymbole. Auf der Straße werden auch andere Symbole als Pfeile verwendet, das darf aber nur als Wiederholung eines ohnehin vorhandenen Schildes geschehen, daher sind diese Symbole nicht relevant.

All diesen Elementen ist gemeinsam, dass sie sich durch eine Linie oder einen Polygonzug repräsentieren lassen, wie das auch für *Lanelet2* erforderlich ist. Im Falle von Markierungen ist das etwa die Mittelachse der Markierung, bei Zebrastrifen sind es die äußeren Ränder, im Falle von Verkehrszeichen die Kante des Schildes aus der Vogelperspektive. Auf Flächen wurde bewusst verzichtet, da Sensoren in der Regel nur Teile von Gesamtflächen beobachten können und diese umständlich zusammengesetzt werden müssen. Fußwege können wegen ihrer unterschiedlichen Gestaltung ohnehin nicht zuverlässig detektiert werden und Sperrflächen müssen nicht erkannt werden, da A21 bereits hinreichend ist.

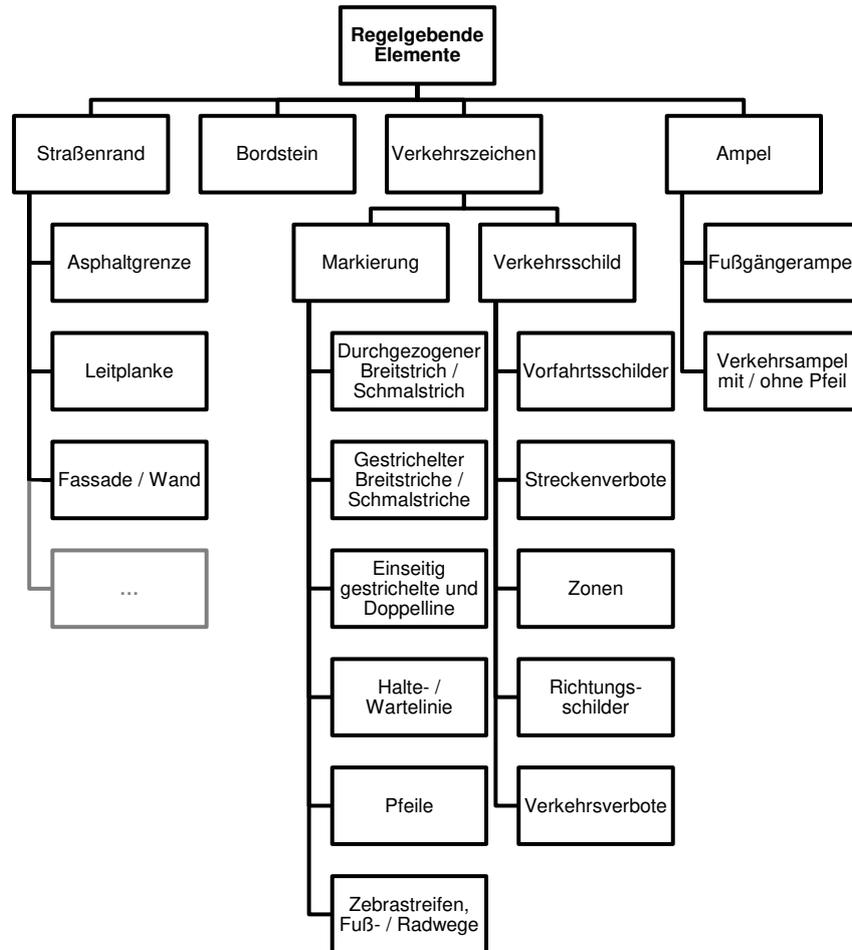


Abbildung 4.3: Hierarchie der in dieser Arbeit verwendeten Merkmale für die Kartierung

Markierungen von Schutzstreifen für Fahrräder und Fahrradwege können unterschiedlich ausgeprägt sein [For80, Teil 1, Kap. 2.1 und 2.4] und werden hier unter dem Sammelbegriff *Fahrradwegmarkierung* zusammengefasst. Die häufigste Ausprägung ist ein im engen Abstand gestrichelter Breitstrich. Es gibt aber auch Varianten, in denen der Schutzstreifen ausschließlich durch rote Farbe oder durch Schmalstriche in engem Abstand ausgedrückt wird. In allen Fällen unterscheidet sich die Randlinie visuell klar von einer Fahrbahnrand-Markierung. Solche Markierungen sind also ein eindeutiger Hinweis auf einen Radweg, aber nicht der einzige, da Radwege auch durch Verkehrsschilder und durchgezogene Breitstriche gekennzeichnet sein können.

Für alle Merkmale aus Abb. 4.3 gilt, dass sie bereits von heutiger Sensorik oder sogar Seriensorik in hoher Qualität erkannt werden können (vgl. Kap. 2.2). Mit Ausnahme von Verkehrsschildern können sie auch in Luftbildern beobachtet werden. Dabei werden keine Anforderungen gestellt, die Kontextwissen erfordern, etwa über Fahrstreifen, da solche Verfahren deutlich schlechtere Erkennungsraten haben, wie bereits in Kap. 2.2 festgestellt. Hierzu wären Kenntnisse über die Verkehrsregeln erforderlich, die einem Perzeptionsalgorithmus in diesem Erkenntnisgrad nicht vorliegen können. Weiterhin müssten hierfür Informationen aus Merkmalen einbezogen werden müsste, die eine große räumliche Entfernung zum betrachteten Abschnitt haben, wie etwa vorausgegangene Verkehrsschilder.

Dennoch werden einige Anforderungen an die Eingangsdaten gestellt, welche eine Nachverarbeitung der reinen Detektionen erforderlich machen. Dazu gehört, dass alle Einzelstriche einer gestrichelten Linie zu einer ganzen Linie zusammengeführt werden. Dies ist allerdings kein besonders hoher technischer Aufwand und lässt sich,

außer an unübersichtlichen Kreuzungen, leicht automatisiert lösen [1]. Wie in Kap. 1.2 ausgeführt und in A13 gefordert, müssen darüber hinaus alle regelgebenden Elemente bekannt sein und auch eine Bedeutung für die Verkehrsgestaltung haben.

In den folgenden Kapiteln soll gezeigt werden, wie ein Verfahren gestaltet sein kann, das auf dieser Basis Kartendaten inferiert.

5 Inferieren von Fahrstreifen

Wie aus Kap. 3.4 hervorgeht, ist der Fahrstreifen das zentrale Element in Karten für automatisierte Fahrzeuge. Um solche Karten zu erzeugen, müssen also die Fahrstreifen, deren Beziehungen zu anderen Fahrstreifen sowie ihre Eigenschaften bestimmt werden. Damit sind die geltenden Verkehrsregeln wie etwa Fahrtrichtung, Vorfahrtsbeschränkungen oder Geschwindigkeitslimits gemeint. In diesem Kapitel soll nun die Grundstruktur für ein Verfahren entwickelt werden, das diese Aufgabe lösen kann, indem es die in Kap. 4.3 beschriebenen Merkmale als Grundlage nimmt und daraus sukzessive die benötigten Informationen ableitet. Diese Grundstruktur wird dann in den darauffolgenden Abschnitten immer weiter detailliert und konkretisiert. Die Methoden, welche zur Bestimmung von Fahrstreifen innerhalb von Kreuzungen eingesetzt werden, unterscheiden sich stark von denen, die in den Straßenabschnitten dazwischen angewendet werden können. Kreuzungen werden daher separat in Kap. 6 behandelt.

Auf den übrigen Straßenabschnitten wird sich zeigen, dass allgemeine Gestaltungseigenschaften von Straßen ausgenutzt werden können, um eine iterative Bestimmung der Fahrstreifen zu ermöglichen. Allerdings können allein bei der Betrachtung isolierter Straßenabschnitte, ohne Kreuzungen, in der Regel nicht alle benötigten Informationen erlangt werden, wie etwa die Fahrtrichtung. Fehlende Informationen können dann nur durch Betrachtung des gesamten umgebenden Straßennetzwerkes ergänzt werden.

Eine Anforderung für das Verfahren ist außerdem ein beherrschbarer Rechenaufwand. Auch wenn das Verfahren nicht für die Anwendung während der Fahrt im Fahrzeug bestimmt ist, kann eine wochenlange Rechenzeit nicht zielführend sein. Das gilt insbesondere, wenn kleinere Änderungen und Korrekturen an den Eingangsdaten eine ebenso große Rechenzeit zur Folge hätten.

Weiterhin sollte das Ergebnis der Kartengenerierung für Menschen nachvollziehbar sein (vgl. dazu die Überlegungen aus Kap. 2.3.2). Entstehen bei der Generierung der Karteninformation Konflikte oder ist die Informationsbasis unvollständig, sollte nicht irgendeine wahrscheinliche Lösung gewählt werden, sondern stattdessen der Ursprung des Fehlers eingegrenzt werden, sodass die Ursache von Menschen bestimmt und behoben werden kann. Andernfalls besteht das Risiko, dass unbemerkterweise eine Karte erzeugt wird, die unvollständig oder falsch ist.

Die Grundidee eines Verfahrens, das diese Anforderungen erfüllt, wird nun im folgenden Abschnitt 5.1 skizziert. Der erste Teil des Verfahrens, die Bestimmung von Straßenabschnitten und Kreuzungsflächen, wird dann in Abschnitt 5.2 genauer erklärt, der zweite Teil, das Inferieren von Informationen über Fahrstreifen, mit Ausnahme der Kreuzungsbestimmung in Abschnitt 5.3.

5.1 Ein Iteratives Verfahren zur Inferenz von Fahrstreifen

Zunächst stellen die in Kap. 4.3 definierten Merkmale nur eine scheinbar unzusammenhängende Menge von Linienzügen mit zugehörigen Informationen über ihren Typ, aber ohne jeden Bezug zueinander dar. Einen Bezug zwischen diesen Merkmalen herzustellen gestaltet sich aufgrund wechselseitiger Abhängigkeiten und zahlreicher Sonderfälle als Herausforderung.

Verkehrsschilder und Markierungen sind beispielsweise Hinweise auf Fahrstreifen, jedoch keine verbindlichen. Verkehrsschilder stehen in der Regel neben Fahrbahnen, manchmal sind sie aber auch über ihnen angebracht. Markierungen werden auch für andere Bereiche der Straße verwendet. Manche Fahrstreifen und deren Eigenschaften lassen sich überhaupt erst mithilfe benachbarter Fahrstreifen bestimmen, etwa wenn Fahrstreifenwechsel möglich sind. Diese Komplexität verstärkt sich in Kreuzungsnähe, da sich dort mehrere Fahrstreifen und deren Markierungen überschneiden, wohingegen andere nur teilweise oder gar nicht markiert sind.

Selbst die Straßenfläche ist nicht explizit gegeben, denn die wird nur durch die Ränder beschrieben, die ebenfalls keinen Bezug zueinander haben. Nur weil zwei Straßenränder benachbart sind, bedeutet das nicht, dass es sich dazwischen um eine Straße handelt. Es könnten auch zwei Ränder von zufällig parallel laufenden Straßen sein.

Um die Bezüge zwischen den einzelnen Merkmalen herzustellen und diese in eine Ordnung zu bringen, bietet es sich an, die hierarchische Untergliederung der Straßenfläche auszunutzen. Es gilt, einen Ansatz zu entwickeln, der die zunächst grobe Struktur der Straße immer weiter in ihre einzelnen Bestandteile zerlegt, bis darüber mithilfe von Verkehrszeichen Aussagen getroffen werden können. Diese Vorgehensweise kann auch als „top down“-Ansatz bezeichnet werden.

Dieser Ansatz funktioniert nicht in allen Bereichen der Straße gleich gut. Es gibt Regionen, in denen Fahrstreifen überhaupt nicht markiert sind, etwa in der Nähe von Fußgängerüberwegen. Dass es in einem Abschnitt unmarkierte Fahrstreifen gibt, lässt sich bei isolierter Betrachtung des Abschnitts nicht feststellen, nur im Abgleich mit dem weiteren Straßenverlauf. Außerdem gibt es längst nicht überall Verkehrszeichen. Daher müssen an diesen Stellen zur vollständigen Untergliederung und zur Bestimmung der Eigenschaften die umgebenden Straßenabschnitte genutzt werden, in der Hoffnung, dass dort mehr Informationen vorliegen und so sukzessive das Wissen weitergetragen wird. Es ergibt sich also ein iterativer Prozess, an dessen Ende sich bei erfolgreicher Anwendung des Verfahrens eine fahstreifengenaue Karte ergibt. In dieser wird jedem Flächenstück der Straße eine Eigenschaft zugewiesen, von welchen Verkehrsteilnehmern es genutzt werden kann, sowie, falls es sich um einen Fahrstreifen handelt, in welche Richtung es befahren werden darf.

Weil es keinen allgemein gebräuchlichen Begriff für solche Flächenstücke gibt, wird in der Arbeit im Folgenden von einem Verkehrsstreifen gesprochen, um auszudrücken, dass es sich hierbei entweder um einen Fahrstreifen, Seitenstreifen, Fußweg, Radweg oder eine Sperrfläche handelt.

Ein allgemeiner Verfahrensaufbau, mit dem dieser Ansatz umgesetzt werden kann, ist in Abb. 5.1 schematisch dargestellt. Dieser wird im Folgenden grob erläutert und für die einzelnen Schritte werden dann in Abschnitt 5.2 und 5.3 Lösungen vorgestellt.

Überblick über die geometrische Vorverarbeitung

Der erste Schritt des Verfahrens besteht darin, aus den in Kap. 4.3 beschriebenen Merkmalen die Gesamtfläche der Straßen und deren Mittelachse zu bestimmen. Da angenommen wird, dass sich überkreuzende Fahrstreifen nur auf Kreuzungsflächen vorkommen (A19 aus Kap. 4.2), sollten diese möglichst früh ermittelt werden, um die Untersuchung der übrigen Straßenabschnitte zu vereinfachen.

Zur weiteren Untersuchung der Kreuzungsflächen bietet es sich an, die einzelnen Fahrbahnen, Sperrflächen und Sonderwege innerhalb der Kreuzung voneinander zu separieren. Dabei wird ausgenutzt, dass Bordsteine und durchgezogene Linien in der Regel ausschließlich dazu verwendet werden, diese drei Typen voneinander zu trennen (A6). Dass auch Fahrstreifen durch durchgezogene Linien getrennt werden können, wird in Kauf genommen, da Fahrzeuge diese ohnehin nicht überqueren können. Es macht also praktisch keinen Unterschied, ob die Linie

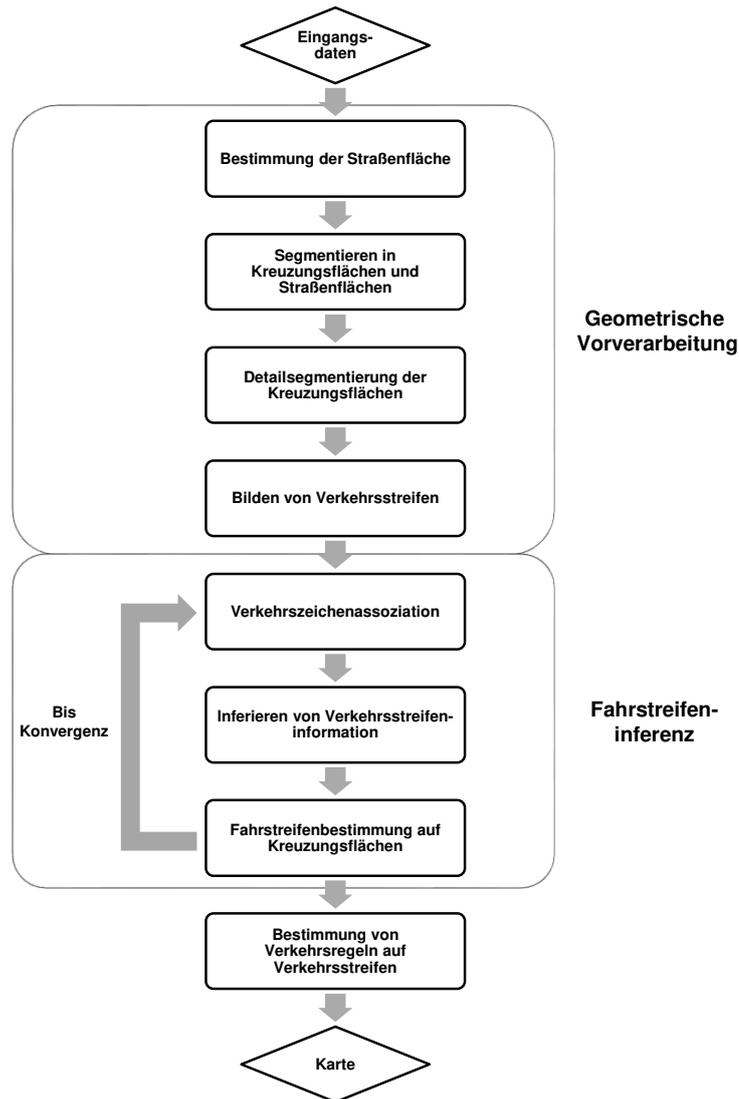


Abbildung 5.1: Verarbeitungsschritte zur Kartengenerierung

hier zwei Fahrbahnen oder zwei Fahrstreifen trennt. In einigen Fällen kann es sein, dass eine vermeintliche Kreuzungsfläche eigentlich nur deswegen entstanden ist, weil sich hier zwei Wege berühren, die eigentlich durch Bordsteine oder Linien voneinander getrennt sind. Dann gibt es nach diesem Schritt gar keine Kreuzungsfläche mehr, weil alle Teile der Kreuzungsfläche in normale Straßensegmente unterteilt werden konnten. Insbesondere auf Autobahnen ist das der Fall, weil dort die Fahrbahn der Auffahrt zunächst durch durchgezogene Linien von der eigentlichen Fahrbahn getrennt wird und erst im weiteren Verlauf ein Fahrstreifenwechsel zwischen den beiden Fahrbahnen ermöglicht wird, sodass durch die Berücksichtigung der durchgezogenen Linien hier gar keine Kreuzung entsteht.

Innerhalb der Straßenabschnitte kann nun durch Ausnutzung von A6 die Straße entlang der Bordsteine und Markierungen weiter in Verkehrstreifen unterteilt werden. An Stellen, wo sich Fahrstreifen zu mehreren aufweiten oder zusammenführen, werden Übergänge eingefügt (aufbauend auf A18).

Überblick über die Fahrstreifeninferenz

Nun kann davon ausgegangen werden, dass die geometrische Form aller Verkehrstreifen auf den Straßenabschnitten bekannt ist. Unbekannte Verkehrstreifen befinden sich nur noch innerhalb der Kreuzungsflächen. Um herauszufinden, wie Fahrstreifen auf der Kreuzung verlaufen, muss zunächst bekannt sein, über welche Verkehrstreifen welche Teilnehmer die Kreuzung befahren können.

Daher wird zunächst versucht, auf den einzelnen Straßenabschnitten die Verkehrszeichen den Verkehrstreifenabschnitten zuzuordnen, um im nächsten Schritt die Eigenschaften des Verkehrstreifens zu bestimmen. Also Erkenntnisse darüber zu gewinnen, welche Teilnehmer einen Verkehrstreifen in welche Richtung benutzen dürfen. Dabei kann ausgenutzt werden, dass über Verkehrstreifen, die an Verkehrstreifen mit bekannter Bewegungsrichtung angrenzen, unter bestimmten Umständen ebenfalls Aussagen über die Bewegungsrichtung getroffen werden können. Etwa dann, wenn sie aufeinander folgen oder über einen Fahrstreifenwechsel erreichbar sind.

Es lassen sich zu diesem Zeitpunkt noch nicht über die Eigenschaften aller Verkehrstreifen Aussagen treffen, weil Kreuzungen dafür oft entscheidende Informationen liefern. Diese Information kann aber nur genutzt werden, wenn wiederum zumindest über einige Fahrstreifen bekannt ist, ob Verkehrsteilnehmer über sie auf die Kreuzung gelangen können.

Weil davon ausgegangen wird, dass Verkehrsteilnehmer kein Vorwissen über die Straße benötigen, in die sie einfahren wollen (A1 und A31), reicht das Wissen über die einmündenden Fahrstreifen eines Kreuzungsarms und die Gestaltung der Kreuzungsfläche selbst aus, um die zugehörigen herausführenden Fahrstreifen zu bestimmen. Bei korrekter Berücksichtigung aller Verkehrsregeln wird so garantiert, dass bei Kenntnis der Fahrtrichtungen aller Fahrstreifen eines einzigen Straßenabschnitts sukzessive alle Fahrstreifen der über Kreuzungen damit verbundenen Straßenabschnitte bestimmt werden können. Auf der Grundlage von A5, also dass die Straßenfläche zusammenhängend ist, kann dann schließlich iterativ die ganze Karte bestimmt werden.

Das iterative Verfahren führt daher zyklisch die Zuordnung von Verkehrszeichen, das Inferieren der Eigenschaften der Verkehrstreifen mithilfe dieser Verkehrszeichen und die Bestimmung der Fahrstreifen innerhalb der Kreuzungsflächen durch. Dadurch wird Wissen über die Eigenschaften der Verkehrstreifen durch die Karte propagiert. Die Iteration wird beendet, wenn entweder alle Fahrstreifen bekannt sind oder eine Iteration keine neuen Erkenntnisse bringt. In diesem Fall sind die Eingangsdaten entweder unvollständig oder es wurden unzutreffende Annahmen über die Straßengestaltung und die Verkehrsregeln getroffen. Genau das macht die Stärke dieses Verfahrens aus, weil nun einem Menschen die Gelegenheit gegeben wird, das unvollständige Ergebnis zu untersuchen und fehlende Daten zu korrigieren oder Hinweise einzufügen, damit das Verfahren abgeschlossen werden kann.

Da nun alle Fahrstreifen ermittelt sind und die Verkehrszeichen diesen bereits zugeordnet wurden, können als letzter Schritt nun die Verkehrsregeln bestimmt werden. Dazu muss zunächst der Verlauf der Vorfahrt ermittelt werden, damit Vorfahrtsstraßen bekannt sind und anschließend Zonen und Streckenverbote entlang der Fahrstreifen propagiert werden. Am Ende dieses Verfahrens steht eine Karte, die im Erfolgsfall alle Fahrstreifen sowie daran angrenzende Fuß- und Radwege enthält und diesen die Ränder und Verkehrsschilder, die als Eingangsdaten verwendet werden, zuordnet. Damit entspricht sie den Anforderungen an eine Karte für das automatisierte Fahren aus Kap. 3.4.

In den folgenden Abschnitten werden nun Verfahren und Methoden vorgestellt, die geeignet sind, die Arbeitsschritte aus Abb. 5.1 im Einzelnen auszuführen. Ein Verfahren zur Bestimmung von Rad- und Fußwegen innerhalb von Kreuzungen wird hier nur in vereinfachter Form vorgestellt. Dies geschieht aufgrund des Fokus dieser Arbeit auf Fahrzeuge. Im Zusammenhang stellt sich ohnehin die Frage, ob die exakte Prädiktion von Fußgängern in Kreuzungsnähe unter der Annahme, dass sich diese jederzeit verkehrsregelkonform verhalten, überhaupt sinnvoll ist.

5.2 Bestimmung von Straßenabschnitten und Kreuzungsflächen

Wie bereits eingangs des Kapitels erläutert, erfordert die Bestimmung von Straßenabschnitten, dass überhaupt bereits bekannt ist, wie sich die Eingangsdaten zur Gesamtfläche der Straße zusammensetzen. Um zu einem Lösungsansatz zu gelangen, sind A2, A4 und A5 hilfreich. Demzufolge ist jeder Punkt, der zwischen zwei Rändern liegt, Teil der Straßenfläche, sofern er Teil einer zusammenhängenden Gesamtfläche ist.

Straßenfläche

Eine effiziente Möglichkeit, zu bestimmen, welche beiden geometrischen Objekte einem bestimmten Punkt im Raum am nächsten sind, ist das Voronoi-Diagramm. Das Voronoi-Diagramm V ist die Menge aller Punkte $p \in V$, für die gilt, dass es in einer Menge geometrischer Objekte G zwei Elemente $\{s_1, s_2\} \in S$ gibt, zu denen der minimale euklidische Abstand d zugleich der Minimalabstand zu allen Objekten in G $d_{\min, G}$ ist, also [For86]:

$$V = \{p \in \mathbb{R}_n : d_{\min, G}(p) = d(p, s_1) = d(p, s_2), \{s_1, s_2\} \in G, s_1 \neq s_2\}.$$

In dieser Gleichung stellt n eine beliebige Dimension dar. Für diese Arbeit wird unter der Annahme einer planaren Welt (A7) $n = 2$ verwendet.

V hat dann die Eigenschaft, dass seine Punkte für beliebige geometrische Objekte in S eine Menge aus Kanten bilden, genauer genommen eine Menge aus Halbgeraden, Liniensegmenten und Kurvenabschnitten. Stellen, an denen Kanten zusammentreffen, werden Knoten des Voronoi-Diagramms genannt. Diese sind von drei oder mehr geometrischen Objekten gleich weit entfernt. Diese Eigenschaft lässt sich ausnutzen, um Kreuzungen im Sinne von A9 zu finden. Aufgrund der Knoten/Kanten-Beziehung lässt sich das Voronoi-Diagramm auch als Graph auffassen, dessen Knoten durch Kanten verknüpft sind. Zur Generierung des Voronoi-Diagramms existieren viele Algorithmen, die üblicherweise die Komplexität $O(n \log(n))$ haben. Einer davon ist der Sweepline-Algorithmus [For86], welcher als Eingangsgeometrien Punkte oder Liniensegmente voraussetzt. Weiterhin lässt das Verfahren zu, dass die beiden nächstgelegenen geometrischen Objekte s_1 und s_2 , welche links und rechts einer Voronoi-Kante liegen, bekannt sind. Das ist nicht in allen Verfahren der Fall. Dass der Algorithmus auf Liniensegmenten beruht, während als Eingangsdaten Polygonzüge, also Ketten aus Liniensegmenten, zur Verfügung stehen, stellt kein Problem dar. Das Voronoi-Diagramm V_L der Menge der Linienzüge L ist eine Untermenge des Voronoi-Diagramms V_S der Menge der Liniensegmente S aus L , nämlich abzüglich der Punkte, deren beiden nächstgelegenen Segmente zum selben Polygonzug gehören.

Dieser Algorithmus wird auf den Eingangsdaten zur Anwendung gebracht, um die Straßenfläche zu bestimmen und Randpaare, die gemeinsam einen Teil der Straße bilden zu identifizieren. Dazu wird das Voronoi-Diagramm der Straßenränder berechnet, S_L ist also die Menge aller Linienzüge, die den Straßenrand definieren. Um der Definition einer Straßenfläche genau zu entsprechen, müssen die Voronoi-Kanten entfernt werden, die nicht dazu passen. Im Allgemeinen ist das Voronoi-Diagramm in das Unendliche ausgedehnt, was natürlich nicht erwünscht ist. Es werden also alle Teile der Kanten entfernt, die von den zugehörigen Geometrien weiter als einen Schwellwert entfernt sind. Das ist ohne Beschränkung der Allgemeinheit dieses Ansatzes möglich, da jede Fläche im Straßenverkehr endlich groß ist und daher nur ein Wert gewählt werden muss, der größer als diese größte Fläche ist. Anschließend werden iterativ alle Punkte entfernt, die keinen Nachfolger haben und die nicht innerhalb der durch die beiden nächstgelegenen Polygonzügen gebildeten Fläche liegen.

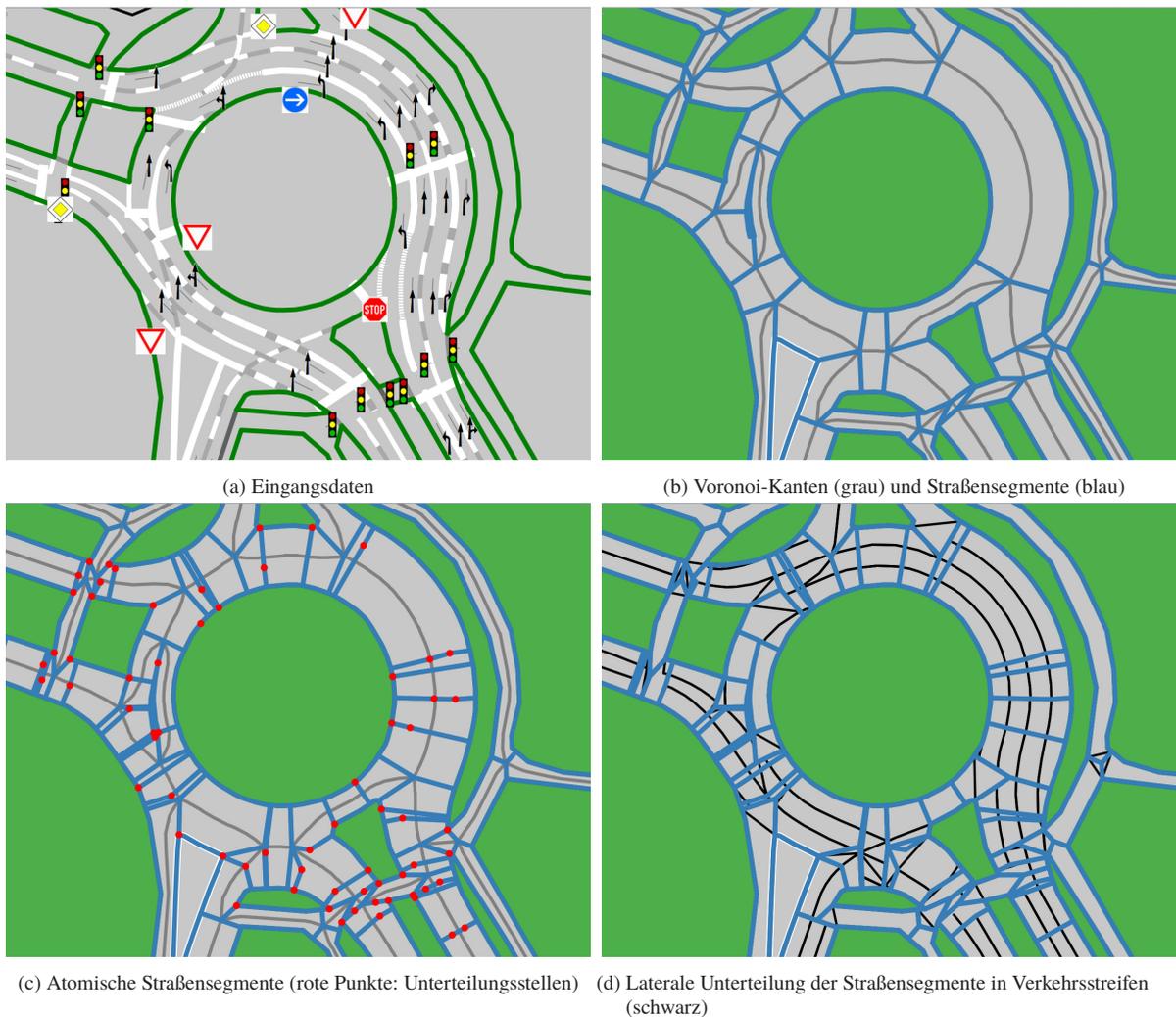


Abbildung 5.2: Verarbeitungsschritte zur Erzeugung von Straßensegmenten und Verkehrsstreifen an einem Realbeispiel.

Als Ergebnis zerfällt das Voronoi-Diagramm in mehrere separate Graphen, von denen nur einer die gesamte Straßenfläche repräsentieren kann. Alle anderen Graphen entstehen beispielsweise an Hinterschnidungen oder innerhalb von Verkehrsinseln, also Flächen, die ganz oder teilweise von Straße umschlossen sind. In der Annahme, dass die Straßenfläche das größte zusammenhängende Netz dieser separaten Graphen ist, werden alle Graphen mit einer kleineren Gesamtkantenlänge entfernt. Ein Beispiel für den verbliebenen, gefilterten Voronoi-Graphen ist in Abb. 5.2b dargestellt. Die dafür verwendeten Eingangsdaten sind die Straßenränder (grüne Linien) aus Abb. 5.2a.

Segmentierung der Straßenfläche

Wie auf diesem Bild zu erkennen ist, repräsentiert der verbleibende Voronoi-Graph zugleich das Straßennetz. Der Graph und das Wissen über die beiden jeder Kante am nächsten gelegenen Ränder wird nun ausgenutzt, um die Straßenfläche weiter zu zerlegen. Das Ziel ist, den Straßenverlauf in einzelne Segmente zu unterteilen, über deren Länge hinweg sich die Anzahl der Verkehrsstreifen nicht verändert. Die Segmente sollten gewissermaßen einen atomischen Abschnitt der Straße bilden, weil so deutlich vereinfacht wird, sie ungeachtet ihrer Länge als eine Einheit zu interpretieren. Diese Darstellung ist dadurch wesentlich handhabbarer als beispielsweise eine Diskretisierung mit fester Schrittweite. Die atomischen Unterteilungen der Straße werden im Folgenden Straßensegmente genannt. Der

Abschnitt eines Verkehrstreifens, der innerhalb eines Straßensegmentes liegt, wird als Verkehrstreifensegment bezeichnet. Ein Straßensegment setzt sich also aus mehreren Verkehrstreifen zusammen.

Das Verfahren zur Bildung dieser atomischen Straßenabschnitte und schließlich die Bildung der Verkehrstreifensegmente wird durch Algorithmus 1 verdeutlicht. Ausgehend von den beiden nächstgelegenen Abschnitten des Straßenrandes, die jeder Kante im verbliebenen Voronoi-Diagramm zugeordnet sind, werden darin initial Straßenabschnitte gebildet (siehe auch Abb. 5.2b).

Diese werden dann iterativ an Endpunkten von Markierungen und Bordsteinen oder Schnittpunkten von Markierungen untereinander sowie an Verkehrsschildern, welche einen Abschnitt mit einer neuen, zu beachtenden Verkehrsregel einleiten, unterteilt.

Das Ergebnis sind Straßensegmente, die die Eigenschaft haben, dass jede Markierung oder jeder Bordstein der Eingangsdaten sie entweder auf der ganzen Länge schneidet oder sie gar nicht schneidet (vgl. dazu Abb. 5.2c). Keinesfalls aber endet eine Linie innerhalb eines Segments, denn sonst wäre es ja an dieser Stelle unterteilt worden. Außerdem beginnt nun bei jedem Schild, welches das Verhalten von Verkehrsteilnehmern innerhalb des Segments beeinflusst, ein neuer Abschnitt. Sie entsprechen also der obigen Idee eines atomischen Straßensegments.

Der letzte Schritt besteht darin, diese Straßensegmente in ihrer Breite mithilfe der innerhalb von ihnen verlaufenden Bordsteine und Markierungen in Verkehrstreifenabschnitte zu unterteilen (Abb. 5.2d). Die so generierten

Algorithmus 1 : Pseudocode zur Bestimmung der Straßensegmente und Verkehrstreifen aus dem Voronoi-Diagramm

```

straßensegmente = Liste()
// Generiere initiale Straßensegmente
für alle voronoi_kante in gefilterter_voronoi_graph(straßenränder):
    straßensegmente.anhängen(Straßensegment(voronoi_kante.a1, voronoi_kante.a2))
// Teile Segmente in atomische Abschnitte
für alle linie in bordsteine_und_markierungen:
    teile_nächstgelegenes_segment(straßensegmente, linie.startpunkt)
    teile_nächstgelegenes_segment(straßensegmente, linie.endpunkt)
für alle schnittpunkt in berechne_schnittpunkte(bordsteine_und_markierungen):
    teile_nächstgelegenes_segment(straßensegmente, schnittpunkt)
für alle schild in relevante_verkehrsschilder:
    teile_nächstgelegenes_segment(straßensegmente, schild)
// bilde Verkehrstreifenabschnitte
für alle straßensegment in straßensegmente:
    ränder = bestimme_polygonzüge_innerhalb_von(straßensegment,
        bordsteine_und_markierungen)
    sortiere_von_links_nach_rechts(straßensegment, ränder)
    ränder.davorsetzen(straßensegment.linker_rand)
    ränder.anhängen(straßensegment.rechter_rand)
    für alle i in [0, ränder.laenge - 1]:
        straßensegment.verkehrstreifen.anhängen(Verkehrstreifen(ränder[i], ränder[i + 1]))
def teile_nächstgelegenes_segment(straßensegmente, position):           // Hilfsfunktion

    straßensegment = finde_naechstgelegenes_segment(straßensegmente, position)
    straßensegment1, straßensegment2 = teile_segment_bei_punkt(straßensegment, position)
    straßensegmente.anhängen(straßensegment1)
    straßensegmente.anhängen(straßensegment2)
    straßensegmente.entferne(straßensegment)

```

Verkehrsstreifensegmente entsprechen allerdings noch nicht der finalen Anzahl von Verkehrsstreifensegmenten, da ein einzelner Streifen mehrere implizite Fahrstreifen enthalten kann, etwa an Stellen, an denen die Mittellinie nicht markiert wurde. Für die Zuordnung von Verkehrsregeln zu diesen Verkehrsstreifen ist das aber unerheblich, da ein neben einem Verkehrsstreifen aufgestelltes Schild immer für alle Verkehrsteilnehmer gelten muss, die sich dort in der Richtung des Schildes bewegen. Wäre das nicht so, wäre der Verkehrsstreifen durch Markierungen weiter unterteilt worden.

Bei Betrachtung von Abb. 5.2d fällt auf, dass abseits von Kreuzungen die gebildeten Verkehrsstreifen bereits sehr gut zu den tatsächlichen Fahrstreifen passen (z.B. in der rechten Hälfte des Kreisels). In Kreuzungsbereichen entstehen dagegen extrem viele fragmentierte Straßensegmente mit einem eigenartigen Verkehrsstreifenverlauf. Das hängt damit zusammen, dass einerseits die Zuordnung der Ränder hier häufig wechselt und andererseits dort besonders viele Markierungen verlaufen, die sich zudem häufig kreuzen. Markierungen verlaufen dort außerdem oft nicht parallel zum Straßenrand, sodass die gebildeten Verkehrsstreifen keine sinnvolle Bedeutung haben.

Daher werden im nächsten Schritt die in Kreuzungsnähe befindlichen Straßensegmente zu prototypischen Kreuzungsflächen zusammengefasst, welche dann weiter in die finalen Kreuzungsflächen unterteilt werden. Diese Kreuzungsflächen erfahren dann eine andere Behandlung zur Bestimmung der darin verlaufenden Fahrstreifen als die verbliebenen Straßensegmente (siehe Kap. 6).

Kreuzungsflächen

Es ist bereits bekannt, an welchen Stellen der Straßenfläche es zu Kreuzungen kommt, nämlich an den Knotenpunkten des Voronoi-Graphen. Diese entsprechen den Zentrumspunkten aus A9. Die dort beschriebene Definition lässt sich leicht in einen Algorithmus überführen, denn die orthogonale Projektion des Zentrumspunktes auf die angrenzenden Linien und die Projektion dieser Punkte auf die anderen Linien lassen sich direkt anwenden. Wie Abb. 5.2b zu entnehmen ist, bestehen jedoch gerade große Kreuzungen mit mehreren Armen oft aus mehreren Zentrumspunkten, beispielsweise die Kreuzung am südlichsten Punkt des Kreisels. Die so generierten Kreuzungsflächen müssen in diesem Fall also zusammengelegt werden. Die Anteile der Flächen aller Straßensegmente, die innerhalb der Kreuzungsfläche liegen, werden der Kreuzung zugerechnet.

Für die meisten Kreuzungen sind diese Kreuzungsflächen jedoch nicht hinreichend, weil sich der tatsächliche Kreuzungsbereich mit Fußgängerüberwegen und unmarkierten Fahrstreifen oft weit über die Kernfläche hinaus erstreckt. In A19 wird festgelegt, dass sich Fahrstreifen abseits von Kreuzungen nicht überkreuzen dürfen. Um dem zu entsprechen, muss sichergestellt werden, dass solche Kreuzungen allesamt innerhalb der Kreuzungsflächen liegen. Da weiterhin angenommen wird, dass alle Fahrstreifen am Kreuzungsausgang explizit markiert sind (A12), sollten erst dann keine weiteren Abschnitte dem Kreuzungsbereich hinzugefügt werden, wenn es im weiteren Verlauf kein Straßensegment mehr gibt, das mehr Verkehrsstreifen enthält als die bisher betrachteten Segmente.

Zusätzlich sollte vermieden werden, als angrenzendes Segment ein Segment auszuwählen, dessen Fahrstreifen bald enden werden. Um schließlich zu verhindern, dass anhand dieser Kriterien gigantische Kreuzungsflächen entstehen, wird angenommen, dass die Distanz von der bislang bestimmten inneren Kreuzungsfläche zur gesuchten gesamten Kreuzungsfläche durch eine feste Obergrenze beschränkt ist (A9).

Es ergibt sich also das folgende Verfahren zur Bestimmung der endgültigen Kreuzungsfläche: Zunächst wird für einen an eine Kreuzungsfläche angrenzenden Straßenabschnitt die Menge aller Straßensegmente bis zu einer bestimmten Maximaldistanz oder zur nächsten Kreuzungsfläche ausgewählt. In dieser Menge wird nun das erste Straßensegment gesucht, das nicht mehr Teil der Kreuzungsfläche sein soll. Straßensegmente, welche durch das Bilden der Kreuzungsfläche in mehrere Teile fragmentiert wurden kommen dafür nicht in Frage. Ebenso die



Abbildung 5.3: Bestimmung der Kreuzungsflächen. Gelb: initiale Kreuzungsfläche, die nummerierten, rot eingefärbten Straßensegmente (blauer Rand) wurden zusätzlich hinzugefügt.

Segmente, die sehr schmal sind oder deren Breite sich über ihren Verlauf hinweg signifikant verändert. Weiterhin werden alle Straßensegmente verworfen, die weniger als die maximale Anzahl von Verkehrsstreifensegmenten enthalten. Das der Kreuzung am nächsten liegende verbleibende Straßensegment ist dann das erste Segment, das der Kreuzung *nicht* zugerechnet wird. Bleibt keines übrig, werden alle der Kreuzungsfläche zugerechnet. Treffen als Ergebnis zwei Kreuzungsflächen zusammen, werden sie zu einer zusammengeführt. Gibt es durch das Verfahren Straßenabschnitte, die auf beiden Seiten an dieselbe Kreuzung angrenzen, werden sie ebenfalls der Kreuzung hinzugefügt.

Ein Beispiel dafür ist in Abb. 5.3 dargestellt. Die rot eingefärbten Straßensegmente bei B, D und E werden der Kreuzung hinzugefügt, da das Kriterium konstanter Fahrstreifenbreite nicht erfüllt ist, weil in diesen Segmenten Fahrstreifen zusammenführen. Das Segment bei C wird hinzugefügt, weil es zu schmal ist. Segment F wird hinzugefügt, weil das nächste Straßensegment mehr Verkehrsstreifensegmente hat. Die Segmente bei A schließlich werden hinzugefügt, weil durch das Hinzufügen des rechts gelegenen Segmentes die beiden Kreuzungen zusammengewachsen sind und die Segmente nun zu beiden Seiten von derselben Kreuzung umschlossen sind.

Ein weiteres Ergebnis aus der Bestimmung der Kreuzungsflächen wird in Abb. 5.4 gezeigt. Alle Straßensegmente zwischen zwei Kreuzungen werden nun einem Straßenabschnitt zugerechnet, sodass sich das eingangs geforderte Bild aus Kreuzungsflächen und Straßenabschnitten ergibt (A8). Wie in der Abbildung zu sehen ist, werden Straßensegmente nicht nur an Stellen geteilt, an denen neue Fahrstreifen hinzukommen. Das ist beispielsweise bei der Straße in der rechten Hälfte des Kreisels in Abb. 5.4 der Fall. Das hat damit zu tun, dass an diesen Stellen der Typ der Markierungslinie von durchgezogen auf gestrichelt wechselt. Es ändert sich also an dieser Stelle für Verkehrsteilnehmer die Möglichkeit, den Fahrstreifen zu wechseln, was eine Unterteilung erforderlich macht.

Weitere Unterteilung der Kreuzungsfläche

Wie bereits in der Übersicht in Kap. 5.1 erwähnt, umfasst die so generierte Kreuzungsfläche Fahrbahnen und Sonderwege, die eigentlich eigenständig sind und zumindest von Fahrzeugen auch nicht überquert werden dürfen.



Abbildung 5.4: Ergebnis der Bestimmung der Kreuzungsflächen (gelb). Die Verkehrsstreifensegmente zwischen den Kreuzungen sind durch schwarze Linien gekennzeichnet.

Daher liegt es nahe, die Kreuzungsfläche noch einmal weiter zu untergliedern. Das Problem, das dafür gelöst werden muss, ist dem Problem der Bestimmung der Straßenfläche sehr ähnlich, nur dass es nun darum geht, die Fahrbahnfläche bzw. Sonderwegfläche zu bestimmen und weiter zu unterteilen. Das obige Verfahren kann also erneut auf jede einzelne Kreuzungsfläche angewendet werden, wobei aber nun die innerhalb der Kreuzung befindlichen Straßenränder, durchgezogenen Linien und Bordsteine die Menge S_L der zur Erstellung des Voronoi-Diagramms berücksichtigten Polygonzüge bilden. Die Verfahrensschritte aus Algorithmus 1 können dann unverändert auf den so generierten Voronoi-Graphen angewendet werden um Straßensegmente zu bestimmen. Anschließend können nach dem obigen Verfahren die tatsächlichen Kreuzungen innerhalb der ursprünglichen Kreuzungsfläche ermittelt werden.

Einige Beispiele sind in Abb. 5.5 dargestellt. Bei dem Autobahnabschnitt oben ist gut zu sehen, dass die Fahrbahn nach der Segmentierung keine Kreuzung mehr ist, da sich die Fahrbahnen auf der Kreuzungsfläche nicht überschneiden. Es verbleibt nur noch eine kleine „Kreuzung“, wo drei Segmente des Standstreifens aufeinandertreffen. Da Autobahnen grundsätzlich so gestaltet sind, dass Fahrbahnen zunächst parallel zueinander verlaufen, bis sie dann zu einer Fahrbahn vereinigt werden, gibt es nach diesem Verarbeitungsschritt keine Kreuzungen mehr auf den Fahrbahnen von Autobahnen und Schnellstraßen. In diesen Abschnitten müssen also nur noch die Fahrtrichtungen und die Verkehrsregeln bestimmt werden, was trivial ist, da ein einziges Autobahnschild ausreicht, um eine Autobahn als solche zu erkennen und zu folgern, dass alle Fahrstreifen nur in der Richtung des Schildes befahrbar sind.

In Abb. 5.5 ist unten auch eine Stadtstraße zu sehen, in die in kurzer Abfolge zwei Straßen einmünden. Durch die engere Straßenfläche ist es hier möglich, die beiden Kreuzungen zu separieren. Die Kreuzung am Fußgängerüberweg ist dagegen verschwunden, weil der Fußweg durch einen Bordstein von der Straßenfläche separiert ist. Fußgängerüberwege können in einem Nachverarbeitungsschritt am Ende der Kartengenerierung eingefügt werden.

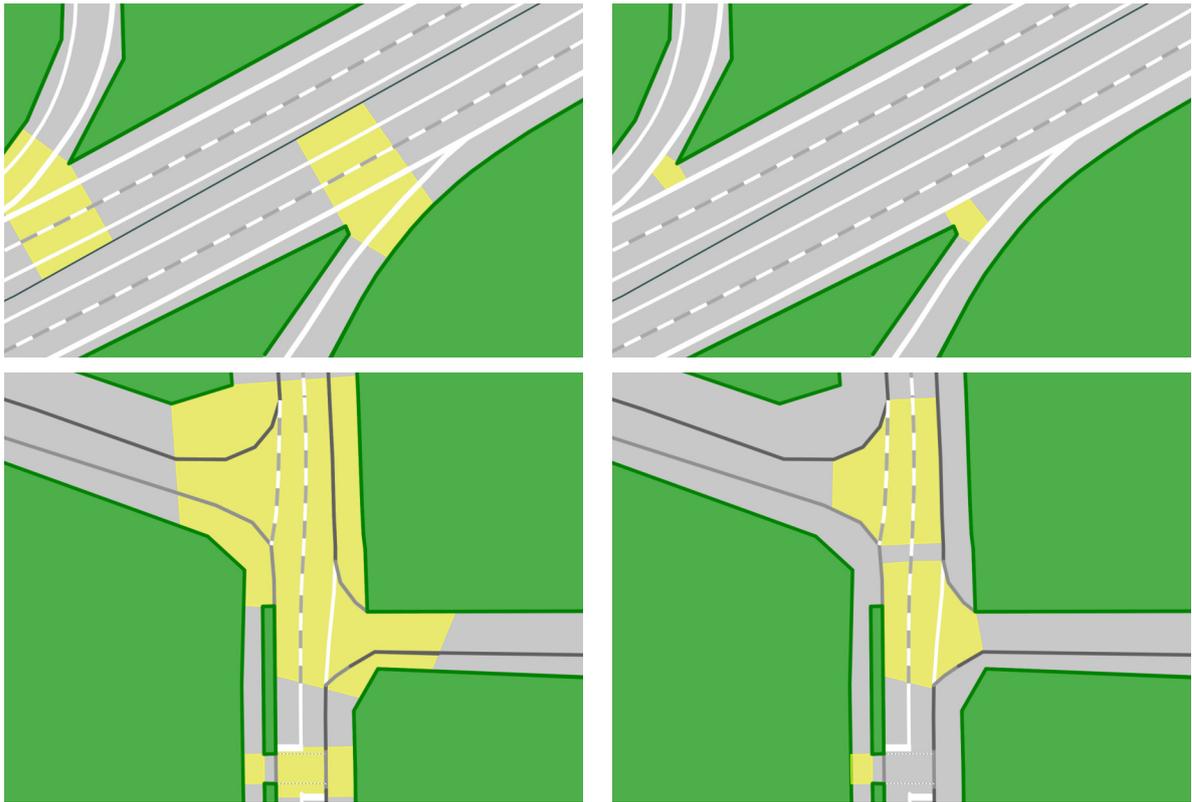


Abbildung 5.5: Kreuzungsfläche (gelb) vor (links) und nach (rechts) der Kreuzungssegmentierung. Oben für einen Autobahnabschnitt, unten für einen Straßenabschnitt in der Innenstadt.

Erzeugung der Verkehrstreifen

Die Verkehrstreifen, die bislang erstellt worden sind, sind noch nicht endgültig, da noch implizite Fahrstreifen fehlen. Es handelt sich hierbei um Übergänge zwischen sich aufweitenden Fahrstreifen sowie Fußgängerüberwege (A18). Diese beiden Fälle müssen unterschiedlich behandelt werden. In einen Fall bleibt die Anzahl der Fahrstreifen eigentlich konstant, es gibt nur im Bereich des Fußgängerüberweges vorübergehend keine Markierung. Im anderen Fall verändert sich die Anzahl der Fahrstreifen und es wird ein sanfter Übergang benötigt, der Fahrzeuge von dem Beginn der Aufweitung auf je einen der beiden neuen Fahrstreifen leitet. Analog verhält es sich bei zusammenführenden Fahrstreifen, daher ist es hier noch irrelevant, in welche Richtung die Fahrstreifen befahren werden.

Zur Unterscheidung, um welchen der beiden Fälle es sich handelt, werden ausgehend von einer Stelle, an der ein Verkehrstreifensegment mehrere Vorgänger hat, so lange die Nachfolger dieses Fahrstreifens durchgegangen, bis entweder ein bestimmter Abstand zu dieser Verzweigung erreicht ist oder es wieder genauso viele Nachfolger gibt, wie der zu Beginn betrachtete Fahrstreifen Vorgänger hat. In den ersten beiden Fällen handelt es sich um eine Aufweitung, im letzten Fall handelt es sich um eine Unterbrechung der Fahrstreifen. In Abb. 5.6 ist ein Beispiel für diese Fälle dargestellt.

Im Fall von wegfallenden oder hinzukommenden Fahrstreifen wird nun ausgenutzt, dass es irrelevant ist, an welcher Stelle genau der Übergang endet. Nur der Beginn ist mit der Stelle, an der die Fahrstreifen enden, fest vorgegeben. Daher werden verschiedene Endpunkte geprüft, an denen versucht wird, lineare Übergangsränder einzufügen, die auf direktem Wege den wegfallenden Fahrbahnrand mit einem der Fahrbahnränder der Endpunkte verbinden. Mögliche Endpunkte, an denen die Übergänge mit dem Straßenrand kollidieren, werden verworfen. Schließlich wird

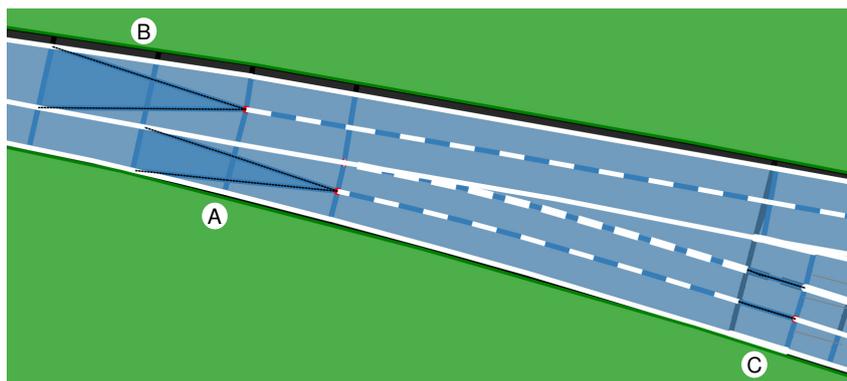


Abbildung 5.6: Beispiele für generierte Übergänge (schwarze gestrichelte Linien) bei hinzukommenden (A), wegfallenden (B) oder unterbrochenen (C) Fahrstreifen (blau eingefärbt).

der längste der verbliebenen Übergänge ausgewählt. Das Straßensegment, in dem der Endpunkt liegt, wird an dieser Stelle geteilt und mit den neu generierten Rändern werden Übergangsfahrstreifen gebildet, welche die bestehenden Verkehrstreifen in diesem Bereich ersetzen. Bei dem Verfahren wird in Kauf genommen, dass auch Übergänge zu vermeintlichen Fahrstreifen gebildet werden, die eigentlich keine sind, wie etwa Seitenstreifen. Solche unnötigen Übergänge können im weiteren Verlauf des Verfahrens identifiziert und entfernt werden.

Im Fall von unterbrochenen Fahrstreifen sind Anfangs- und Endpunkte fest vorgegeben und es werden Übergangsränder eingefügt, welche die endenden Fahrstreifenränder miteinander verbinden. Dabei wird angenommen, dass die Länge der Unterbrechung kurz genug ist, sodass sichergestellt ist, dass ein linearer Übergang nicht mit den Fahrstreifenrändern kollidiert. In den untersuchten Abschnitten war das immer der Fall. Sollte sich diese Annahme als falsch erweisen, könnte aber auch mithilfe der Mittellinie zwischen bestehenden Fahrbahnrändern ein kollisionsfreier Übergang gebildet werden.

Nach Abschluss dieses Verfahrens kann nun davon ausgegangen werden, dass abseits von Kreuzungen alle Fahrstreifen bekannt sind, dass jedoch zusätzlich einige Verkehrstreifen keine Fahrstreifen darstellen, sondern z.B. Fußwege, Radwege, Seitenstreifen oder eben unnötig eingefügte Übergänge von diesen zu normalen Fahrstreifen.

5.3 Inferenz von Fahrstreifeninformation

Als Inferenz von Fahrstreifeninformation wird ein Verfahren bezeichnet, welches die Aufgabe hat, die Nutzer zu identifizieren, welche einen bestimmten Fahrstreifen benutzen sollen, und zu klären, in welcher Richtung sie das tun dürfen.

Das Verfahren muss dabei mit unvollständigem Wissen umgehen können. Das bedeutet, dass je nach Gesamtfortschritt des Verfahrens noch nicht alle Nachfolger eines Verkehrstreifens bekannt sind. Das ist immer dann der Fall, wenn ein Verkehrstreifen an eine Kreuzung angrenzt, deren Fahrstreifen noch nicht vollständig bestimmt werden konnten. In allen anderen Fällen kann die Anzahl der Nachfolger als bekannt und unveränderlich angesehen werden. Da das Verfahren als Bestandteil eines iterativen Verfahrens angewendet wird, verkleinert sich die Anzahl der ungelösten Kreuzungen mit jedem Schritt und es können immer mehr Informationen über die Verkehrstreifen inferiert werden.

Als Prozess ist ein zweistufiges Verfahren vorgesehen. Im ersten Schritt wird versucht, Karteninformation, die zur Bestimmung der Funktion eines Verkehrstreifens geeignet sein kann, den Verkehrstreifen oder Straßenab-

schnitten zuzuordnen. Nachdem dies geschehen ist, kann im nächsten Schritt versucht werden, daraus Nutzer und Fahrtrichtungen zu bestimmen.

Assoziation von Verkehrszeichen

Die einzige externe Quelle von Hinweisen über mögliche Fahrtrichtungen sind Verkehrszeichen. Diese gibt es entweder als Verkehrsschilder, die in der Nähe der Straßenabschnitte angebracht sind, oder als Pfeile auf der Straßenoberfläche. Im Falle von Pfeilen ist die Zuordnung trivial. Diese werden immer direkt auf dem Fahrstreifen aufgebracht, auf den sie sich beziehen. Sie können also ohne Weiteres zugeordnet werden. Gibt es mehrere Fahrstreifen, wie beispielsweise bei impliziten Fahrstreifen, wird der Pfeil allen Fahrstreifen zugeordnet.

Bei Schildern ist der Sachverhalt komplexer. Hier muss zwischen den unterschiedlichen Arten, Verkehrsschilder anzubringen, unterschieden werden. Die meisten Verkehrsschilder sind neben der Fahrbahn angebracht, stehen also auf einer anderen Fläche oder sogar auf einem anderen Weg als auf dem, auf den sie sich beziehen. In diesem Fall beziehen sie sich immer auf alle Fahrstreifen eines Straßenabschnitts, die in eine bestimmte Richtung gehen. Kommen dabei mehrere Straßenabschnitte in Frage, müssen weitere Iterationen abgewartet werden, bis alle außer einem zweifelsfrei ausgeschlossen werden können. Etwa, wenn klar ist, dass von dem Schild betroffene Verkehrsteilnehmer den Straßenabschnitt gar nicht in die angezeigte Richtung benutzen dürfen (A13). Sind die Schilder direkt über einem Fahrstreifen angebracht, könnte es sein, dass sie sich nur auf diesen einen beziehen. Daher muss erst abgeklärt werden, ob es noch andere Verkehrsschilder in der Nähe gibt. Deshalb werden Schilder zunächst immer einer Fahrbahn zugeordnet und später erst wird entschieden, welche Fahrstreifen sie betreffen.

Ist im späteren Verlauf des Verfahrens klar, dass der Verkehrsteilnehmer von zwei möglichen Straßenabschnitten beide benutzen darf, muss das Schild dem Straßenabschnitt zugeordnet werden, der sich links vom Schild befindet (aus A33).

Wenn bekannt ist, dass ein Verkehrsteilnehmer einen Straßenabschnitt links von einem Schild in der angezeigten Richtung benutzen darf, kann der Straßenabschnitt diesem direkt zugewiesen werden. Weiteres Wissen über die anderen Abschnitte würde daran nichts mehr ändern. Ist schließlich der Straßenabschnitt eindeutig bestimmt, wird das Schild dem Straßensegment des Abschnitts zugeordnet, das dem Schild am nächsten liegt. Gibt es zwei, die näherungsweise gleich weit entfernt sind, wird es dem zugeordnet, der hinter dem Schild liegt, da Schilder ja erst für den nachfolgenden Straßenabschnitt gültig sind. Die Begriffe „links“, „rechts“ und „hinter“ beziehen sich dabei auf einen Normalenvektor, der senkrecht in die Bildfläche des Schildes hinein zeigt. Eine in der Nähe befindliche Kreuzungsfläche muss hierbei nicht berücksichtigt werden, weil angenommen wird, dass es innerhalb der Kreuzungsfläche keine Schilder gibt, die Fahrstreifen der Kreuzung betreffen (A39)

Das Gegenteil der oben beschriebenen Schilder sind Verbotsschilder. Sie sind immer an Straßen aufgestellt, die für einen Verkehrsteilnehmer *nicht* gedacht sind. Das oben beschriebene Verfahren muss also genau umgekehrt durchgeführt werden, das heißt, das Schild wird immer dann zugeordnet, wenn klar ist, dass es sich um den einzigen Straßenabschnitt handelt, den ein Verkehrsteilnehmer nicht benutzen darf. Eine Sonderstellung nimmt dabei das Schild „rechts vorbei“ bzw. „links vorbei“ (Zeichen 222) ein. Es ist gleichzeitig ein Verbotsschild, nämlich für den Straßenabschnitt, von dem der Pfeil weg zeigt, und ein normales Verkehrszeichen, nämlich für den Abschnitt, zu dem es hin weist. Es muss also zweimal Straßenabschnitten zugeordnet werden, nämlich einmal als Verbotsschild und einmal als „normales“ Schild ohne Verbotsscharakter.

Der nächste Typ sind Fußgängerschilder. Von diesen wird angenommen, dass sie immer direkt auf der Fläche stehen, auf die sie sich beziehen, oder unmittelbar neben diesen am Straßenrand (A34). Hier sollten sich also keine

Mehrdeutigkeiten ergeben. Der Verkehrstreifen mit dem geringsten Abstand muss demzufolge derjenige sein, auf den sich das Schild bezieht.

Eine weitere Sonderstellung nehmen Einbahnstraßenschilder ein, weil sie anders ausgerichtet sind. Ihre Flächen zeigen immer zur Straße hin, auf die sie sich beziehen. Sie können daher ebenfalls einfach zugeordnet werden, indem die Straße bestimmt wird, die in dieser Richtung liegt und dem Schild am nächsten ist.

Schließlich gibt es noch eine Vielzahl an Schildern, die keinen besonderen Informationsgehalt für die Kartengenerierung haben. Dazu zählen etwa Wegweiser, weil sie sich auf beliebige Verkehrsteilnehmer beziehen können. Davon ausgenommen sind wiederum Richtungstafeln, insbesondere auf Autobahnen (etwa Zeichen 449, 332 oder 453). Barken, Leitpfosten oder Schilder, die sich auf das Parken beziehen, zählen ebenfalls zu den Schildern, die nicht berücksichtigt werden müssen. Weil sie nicht notwendigerweise in Fahrtrichtung orientiert sind, können diese Schilder auch nicht zuverlässig zur Bestimmung der Fahrtrichtung genutzt werden.

Es ist festzuhalten, dass erst mit zunehmender Zahl der Iterationen eine zunehmende Zahl von Schildern eindeutig zugeordnet werden kann. Erst gegen Ende des Verfahrens dürften alle Schilder zugeordnet sein, vorausgesetzt, die Beschilderung ist eindeutig.

Inferenz von Nutzern und Fahrtrichtungen

Der nächste Schritt des Verfahrens besteht darin, aus den zugeordneten Verkehrszeichen und durch die Betrachtung der Geometrie und der Ränder der Verkehrstreifen zu bestimmen, welcher Verkehrsteilnehmer diesen in welche Richtung benutzen darf. Da dies im Straßenverkehr nur bei den wenigsten Flächen eindeutig gekennzeichnet ist, muss das Verfahren außerdem eine ausgangs sehr unvollständige Informationslage bewältigen und so viele Informationen wie möglich müssen aus der Umgebung eines Verkehrstreifens inferiert werden.

Es soll nochmals betont werden, dass ein Verkehrsteilnehmer, der sich auf einem bestimmten Fahrstreifen befindet, zu jedem Zeitpunkt wissen muss, welche Flächen der vor ihm liegenden Straße er befahren darf (siehe A1). Im günstigsten Fall würde also die Kenntnis über die möglichen Fahrtrichtungen einiger weniger Fahrstreifen ausreichen, etwa an den Einfahrten zur kartierten Fläche, um mit diesen sukzessive die gesamten Fahrtrichtungen der restliche Fahrstreifen zu erschließen. Es ist also gar nicht entscheidend, dass von jedem einzelnen Fahrstreifen die Fahrtrichtung explizit bestimmt wird, sondern dass alle Möglichkeiten genutzt werden, um das Wissen über die angrenzenden Fahrstreifen hinweg weiter zu propagieren.

Dafür muss zunächst eine Repräsentation gefunden werden, wie das Wissen über die möglichen Befahrungsrichtungen eines Verkehrstreifensegments dargestellt werden kann. Je Verkehrsteilnehmer gibt es vier mögliche Zustände. Der Verkehrsteilnehmer kann sich entweder *nur vorwärts*, *nur rückwärts*, *in beide Richtungen* oder *gar nicht* darauf bewegen. Initial ist nicht klar, welche von den vier Möglichkeiten korrekt ist. Die Menge möglicher Lösungen umfasst also alle vier Möglichkeiten. Diese Menge wird sukzessive verkleinert, indem ein Satz von Regeln angewendet wird, welche Schritt für Schritt Möglichkeiten ausschließen, bis nur noch eine verbleibt und die Richtungseigenschaft des Verkehrstreifensegments klar ist. Das ist die Grundidee des Verfahrens.

Verfahrensablauf

Einige der verschiedenen Lösungsmengen, die für einen Verkehrstreifen verbleiben können, werden mit ihrer semantischen Bedeutung in Abb. 5.7 dargestellt. Die Aussage „Auf einem Verkehrstreifen kann vorwärts gefahren werden“ sagt also aus, dass die verbleibende Lösungsmenge des Fahrstreifens {nur vorwärts, bidirektional} ist

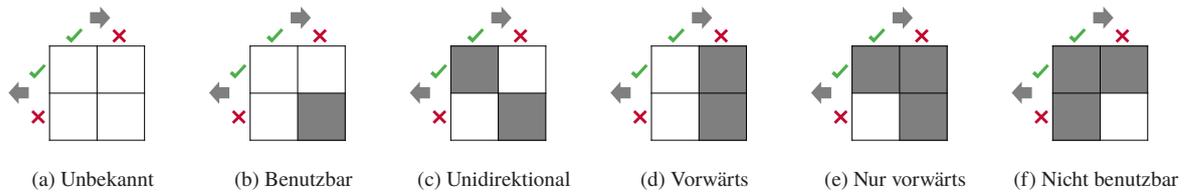


Abbildung 5.7: Mögliche Bewegungsrichtungen auf einem Fahrstreifen (verbleibende weiß, ausgeschlossene grau) und ihre semantische Bedeutung. Die Bewegungsrichtungen der Tabelle sind, von oben links nach unten rechts: *Bidirektional, nur rückwärts, nur vorwärts, nicht benutzbar*.

(Abb. 5.7d). Durch Kombination der semantischen Aussagen kann die Lösungsmenge weiter reduziert werden. Die neue Menge der möglichen Zustände ist dann die Schnittmenge der beiden. So ergibt beispielsweise die Kombination der Aussagen „vorwärts“ und „unidirektional“ zwangsläufig als Ergebnis „nur vorwärts“. Die Aussagen „vorwärts“ und „nicht benutzbar“ führen hingegen zu einem Konflikt, denn die Schnittmenge ist leer.

Auf Basis dieser Grundbegriffe und ihrer Verknüpfung kann nun eine Regelbasis formuliert werden. Initial sind bei einem Verkehrstreifen immer alle Zustände für alle Verkehrsteilnehmer möglich. Regeln, deren Prämisse zutrifft, reduzieren dann die Menge der möglichen Zustände entsprechend ihrer Konklusion, bis nur noch einer je Teilnehmer verbleibt oder bis keine Regel mehr verbleibt, die noch erfolgreich angewendet werden kann. Die Fahrstreifenrichtung wird dabei für die Verkehrsteilnehmer Fahrzeug, Fahrrad und Fußgänger unabhängig voneinander bestimmt. Ein Fahrradweg ist demzufolge ein Verkehrstreifen, den sowohl Fahrzeuge als auch Fußgänger weder vorwärts noch rückwärts benutzen dürfen und Fahrräder in mindestens eine Richtung benutzen sollen. Die Frage nach der Fahrtrichtung und nach den erlaubten Verkehrsteilnehmern lässt sich also in dieser Beschreibung vereinigen. Algorithmus 2 fasst das sich aus diesen Überlegungen ergebende Verfahren zusammen.

Allgemeines zur Regelbasis

Manche der Regeln, die im Folgenden vorgestellt werden, beziehen sich nicht auf einzelne Verkehrstreifen bzw. Fahrstreifen, sondern auf Fahrbahnen, also eine Gesamtheit benachbarter Fahrstreifen. Weil aber noch nicht klar ist, welche Verkehrstreifen Fahrstreifen für Fahrzeuge sind und somit gemeinsam eine Fahrbahn bilden, ist zunächst nicht bekannt, welche Verkehrstreifen zusammen eine Fahrbahn bilden. Es können nur Hypothesen darüber aufgestellt werden, welche Verkehrstreifen zusammen eine Fahrbahn bilden. Solche Hypothesen werden im Folgenden Fahrbahnypothesen genannt.

Es wird davon ausgegangen, dass Fahrbahnen voneinander, bzw. von anderen Straßenbereichen mittels durchgezogener Linien oder Bordsteine getrennt sind. Bordsteine stellen immer den Rand einer Fahrbahn dar, durchgezogene Linien manchmal, aber nicht zwangsläufig. Zwei Fahrstreifen, die durch eine durchgezogene Linie getrennt sind, gehören aber immer zur selben Fahrbahn (siehe VwV-StVO zu §2, Rdnr. 1). Da zu Beginn des Verfahrens noch nicht bekannt ist, wie viele der durch durchgezogene Linien getrennten Verkehrstreifen auch Fahrstreifen sind, kann zunächst nur eine Obergrenze für die Anzahl der Fahrbahnen angegeben werden. Mit zunehmendem Fortschritt des Verfahrens nähert sich die Zahl der Fahrbahnypothesen der tatsächlichen Anzahl von Fahrbahnen an.

Die Regeln müssen also so formuliert werden, dass sie keine Fehlschlüsse verursachen, wenn die Anzahl der Fahrbahnen zum aktuellen Zeitpunkt noch überschätzt wird, es also mehr Fahrbahnypothesen gibt als tatsächliche Fahrbahnen.

Insbesondere bei Verkehrszeichen, die einem Straßenabschnitt zugeordnet werden konnten, ist das von Bedeutung. Es wird davon ausgegangen, dass sich Verkehrszeichen immer nur auf eine Fahrbahn oder einen Sonderweg

Algorithmus 2 : Pseudocode zur Bestimmung der zulässigen Fahrtrichtungen auf Verkehrsstreifen für einen bestimmten Verkehrsteilnehmer

```

// Initialisierung
für alle verkehrsstreifen in menge_der_verkehrsstreifen:
    verkehrsstreifen.mögliche_lösungen = {bidirektional, nur_vorwärts, nur_rückwärts, nicht_benutzbar}

// Anwendung der Regeln
modifiziert = Wahr
ungelöste_verkehrsstreifen = Wahr
während modifiziert und ungelöste_verkehrsstreifen:
    modifiziert = Falsch
    ungelöste_verkehrsstreifen = Falsch
    für alle verkehrsstreifen in menge_der_verkehrsstreifen:
        // Anwenden der Regelbasis
        für alle regel in regelbasis:
            wenn regel.prämisse_erfüllt(verkehrsstreifen):
                modifiziert = Wahr
                verkehrsstreifen.mögliche_lösungen =
                    schnittmenge(verkehrsstreifen.mögliche_lösungen, regel.konklusion)
            wenn verkehrsstreifen.mögliche_lösungen.ist_leer:
                Konflikt: Keine Lösung verbleibt
            sonst wenn verkehrsstreifen.mögliche_lösungen > 1:
                ungelöste_verkehrsstreifen = Wahr

// Evaluation
wenn ungelöste_verkehrsstreifen:
    Mehrdeutigkeit: Es verbleiben Verkehrsstreifen mit mehreren möglichen Lösungen, auf die keine
    Regel mehr angewendet werden kann
sonst:
    Verfahren hat erfolgreich terminiert.

```

beziehen. Wie bereits beschrieben ist das bei Fußwegen offensichtlich, da angenommen wird, dass die zugehörigen Verkehrszeichen nie auf einer anderen Fläche stehen, als die, auf die sie sich beziehen (A34). Bei Fahrbahnen gilt dagegen, dass nie zwei Fahrbahnen direkt nebeneinander sein können, da sie weder durch eine durchgezogene Linie getrennt werden können (siehe weiter oben) noch durch einen Bordstein (A6). Also können sie nur durch bauliche Beschränkungen getrennt sein oder einen dazwischen liegenden Streifen, etwa eine schraffierte Fläche. Weil dann die Zuordnung aber nicht mehr eindeutig wäre (A34), müsste in diesem Fall der Sachverhalt durch mehrere Schilder zu beiden Seiten der Fahrstreifen verdeutlicht werden, die dann wiederum eindeutig zugeordnet werden könnten. Der einzige Fall, für den das nicht gilt, ist das Schild links/rechts vorbei (Zeichen 222), das einmal in seiner Verbotsfunktion und einmal in seiner Erlaubnisfunktion zugeordnet werden kann.

Schließlich gibt es noch die Möglichkeit, dass sich ein Verkehrsschild nur auf einen einzigen Fahrstreifen bezieht. Das kann nur dann der Fall sein, wenn es direkt über dem Fahrstreifen angebracht ist, und wenn es über mindestens einem anderen Fahrstreifen ebenfalls ein solches Schild gibt, sodass die Zuordnung eindeutig ist (VwV-StVO zu §§39-43, Nummer 24).

Daher muss zur Assoziation der Verkehrsschilder zu dem Verkehrsstreifen, auf den sie sich beziehen, eindeutig sein. Das ist immer dann der Fall, wenn andere nicht mehr in Frage kommen, weil dort keine Verkehrsteilnehmer sein können, auf die sich das Schild beziehen kann oder wenn alle Verkehrsstreifen zur selben Fahrbahnhypothese gehören. Eine anfangs unklare Zuordnung kann im Laufe des Verfahrens eindeutig werden, weil in Frage kommende Verkehrsstreifen wegfallen oder wenn mehrere Fahrbahnypothesen vereinigt werden können, weil klar geworden ist, dass sich zu beiden Seiten einer durchgezogenen Linie Fahrstreifen für Fahrzeuge befinden.

Die angewendeten Regeln werden nun eingeführt. Sie stützen und verweisen im Wesentlichen auf die in Kap. 4.2 eingeführten Annahmen. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden dann diese Regeln und ihre Motivation erläutert und schließlich wird anhand eines vereinfachten Beispiels demonstriert, wie diese sich auswirken und warum sie für die Bestimmung der Fahrtrichtungen der einzelnen Teilnehmer geeignet sind.

Lokale Regeln

- R1 Fußgänger bewegen sich auf Verkehrsstreifen entweder *bidirektional* oder in *keine* Richtung.
- R2 Ist auf einem Verkehrsstreifensegment mit einem Pfeil markiert, so ist das Verkehrsstreifensegment entsprechend der Pfeilrichtung *vorwärts* bzw. *rückwärts* befahrbar (folgt aus A36).
- R3 Besteht ein Straßensegment aus drei durch Bordsteine getrennten Fahrbahnsegmenten, und die beiden äußeren bestehen jeweils nur aus einem Verkehrsstreifen, so ist die mittlere *nicht benutzbar* für Fußgänger und die beiden äußeren sind *nicht benutzbar* für Fahrzeuge (A20).
- R4 Verkehrsstreifensegmente, die durch eine gestrichelte Linie (keine Fahrradwegmarkierung) begrenzt werden, sind für Fahrzeuge nur *unidirektional* befahrbar, für Fahrräder *nicht bidirektional* befahrbar – was einschließt, dass sie auch gar nicht befahrbar sein können – und für Fußgänger *nicht benutzbar* (A16 und A17).
- R5 Verkehrsstreifensegmente, die durch eine Fahrradwegmarkierung begrenzt werden, sind für Fahrräder und Fahrzeuge *nicht bidirektional* und für Fußgänger *nicht benutzbar*.
- R6 Ein Verkehrsstreifensegment, das von einem Verkehrsteilnehmer an seinem Ende nicht verlassen werden kann, weil linker und rechter Rand zu nahe beieinander sind, um für diesen passierbar zu sein, und das auch nicht seitlich, etwa über einen Fahrstreifenwechsel, verlassen werden kann, ist für diesen *nicht benutzbar*.
- R7 Kann ein Schild, das kein Verbotsschild ist, einer Fahrbahnhypothese eindeutig zugeordnet werden, so sind alle Verkehrsstreifensegmente darin für den Verkehrsteilnehmer, auf den sich das Schild bezieht, *benutzbar*. Steht das Schild an der Seite der Fahrbahn, ist zumindest der aus der Sicht des Schildes am weitesten rechts liegende Fahrstreifen in Richtung des Schildes benutzbar. Handelt es sich um ein Schild für eine Autobahn oder Kraftstraße, gilt es dagegen für alle Fahrstreifen. Für Fahrräder sind sie dann *nicht benutzbar*. Ist es direkt über einem Fahrstreifen angebracht, so bezieht es sich nur auf diesen.
- R8 Kann ein Verbotsschild einer Fahrbahnhypothese eindeutig zugeordnet werden, so sind deren Verkehrsstreifensegmente in Richtung des Schildes für den Verkehrsteilnehmertyp, auf den es sich bezieht *nicht benutzbar*. Es sei denn, es ist analog zu Regel R7 möglich, dass es sich nur auf einen Fahrstreifen bezieht.

Nachbarschafts-Regeln

- R9 Sind alle Nachfolger eines Fahrstreifens bekannt und nicht in eine bestimmte Richtung benutzbar, so ist dieser Fahrstreifen auch in diese Richtung *nicht benutzbar*.
- R10 Ist ein Verkehrsstreifensegment der rechtsäußerste Nachfolger eines in eine bestimmten Richtung benutzbaren Fahrstreifens von dem alle Nachfolger bekannt sind und ist es nach Regel R6 breit genug für den betrachteten Verkehrsteilnehmer, so ist er ebenfalls in diese Richtung *benutzbar*.
- R11 Ist ein Fahrstreifen für Fahrzeuge in einer bestimmten Richtung benutzbar und ein Fahrstreifenwechsel nach rechts möglich (gestrichelte Linie), so ist der Fahrstreifen rechts ebenfalls in diese Richtung *benutzbar*.

R12 Hat ein Verkehrstreifensegment keinen Nachfolger, der für einen bestimmten Verkehrsteilnehmer benutzbar ist, so ist er in dieselbe Richtung *benutzbar* wie das Verkehrstreifensegment links, bzw. rechts von ihm, sofern ein Fahrstreifenwechsel dorthin möglich ist.

Die Formulierung „alle Nachfolger bekannt“ bezieht sich hierbei auf Fahrstreifen, die an Kreuzungen angrenzen. Erst wenn alle Fahrstreifen innerhalb der Kreuzungsfläche bestimmt wurden, dürfen manche Informationen über Fahrtrichtungen weiter propagiert werden. Der Begriff „Nachfolger“ meint hier einen Fahrstreifen, der an den Start- oder Endpunkten eines Fahrstreifens anschließt. Es gibt hier keine Unterscheidung zwischen Vorgänger und Nachfolger.

R7, R10 und R11 sind die einzigen Regeln, die von Rechtsverkehr ausgehen, und sie müssten bei Linksverkehr entsprechend geändert werden. Alle anderen Regeln sind generisch und lassen sich allesamt aus der A15 ableiten, welche besagt, dass Richtungen nicht einfach verschwinden können.

Die Liste aus Regeln erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Das gilt insbesondere für die lokalen Regeln. Es ist wichtiger, dass garantiert immer nur beweisbar korrekte Schlüsse gezogen werden und diese effektiv propagiert werden können, als dass jede Möglichkeit ausgenutzt wird, frühzeitig noch mehr Wissen über die Fahrtrichtungen zu gewinnen. In dieser Hinsicht ist die Vorgehensweise ähnlich wie in dem Verfahren von Hummel [Hum09], auch wenn hier eine stark vereinfachte Form der Beschreibungslogiken zum Einsatz kommt, die mehr Vorverarbeitung erfordert, aber wesentlich weniger Rechenaufwand bedeutet.

Die Komplexität des Verfahrens verhält sich im schlechtesten Fall quadratisch zur Anzahl der Fahrstreifen ($O(n^2)$), da Informationen aus n Fahrstreifen in maximal n Schritten zu anderen Fahrstreifen propagiert werden müssen. Praktisch ist die Komplexität aber eher linear, da sich alle Informationen entlang der Straße normalerweise regelmäßig wiederholen und daher kein Wissen länger als eine konstante Zahl Schritte propagiert werden muss. Das Verfahren lässt sich so implementieren, dass nur von Fahrstreifen, bei denen sich seit der letzten Iteration der Wissensstand verändert hat, überhaupt versucht wird, Information zu inferieren oder propagieren.

Eine mögliche weitere Regel bestünde darin, dass Radfahrern das Fahren auf der Straße verboten ist, wenn parallel ein Schild einen Fahrradweg bzw. gemeinsame Nutzung des Fußwegs vorschreibt. Da viele Radfahrer das aber ignorieren, ist fraglich, ob das zu einer höheren Sicherheit beitragen würde, auch wenn die Karte dann formal korrekt wäre.

Die Anzahl der Verkehrsteilnehmer, zwischen denen unterschieden wird, lässt sich außerdem leicht um Teilnehmer mit besonderen Rechten, wie etwa Busse, erweitern. In diesem Fall müssten Regeln eingeführt werden, die diesen erlauben, Breitstriche zu überqueren, wenn dahinter ein Busfahrstreifen ist, ansonsten gelten für sie aber weitgehend dieselben Regeln wie für die übrigen Fahrzeuge.

Beispiel

Abb. 5.8 zeigt die Anwendung des Verfahrens für Fahrzeuge an einem exemplarischen Straßenabschnitt. An diesem teilt sich eine von zwei Seitenstreifen gesäumte Fahrbahn in zwei Fahrstreifen ohne Seitenstreifen auf. Initial (Abb. 5.8a) ist bekannt, dass Fahrstreifen B nach rechts und Fahrstreifen J nach links befahrbar ist. Über zwei der Seitenstreifen (A und C) ist bekannt, dass sie nicht befahrbar sind (z.B. aus R6). Aus R4 folgt zudem, dass die Fahrstreifen an der gestrichelten Linie (H, I, J und K) nur in eine Richtung befahren werden können.

Nach den ersten drei Schritten ergibt sich das in Abb. 5.8b dargestellte Bild. Dabei wurden auf die Fahrstreifen E und H R10 und auf Fahrstreifen D R9 angewendet. In den nächsten beiden Schritten wird dann für Fahrstreifen G R10 angewendet, sodass dieser Fahrstreifen nun bidirektional ist. Um nun das Wissen, dass nach links gefahren

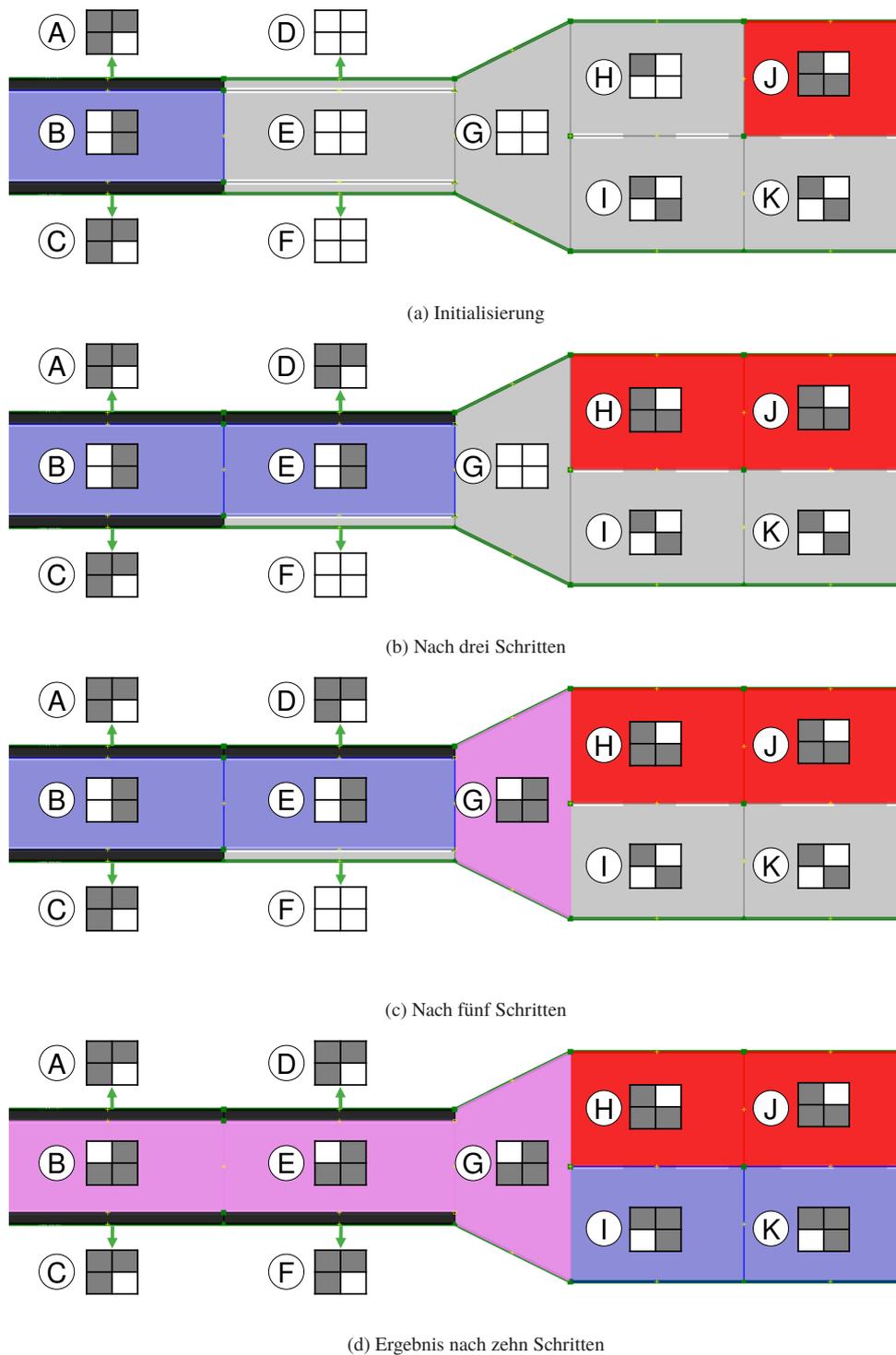


Abbildung 5.8: Beispiel für die schrittweise Propagierung der Fahrtrichtung an einer sich verzweigenden Straße. Der Wissensstand auf den von A bis K bezeichneten Fahrstreifen wird analog zu den Tabellen in Abb. 5.7 dargestellt. Die Farben der Fahrstreifen codieren zusätzlich einen nach rechts (blau), links (rot), in beide Richtungen (violett) oder gar nicht (schwarz) befahrbaren Fahrstreifen.

werden kann, weiter zu propagieren, muss zunächst bekannt sein, dass Fahrstreifen F nicht befahren werden kann, denn sonst gibt es zwei mögliche Fahrstreifen (E und F), auf denen nach links weitergefahren werden kann, von denen einer, keiner oder beide richtig sein können. Die Information, dass auf Fahrstreifen E von links nach rechts gefahren werden kann, lässt sich hingegen weiter nach rechts propagieren. Für die weitere Fahrt nach rechts kommt Fahrstreifen H nicht in Frage, daher muss auf I nach rechts gefahren werden (R10). Die unteren beiden sind hingegen nur in eine Richtung befahrbar, sodass aus der Information, dass hier nach rechts gefahren werden darf, sofort folgt, dass nicht nach links gefahren werden darf.

Abb. 5.8d zeigt nun das Endergebnis. Dazu wurde für F mithilfe von C gefolgert, dass hier nicht gefahren werden darf. Weil E aus Sicht von G der am weitesten rechts liegende, in Frage kommende Fahrstreifen ist, kann auch die Information, dass nach links gefahren werden kann, von G weiter zu E und in Folge zu B übertragen werden (R10). Da nun für jeden Fahrstreifen nur noch eine mögliche Lösung übrig ist, wurde das Verfahren erfolgreich abgeschlossen. Das Ergebnis zeigt eine Fahrbahn, die links bidirektional befahren werden kann und sich nach rechts in zwei Fahrstreifen aufweitet, einen für jede Richtung.

Um ganzheitlich die Fahrstreifen zu bestimmen, reicht es nicht, nur isolierte Straßenabschnitte zu betrachten. An eher informationsarmen Straßenabschnitten in der Innenstadt ist es unbedingt erforderlich, dass Wissen über Fahrstreifen über Kreuzungen hinweg propagiert wird. Daher wird zur vollständigen Erstellung einer Karte ein Ansatz benötigt, mithilfe dessen an eine Kreuzung angrenzende Verkehrstreifen, über die bereits etwas bekannt ist, genutzt werden können, um Fahrstreifen innerhalb der Kreuzung zu ermitteln. Ein Lösungsverfahren dafür wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

6 Inferieren der Kreuzungstopologie

Das Bestimmen der Kreuzungstopologie ist eine große Herausforderung, weil es so viele mögliche Pfade gibt, sie zu befahren. Fahrzeuge können aus unterschiedlichsten Richtungen in die Kreuzung einfahren und sie an vielen Stellen wieder verlassen. Eine einfache vierarmige Kreuzung hat, wenn alle Fahrstreifen miteinander verbunden sind, zwölf unterschiedliche Pfade, die Verkehrsteilnehmer nehmen können. Es ist also völlig unmöglich, für alle Verkehrsteilnehmer Fahrstreifen zu markieren, ohne dass die Übersicht verloren geht. Stattdessen suchen die Verkehrsteilnehmer ihren Weg weitgehend frei und nur teilweise durch Markierungen geleitet durch die Kreuzung. Die Betrachtung von Straßenrändern und Markierungen allein hilft also nur bedingt bei der Bestimmung der Kreuzungstopologie.

Bei der Kreuzungsgestaltung wird nach Möglichkeit sichergestellt, dass die wichtigen Informationen, die ein Verkehrsteilnehmer zur Bewältigung der Kreuzung braucht, in wohldosierten Portionen zur Verfügung gestellt werden. Einerseits sollte er nicht damit überfordert werden, die für ihn relevante Information zu finden und im Kopf zu behalten und andererseits sollten keine Informationen fehlen.

Dazu braucht ein Verkehrsteilnehmer in der Regel nur Kenntnisse über die Abbiegemöglichkeiten, die andere Verkehrsteilnehmer haben, die von demselben Kreuzungsarm in die Kreuzung einfahren. Die Wege der übrigen Verkehrsteilnehmer beeinflussen den eingeschlagenen Weg hingegen nicht.

Informationen werden in mehreren Stufen vermittelt: Zunächst an der Kreuzungseinfahrt durch Schilder oder Pfeile, welche etwa die erlaubten Abbiegerichtungen anzeigen. Innerhalb der Kreuzungen weisen Markierungen, bauliche Einrichtungen, sowie Schilder die Richtung, z.B. um eine Verkehrsinsel herum. Schließlich gibt es noch Schilder am Ausgang der Kreuzung, welche verhindern sollen, dass Verkehrsteilnehmer in der falschen Richtung in eine Straße bzw. Richtungsfahrbahn einfahren. Die Verkehrsteilnehmer wissen daher bei der Einfahrt in die Kreuzung grob, wohin sie fahren dürfen, sehen bei der Einfahrt in die Kreuzung den Arm, den sie dafür ansteuern dürfen, und nutzen dann gegebenenfalls Markierungen und Straßenränder als Leitlinien zu diesem Ziel.

Dieser Sachverhalt ist wichtig, weil er dabei hilft, einzuschätzen, wie die Informationen von einem Verfahren, das die Kreuzung verstehen soll, verarbeitet und priorisiert werden müssen: Die Fahrstreifen am Ausgang einer Kreuzung sind unwichtig und die Markierungen sind nur von nachrangiger Bedeutung. Wichtig sind dagegen die Fahrstreifen am Eingang einer Kreuzung und die Informationen, die dort durch Schilder und Pfeile vermittelt werden. Von den Schildern innerhalb einer Kreuzung sind nur diejenigen wichtig, welche die Einfahrt in Straßenarme oder bestimmte Abschnitte der Kreuzung verbieten.

6.1 Lösungsansatz

Das zentrale Ziel ist das Bestimmen der Korridore, welche die hineinführenden und die herausführenden Fahrstreifen verbinden. Alles andere, etwa Ampeln oder Vorfahrtsregelungen, sind nachrangig und können analog zu den übrigen Straßenabschnitten behandelt werden, nachdem die Korridore bestimmt sind. Es liegt nahe, die Frage nach den Verbindungen zwischen Ein- und Ausgängen als ein kombinatorisches Problem zu betrachten und aus der

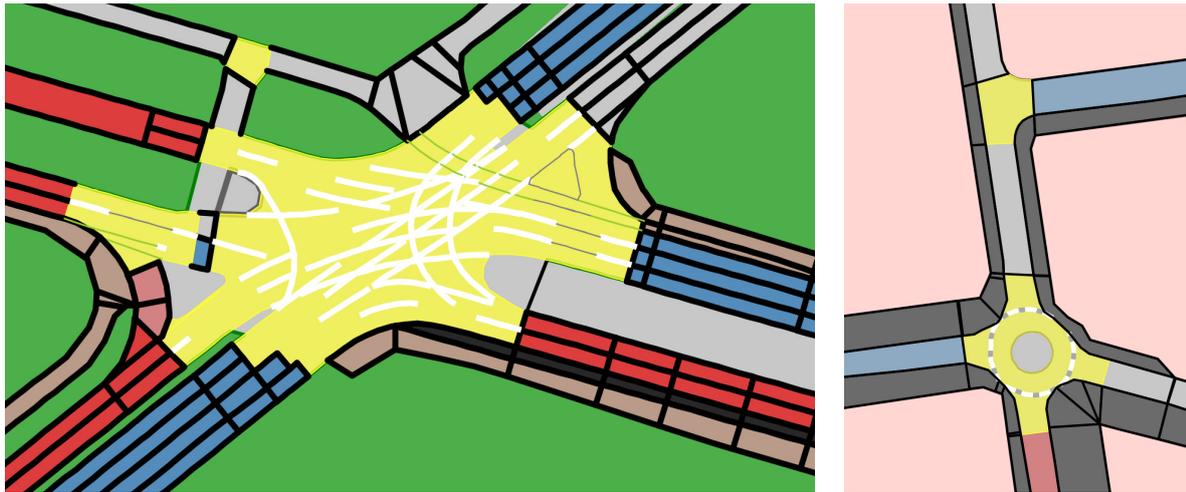


Abbildung 6.1: Links: mehrstreifige Kreuzung, rechts: mehrere kleinere Kreuzungen im Innenstadtbereich. Kreuzungsflächen in Gelb, bekannte hineinführende Fahrstreifen blau, bekannte herausführende Fahrstreifen rot, unbekannte Verkehrsstreifen hellgrau, nicht für Fahrzeuge benutzbare dunkelgrau.

Menge aller möglicher Kombinationen letztendlich diejenige auszuwählen, die korrekt sein muss. Eine Menge aus solchen Verbindungen, die eine mögliche Teillösung für die Kreuzung darstellt, wird im Folgenden oft auch eine *Konfiguration* genannt.

Leider führt die naive Betrachtung aller möglicher Kombinationen schnell an Grenzen. Zu einem Kreuzungseingang mit n möglichen Ausgängen gibt es 2^n mögliche Kombinationen für Verknüpfungen mit den Ausgängen, denn jeder Ausgang hat die binäre Möglichkeit, Teil einer Konfiguration zu sein oder nicht. Jeder weitere Ausgang verdoppelt daher die Anzahl an Möglichkeiten. Für die gesamte Kreuzung mit m Eingängen ergeben sich damit 2^{nm} mögliche Konfigurationen. Eine einfache Kreuzung mit vier Ein- bzw. Ausgängen hat also 65536 mögliche Lösungen. Bei fünf sind es schon 33 Millionen, bei mehrstreifigen Kreuzungen, etwa mit 8 hineinführenden und 8 herausführenden Fahrstreifen sind es schließlich etwa $2 \cdot 10^{19}$ Möglichkeiten. Dieser kombinatorische Sachverhalt erfordert einen behutsamen Umgang bei der Betrachtung einzelner Kombinationen, da sonst die Berechnungszeit unbeherrschbar wird.

Zur Reduktion der Kombinationen, die betrachtet werden müssen, lässt sich ausnutzen, dass Kreuzungen in Arme unterteilt sind. Fahrstreifen einzelner Arme sind nie untereinander verbunden. Wendemanöver werden nicht betrachtet, da sie, wie in Kap. 4.1 bereits ausgeführt, kein Alltagsmanöver darstellen, für das in einer Karte extra ein Fahrstreifen vorhanden sein müsste.

Die Betrachtung einzelner Arme anstatt der ganzen Kreuzung reduziert das kombinatorische Problem erheblich. Wie eingangs erörtert, brauchen Fahrer in der Regel nur Kenntnis über ihren eigenen Arm und nicht etwa den Verlauf anderer Korridore von anderen Armen. Daher liegt es nahe, zunächst isoliert für jeden hineinführenden Arm zu bestimmen, welche Verbindungen der einzelnen Fahrstreifen zu den anderen Fahrstreifen der herausführenden Arme möglich sind. Erst wenn hier nur noch eine überschaubare Anzahl Möglichkeiten verbleibt, ergibt es Sinn, alle Möglichkeiten aus allen hineinführenden Armen zu verknüpfen, um so mögliche Gesamtkonfigurationen für die Kreuzung zu erhalten. Durch Betrachtung der Kreuzung als Ganzes lassen sich dann im Idealfall so lange Gesamtkonfigurationen aussortieren, bis nur noch eine verbleibt, welche dann die korrekte Konfiguration sein muss. Gibt es am Ende keine valide Konfiguration mehr, gab es einen Konflikt, da die getroffenen Annahmen aus Kapitel 4.2 nicht erfüllt waren.

Da das hier entwickelte Verfahren Teil eines iterativen Verfahrens ist (vgl. Abb. 5.1), steht gerade zu Beginn des Verfahrens relativ wenig Information über die Umgebung einer Kreuzung zur Verfügung. Das führt gerade bei großen Kreuzungen dazu, dass mitnichten eine einzige Konfiguration übrig bleibt, sondern etliche. In vielen Fällen ist nicht einmal bekannt, ob ein angrenzender Verkehrstreifen überhaupt ein Fahrstreifen ist oder ein Seitenstreifen. Auch die Richtungen, welche vor der Kreuzung durch Pfeile oder Schilder verdeutlicht werden, sind nicht immer bekannt, etwa wenn sich direkt vor der eigentlichen Kreuzung eine kleinere Kreuzung befindet. Dies ist beispielsweise in Abb. 6.1 links zu sehen: Direkt vor der Kreuzung befindet sich links eine weitere Kreuzungsfläche, die durch eine separate Abbiegefahrbahn verursacht wird. In dieser Kreuzungsfläche befindliche Pfeile können daher zunächst nicht der großen Kreuzung zugeordnet werden. Immerhin sind in diesem Beispiel fast alle Fahrtrichtungen bekannt, da bei großen Kreuzungen gewöhnlich Pfeile auf den hineinführenden Fahrstreifen aufgetragen werden, aus welchen sich Fahrtrichtungen ableiten lassen. In der Innenstadt dagegen sind solche Merkmale, aus denen sich die Fahrtrichtungen ableiten lassen, viel seltener, vgl. etwa Abb. 6.1 rechts, wo von sechs Fahrbahnen im Bild gerade einmal bei dreien eine von zwei Fahrtrichtungen bekannt ist. Tatsächlich sind jedoch alle Fahrbahnen bidirektional.

Ein weiteres Problem ist, dass die Pfeile, welche zur Verdeutlichung von möglichen Fahrtrichtungen im Straßenverkehr benutzt werden, maschinell nicht leicht zu interpretieren sind: Wie viel Grad genau ist „links“? Bei Straßen, die durch einen Grünstreifen in zwei separate Fahrbahnen aufgeteilt sind, gibt es gleich zwei mögliche Kreuzungsarme, die gemeint sein können. Bei ungünstig geformten Kreuzungen eventuell mehr. Das Verfahren muss also auch Lösungen finden können, wenn beispielsweise die Frage nach einem linken Kreuzungsarm nicht eindeutig beantwortet werden kann.

Diese dünne Informationsbasis darf trotzdem kein Grund dafür sein, dass eine Kreuzung nicht zur Gesamtlösung beiträgt. Das iterative Verfahren kann nur erfolgreich sein, wenn in jedem Schritt neue Information gewonnen werden kann, auch wenn eine Kreuzung zunächst nicht vollständig gelöst wurde. Dafür lässt sich ausnutzen, dass durch das oben beschriebene Verfahren die Gesamtheit aller möglichen Lösungen einer Kreuzung bekannt ist. Gibt es Schnittmengen zwischen diesen möglichen Lösungen, lässt sich daraus folgern, dass diese auf jeden Fall eine richtige Teillösung sind. Kommt also in allen Lösungen eine bestimmte Verbindung zwischen zwei Fahrstreifen vor, muss diese richtig sein. Sie kann schon einmal als korrekte Teillösung der Kreuzung hinterlegt werden, ohne dass die vollständige Lösung bekannt ist. Außerdem kann, wenn ein angrenzender Fahrstreifen in allen übrigen Möglichkeiten ein Kreuzungsausgang bzw. -eingang ist, immerhin diese Information genutzt werden, selbst wenn innerhalb der Kreuzung kein Korridor bestimmt werden kann.

6.2 Überblick über das Verfahren

Die Grundidee des Verfahrens besteht darin, zunächst die Informationslage über die Kreuzung und die angrenzenden Fahrstreifen zu untersuchen: Welche Fläche darf befahren werden? In welche Richtungen darf von einem bestimmten Fahrstreifen aus gefahren werden? Welche Fahrstreifen sind mögliche Eingänge, welche sind mögliche Ausfahrten? Welche Schilder und Markierungen könnten innerhalb der Kreuzung die Teilnehmer beeinflussen? Anschließend kann für jeden Arm individuell bestimmt werden, welche Fahrstreifen von welchem Fahrstreifen eines Armes aus erreicht werden können. Dabei werden auf mögliche Lösungen eine Reihe von Kriterien angewendet, die prüfen, ob die Lösung valide ist.

Schließlich können alle verbliebenen Lösungen je Arm zu der Menge von Gesamtkonfigurationen kombiniert werden. Auch auf diese werden dann Kriterien angewendet, welche die Kreuzung als Ganzes bewerten, um nicht valide Lösungen auszusortieren. Aus den übrigen Gesamtkonfigurationen wird eine Schnittmenge gebildet, die zugehörigen Korridore berechnet und dem Straßennetz hinzugefügt. Algorithmus 3 fasst das Verfahren zusammen.

Algorithmus 3 : Pseudocode zur Bestimmung des Fahrstreifenverlaufs innerhalb von Kreuzungen

```

adjazenzmatrix = bestimme_befahrbare_pfade(kreuzung)
lösungen_pro_arm = Liste()
// Bestimmung möglicher Lösungen je Arm
für alle i in [0, kreuzung.arme.länge):
    lösungen_pro_arm[i] = bestimme_mögliche_lösungen(adjazenzmatrix, kreuzung.arme[i])
    // Eliminiere Lösungen, die der Regelbasis widersprechen
    für alle mögliche_lösung in lösungen_pro_arm[i]:
        für alle regel in arm_regelbasis:
            wenn nicht regel.trifft_zu(mögliche_lösung):
                lösungen_pro_arm[i].entferne(mögliche_lösung)
            abbrechen
        wenn lösungen_pro_arm[i].ist_leer:
            Konflikt: Keine Lösungen mehr übrig

// Gesamtlösungen berechnen und eliminieren
gesamtlösungen = bestimme_alle_kombinationen(lösungen_pro_arm)
für alle mögliche_lösung in gesamtlösungen:
    für alle regel in gesamt_regelbasis:
        wenn nicht regel.trifft_zu(mögliche_lösung):
            gesamtlösungen.entferne(mögliche_lösung)
        abbrechen

wenn gesamtlösungen.ist_leer:
    Konflikt: Keine Lösungen mehr übrig
sonst wenn gesamtlösungen.laenge > 1:
    teillösung = bestimme_schnittmenge(gesamtlösungen)
    Keine eindeutige Lösung mit vorhandenem Wissen möglich, wende Teilösung an
sonst:
    Kreuzung wurde gelöst

```

Für die einzelnen Schritte werden auf den folgenden Seiten Lösungen vorgestellt (Abschnitte 6.3, 6.4.1 und 6.4.2). Dabei wird zunächst vorausgesetzt, dass es ein Verfahren gibt, das prüfen kann, ob es einen validen Pfad zwischen zwei Fahrstreifen gibt. Weiterhin wird eine Metrik als vorhanden angenommen, welche die Eignung dieses Pfades aus der Sicht eines Fahrers bewertet. Eine Methode, die das umsetzt und hieraus Korridore bestimmt, wird schließlich in Abschnitt 6.5 vorgestellt.

6.3 Analyse der Kreuzungsgeometrie

Ausgangspunkt der Kreuzungsbestimmung ist die in A9 in Kap. 4.2 definierte Kreuzungsfläche, wie sie im vorangegangenen Kap. 5.2 bestimmt wurde. Um die Kreuzungen analysieren zu können, muss sie in eine Beschreibungsform gebracht werden, die es ermöglicht, sie mit logischen Regeln zu analysieren. Der Fokus liegt auf der Bestimmung der Korridore für Fahrzeuge. Fußgänger und Fahrradfahrer werden zunächst ausgenommen. Fußgänger, weil sie auf Kreuzungen gewöhnlich eigene Flächen benutzen und deswegen separat betrachtet werden können, und Radfahrer, weil sie auf Kreuzungen oft nicht konsistent markierte Fahrradwege haben, wie auch schon Hummel [Hum09, S. 129] beobachtet hat, sodass die folgenden Überlegungen nicht auf Fahrradfahrer zutreffen.

Um eine Kreuzung beschreiben zu können, muss sie sowohl geometrisch als auch topologisch untersucht werden. Wenn man eine Kreuzung rein geometrisch betrachtet, hat man es mit einer Struktur zu tun, die aus mehreren offenen Einmündungen besteht, welche jeweils durch eine Kette von Rändern verbunden sind. Es wird deswegen von mehreren Rändern gesprochen, weil der Randtyp – also Straßenrand, Bordstein, etc. – zwischen zwei Einmündungen

mehrfach wechseln kann. Die Kreuzungsfläche kann weiterhin Löcher aufweisen, die etwa durch Verkehrsinseln hervorgerufen werden. Auf der Fahrbahnoberfläche, die durch den Bereich zwischen Rändern und Löchern definiert wird, sind Markierungen. Schließlich befinden sich in der Nähe der Ränder oder Löcher Verkehrsschilder, die durch ihre Ausrichtung und Positionierung den Verkehr leiten. Sie tun das entweder, indem sie die Richtung weisen, oder die Einfahrt verbieten, wie etwa in Bild 1.1 auf den ersten Seiten dieser Arbeit.

Kreisverkehre, die durch Verkehrszeichen 215 (Kreisverkehr) gekennzeichnet sind – es befindet sich also ein solches Schild in oder unmittelbar vor der Kreuzungsfläche – benötigen eine gesonderte Behandlung, weil die zum Kreisverkehr gehörige Insel gefunden werden muss (siehe Abschnitt 6.5). Eine Insel wird baulich entweder als ein Bordstein oder ein Breitstrich ausgeführt (VwV-StVO zu Zeichen 215) und wird nicht immer durch Zeichen 211 (hier rechts) kenntlich gemacht (ebenda).

Für die Topologie der Kreuzung sind dagegen die angrenzenden Verkehrsstreifen wichtig. Jeder angrenzende Verkehrsstreifen kann in eine bestimmte, eventuell unbekannte Richtung befahrbar sein und gehört zu einem Kreuzungsarm. Gemäß A25 gehören Fahrstreifen dann zum selben Kreuzungsarm, wenn sie eine Markierung als gemeinsamen Rand teilen oder wenn es bis zur nächsten Kreuzung ein Straßensegment gibt, das ein gemeinsamer Vorgänger der beiden Fahrstreifen ist. Da angenommen wird, dass sich Fahrstreifen am Kreuzungseingang bzw. Kreuzungsausgang nicht überlappen (A12), ist es möglich, die Fahrstreifen in der Reihenfolge, in der sie an den Kreuzungsrand angrenzen, durchzunummerieren. Da Kreuzungsarme sich nicht überschneiden können, gehören alle Fahrstreifen, die zwischen zwei Fahrstreifen desselben Kreuzungsarms liegen, ebenfalls dazu. Ein Beispiel ist in Abb. 6.2 zu finden. In diesem Fall grenzen neun im Uhrzeigersinn nummerierte Fahrstreifen an die Kreuzung an. Die Fahrstreifen 1 und 2 gehören hier z.B. zum selben Arm, da sie sich eine gestrichelte Markierung teilen. Der Fahrstreifen 3 gehört nicht mehr dazu, da er durch einen Grünstreifen getrennt ist. Alle weiteren Fahrstreifen, z.B. 4, können folglich auch nicht mehr dazu gehören. Erst für den Fahrstreifen 9 wäre das wieder möglich, aber bei dem gemeinsamen Rand handelt es sich auch hier um einen Grünstreifen.

Die Fahrstreifen können Informationen über die Fahrtrichtung haben, wobei ein *eventuell herausführender Fahrstreifen* ein Fahrstreifen ist, von dem nicht bekannt ist, dass er nicht in herausführender Richtung befahren werden kann. Ein *definitiv herausführender Fahrstreifen* ist ein Fahrstreifen, von dem bekannt ist, dass er in herausführender Richtung befahren werden kann. Analoges gilt für hineinführende Fahrstreifen.

Fahrstreifen können zudem Abbiegeinformationen haben, die beeinflussen, wohin gefahren werden darf. Ein Fahrstreifen hat dann Abbiegeinformation, wenn er oder einer seiner Vorgänger – bis zur nächsten Kreuzung oder einem bestimmten Maximalabstand – einen Pfeil einschließt, der zur Kreuzung hin ausgerichtet ist, oder dem ganzen Kreuzungsarm ein Schild zugeordnet werden kann, das Richtungsinformation trägt (vgl. A22). Hierbei müssen gegebenenfalls Sonderfälle berücksichtigt werden, in denen Pfeile keine verbindliche Bedeutung haben (vgl. Kap. 4.1 zu Kreuzungen). Die Abbiegeinformation kann auch unbestimmt sein, nämlich dann, wenn eine davorliegende Kreuzung es nicht ermöglicht, alle vorausgehenden Fahrstreifen bis zu einem gewissen Abstand nach einem Pfeil zu durchsuchen. Diese Abbiegeinformation lässt sich erst später, wenn die Arme in dieser Kreuzung bestimmt sind, ermitteln.

Aus der Gesamtheit der Fahrstreifen eines Kreuzungsarms lassen sich auch Aussagen über den Kreuzungsarm ableiten. Eine *eventuelle Kreuzungsausfahrt* ist ein Kreuzungsarm, der mindestens einen eventuell herausführenden Fahrstreifen enthält. Eine *definitive Kreuzungszufahrt* ist ein Arm, der mindestens einen definitiv hineinführenden Fahrstreifen enthält. Analoges gilt für hineinführende Fahrstreifen im Zusammenhang mit Kreuzungszufahrten.

In Abb. 6.2 sind die relevanten Informationen zusammen mit den Fahrstreifen dargestellt. Hier sind bei vier Fahrstreifen (1, 2, 6 und 7) die Abbiegerichtungen durch Pfeile gegeben. Außerdem sind fünf Zufahrten bekannt, aber es ist nicht bekannt, welche Fahrstreifen herausführende Fahrstreifen sind.

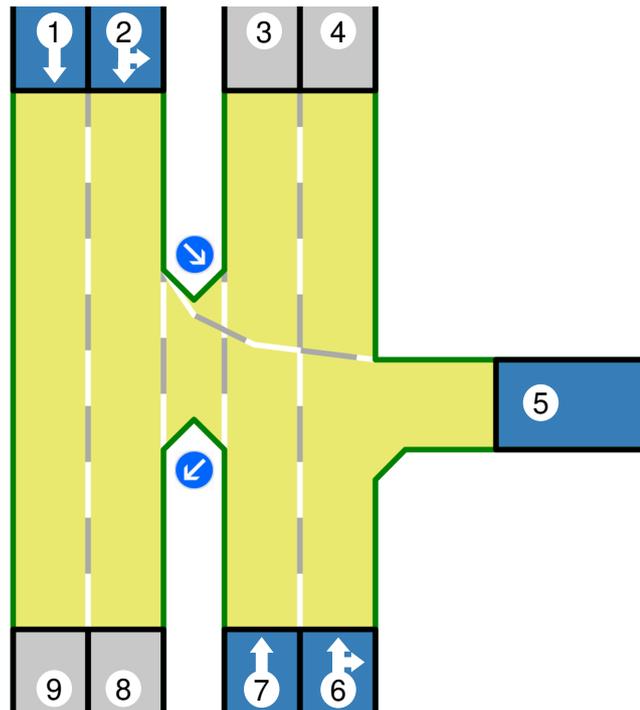


Abbildung 6.2: Beispiel für eine Kreuzung mit neun angrenzenden Fahrstreifen. Kreuzungsfläche in Gelb, definitiv hineinführende Fahrstreifen blau, übrige Fahrstreifen mit unbekannter Fahrtrichtung grau.

6.4 Regelbasierte Lösung der Kreuzung

Zu jeder Kreuzung seien nun die möglichen Fahrstreifen je Arm, die Abbiegeinformation, sowie die von einem Fahrstreifen erreichbaren Fahrstreifen gegeben. Ein Ansatz zur Bestimmung der erreichbaren Fahrstreifen wird in Kap. 6.5 vorgestellt.

Abb. 6.3 zeigt ein exemplarisches Ergebnis für die Erreichbarkeiten der einzelnen Fahrstreifen zu der Kreuzung aus Abb. 6.2. Es berücksichtigt, dass Arme nicht mit sich selbst verbunden sein können und alle Verbindungen zu den Fahrstreifen 1, 2, 7 und 8 den beiden Verkehrsschildern „hier rechts“ widersprechen würden. Außerdem sind die Fahrstreifen 8 und 9 nicht von 6 und 7 erreichbar, weil dafür ein Wenderadius nötig wäre, der das Fahrzeug zu weit vom Fahrbahnrand entfernen würde. Dasselbe gilt für die Verbindung zwischen den Fahrstreifen 1, 2 und 3, 4.

6.4.1 Bestimmung möglicher Fahrstreifen je Arm

Die möglichen Konfigurationen eines Arms können aus der Adjazenzmatrix sofort bestimmt werden. Jeder Fahrstreifen, der von einem Fahrstreifen erreicht werden kann, ist eine Verbindung, die entweder Teil einer Konfiguration ist oder nicht. In dem Beispiel sind für den Kreuzungsarm, zu dem die Fahrstreifen 1 und 2 gehören, sechs Verbindungen möglich. Es gibt also $2^6 = 64$ mögliche Kombinationen. Diese werden nun sukzessive durch Anwendung der folgenden Kriterien eliminiert:

- R1 Korridore desselben Arms, die an unterschiedlichen Fahrstreifen beginnen, dürfen sich nicht überlappen oder kreuzen (A26).
- R2 Definitiv hineinführende Fahrstreifen müssen auch ein Ziel haben (A23).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									

Abbildung 6.3: Adjazenzmatrix für die Kreuzung aus 6.2. Eine Zeile repräsentiert einen hineinführenden, eine Spalte einen herausführenden Fahrstreifen. Ausgegraute Zellen markieren eine nicht zulässige Verbindung.

- R3 Haben benachbarte Fahrstreifen Pfeile und weisen diese teilweise in dieselbe Richtung, müssen sie auch einen gemeinsamen Kreuzungsarm als Ziel haben.
- R4 Haben benachbarte Eingänge Pfeile und weisen diese nicht in dieselbe Richtung, dürfen sie auch keinen gemeinsamen Kreuzungsarm als Ziel haben.
- R5 Haben Eingänge einen Pfeil, dürfen nur diejenigen Arme erreicht werden, welche möglicherweise herausführend sind und der Pfeilrichtung entsprechen. Das ist dann der Fall, wenn der Ausfallswinkel des jeweiligen Arms aus Sicht des betrachteten Eingangsarms die Differenz zum vom Pfeil gebildeten Winkel minimiert, oder die Winkeldifferenz des Arms zum am besten passenden Arm hinreichend klein ist.
- R6 Ein Fahrstreifen mit einem Pfeil muss so viele Arme erreichen, wie der Pfeil Richtungen angibt.
- R7 Hat ein Kreuzungsarm mehrere definitiv hin- oder herausführende Fahrstreifen, darf keine Verbindung einen Fahrstreifen davon zu einem bidirektionalen Fahrstreifen machen (A17).
- R8 Ist eine bestimmte Kreuzungsausfahrt Teil der Konfiguration, müssen alle definitiven Ausgänge dieses Arms verbunden sein, sofern sie erreichbar sind (A29).
- R9 Hat eine Kreuzungszufahrt belegbar keine Beschränkungen bezüglich der Abbiegerichtung, muss sie alle Arme verbinden, die erreichbar sind (A31).
- R10 Wird ein Arm von einem anderen Arm erreicht und ist bekannt, welcher der rechtsäußere erreichbare Fahrstreifen des Arms ist, so muss er auch verbunden werden.
- R11 Sind alle hineinführenden Fahrstreifen eines Arms bekannt und alle Konfigurationen führen nur noch zu definitiv herausführenden Fahrstreifen, wird nach Anwendung aller übrigen Regeln nur diejenige Konfiguration beibehalten, die ein Fahrer als die günstigste erachten würde (A30).
- R12 Die Konfiguration muss alle bisher bestehenden Verbindungen einer Kreuzung enthalten. Das ist erforderlich, da das Verfahren iterativ auf bestehende Teillösungen angewendet wird.

Die Regeln können in beliebiger Reihenfolge angewendet werden. Es liegt nahe, Regeln, die schneller berechnet werden können und die meisten Lösungen aussortieren, zuerst anzuwenden. Das gilt insbesondere für Regel R1 (im Folgenden wird dies zu R1 abgekürzt). Angenommen, die Eingänge in einer Konfiguration sind im Uhrzeigersinn sortiert, dann müssen die zugehörigen herausführenden Fahrstreifen gegen den Uhrzeigersinn sortiert sein und kein herausführender Fahrstreifen darf mehrfach vorkommen. Die Konfiguration $\{1 \rightarrow 8, 2 \rightarrow 8, 2 \rightarrow 9\}$ (vgl. Abb. 6.4b) ist

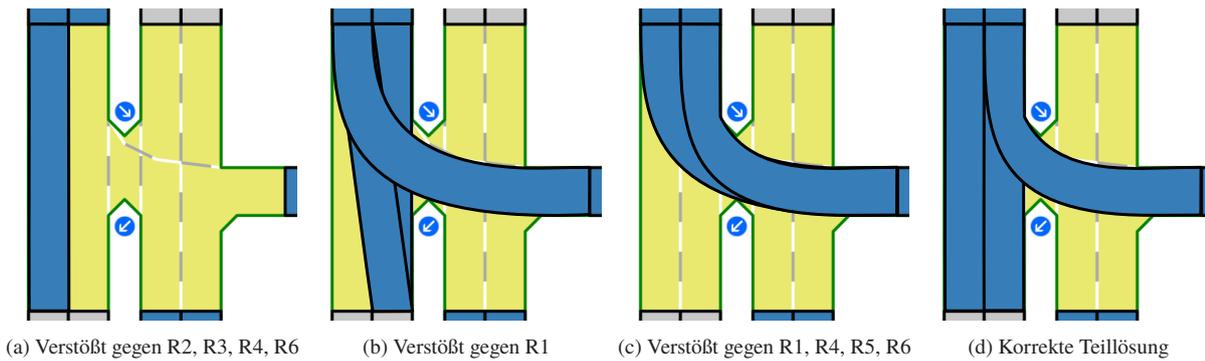


Abbildung 6.4: Einige der möglichen Konfigurationen für den Arm bestehend aus den Fahrstreifen 1 und 2 aus Abb. 6.2

daher gleich aus mehreren Gründen nicht valide. Zum einen, weil sowohl 1 als auch 2 den Fahrstreifen 8 erreichen, also kollidieren und zum anderen weil die Verbindung 2→8 die Verbindung 2→9 kreuzt.

Die meisten der oben beschriebenen Regeln entsprechen der Intuition oder sie werden durch bereits erläuterte Annahmen motiviert. R2 eliminiert offensichtlich falsche Lösungen wie die in Abb. 6.4a. R3 verhindert, dass die Lösung $\{1 \rightarrow 9, 1 \rightarrow 8, 2 \rightarrow 5\}$ valide ist, da sie den Pfeilen widersprechen würde. Zusammen mit R6 folgt bereits, dass Fahrstreifen 1 mit Fahrstreifen 9 verbunden sein muss und Fahrstreifen 2 mit 5 und 8, da sonst keine andere Lösung mehr übrig bleibt, wie beide Fahrstreifen zu einem Arm führen können. Dazu muss nicht einmal bekannt sein, ob die Fahrbahnen 8 und 9 überhaupt herausführende Fahrbahnen sind. Ähnliches gilt für 6 und 7. Hätte Fahrstreifen 2 nur einen Pfeil nach links, müsste Fahrstreifen 1 mit 8 und 9 verbunden sein, da das aus R4 und R8 folgt.

R5 kann auf die verbleibenden Lösungen nicht mehr erfolgreich angewendet werden, weil nur noch Verbindungen verbleiben, die zu den Pfeilrichtungen passen. Die Regel hätte aber auf die Konfiguration in Abb. 6.4c angewendet werden können, denn zu der Pfeilrichtung „geradeaus“ passt der von 8 und 9 gebildete Arm mit einem Differenzwinkel von 0° am besten, gemeinsam mit dem von 8 und 7 gebildeten Arm, welcher ebenfalls einen Differenzwinkel von 0° hat. Der Fahrstreifen 5 passt hingegen nicht.

R11 kommt ebenfalls nicht zum Anwendung, da der einzige sinnvolle Einsatz bei Fahrstreifen 5 ist und es hier nur Markierungen zu 2 gibt, welche den Pfad günstig erscheinen lassen. Dieser kann aber nicht erreicht werden, weil dies dem Verkehrsschild widerspricht.

Für R11 muss zudem bestimmt werden, welchem Pfad genau ein Verkehrsteilnehmer folgen würde (siehe Kap. 6.5) und dafür muss ein Gütemaß aufgestellt werden, dessen Berechnung vergleichsweise aufwendig ist. Anders als andere Regeln stellt diese Regel keinen unstrittigen Sachverhalt dar, sondern modelliert menschliches Verhalten. Es besteht also die Möglichkeit, dass ein falscher Pfad priorisiert wird. Daher erfüllt die Regel eine Rolle als letzte Instanz zur Lösung von Fällen, die durch andere Regeln nicht vollständig gelöst werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn sich innerhalb der Kreuzung zwei Fahrstreifen auf drei aufweiten, denn in solchen Fällen deuten oft nur Markierungen darauf hin, auf welcher Seite der neue Fahrstreifen hinzukommt. Da die Regel nur dann angewendet wird, wenn die Richtungen der betrachteten hinein- und herausführenden Fahrstreifen bereits bekannt sind, ist sichergestellt, dass eine Kreuzung, in der dieses Gütemaß unzutreffend ist, nicht die umliegenden Fahrstreifen beeinflusst.

Für den Arm von 1 und 2 verbleibt nur noch eine Lösung, nämlich die aus Abb. 6.4d, da sie die einzige ist, bei der sich die Korridore nicht überkreuzen (R1), die allen Pfeilen folgt und außerdem fahrbar ist (Abb. 6.3). Wie aus der Symmetrie ersichtlich ist, gibt es auch für den Arm aus 6 und 7 eine eindeutige Lösung. Alle Gesamtlösungen werden diese Lösungen als Teillösung enthalten (Abb. 6.5a). Sie ist also Teil der gemeinsamen Schnittmenge aller

Gesamtlösungen und könnten, falls der Rest mit dem bestehenden Wissen über die angrenzenden Fahrstreifen nicht gelöst werden kann, bereits übernommen werden. Die übrigen Arme können, wie gleich gezeigt wird, mit dieser Methode nicht vollständig gelöst werden.

6.4.2 Bestimmung möglicher Gesamtkonfigurationen

Bei den verbleibenden Armen gestaltet sich die Lösung wegen des geringen Wissens über die Fahrstreifen 3, 4 sowie 8 und 9 schwieriger. Etwa für Fahrstreifen 5: Da er definitiv hinein führt, muss er mit irgendetwas verbunden sein (R2). R9 kann ebenfalls angewendet werden, denn da die Abbiegerichtung nicht beschränkt ist, darf in alle Richtungen gefahren werden, die nicht verboten sind. Demzufolge muss er Fahrstreifen 3 und/oder 4 und 8 und/oder 9 erreichen. Aus dem Rechtsfahrgebot (R10) folgt zudem, dass von den oben genannten zumindest Fahrstreifen 4 oder 9 erreicht werden müssen. Weitere Aussagen können zunächst nicht getroffen werden, ohne mehr über die möglichen Fahrtrichtungen in diesen Armen zu wissen.

Bei der Betrachtung dieser Arme lässt sich aber ebenfalls keine Lösung finden, weil nicht bekannt ist, ob sie überhaupt Eingänge sind oder nicht. Die leere Menge ist also eine valide Lösung, aber alle anderen Lösungen lassen sich ebenfalls nicht eliminieren. Die Lösung ist aber offensichtlich: Weil die Fahrstreifen jeweils durch Fahrstreifenbegrenzungen getrennt sind, können sie nicht bidirektional sein (A17). R7 kann aber nicht angewendet werden, weil bei isolierter Betrachtung des Fahrstreifens nicht klar ist, dass aus der Betrachtung der anderen Fahrstreifen bereits hervorgegangen ist, dass es sich hier um Ausgänge handelt. Hier führt also nur eine globale Betrachtung der möglichen Lösungen zum Ziel.

Daher werden weitere Regeln aufgestellt, welche auf die globalen Lösungen der Kreuzung angewendet werden. Im Falle der Kreuzung verbleiben je 20 Möglichkeiten für die beiden Arme (64 abzüglich Überschneidungen im Sinne von R1), sowie vier Möglichkeiten für den Fahrstreifen 5 (sicher Fahrstreifen 4 und 9, und möglicherweise 3 und 8) und jeweils eine Möglichkeit für die anderen beiden Arme. Es bleiben also noch 1600 mögliche Gesamtlösungen der ursprünglich $2^{24} \approx 17$ Millionen, die aus der Adjazenzmatrix in Abb. 6.3 hervorgehen.

Zur Eliminierung der Gesamtkonfigurationen werden die folgenden Regeln angewendet:

- R13 Die Gesamtkonfiguration darf der Fahrtrichtung der angrenzenden Fahrstreifen nicht widersprechen: Ein Fahrstreifen, der nur in eine Richtung befahren werden kann, darf nicht zu einem bidirektionalen Fahrstreifen werden. Ein Fahrstreifen, der definitiv ein Ausgang ist, muss verbunden sein (A15).
- R14 Eingehende und ausgehende Verbindungen zwischen zwei Armen dürfen sich nicht überkreuzen (A27).
- R15 Erreichen mehrere Arme die selbe Kreuzungsausfahrt, so müssen auch alle die selben Fahrstreifen dieser Kreuzungsausfahrt erreichen, sofern sie von dem jeweiligen Arm erreichbar sind.
- R16 Ist bei einem bestimmten Arm die Summe der Ein- bzw. Ausgänge größer als Eins, so darf keiner der Eingänge in dieser Konfiguration bidirektional sein (A17).

Im Beispiel aus Abb. 6.2 können damit die verbliebenen Kombinationen bis auf eine eliminiert werden. Einige dieser Kombinationen sind in Abb. 6.5 dargestellt. Alle Konfigurationen, die beinhalten, dass ein Fahrstreifen von den Fahrstreifen 3, 4, 8 und 9 wegführt, können nun unter Anwendung von R13 eliminiert werden, da sie zu bidirektionalen Fahrstreifen führen würden (z.B. Abb. 6.5d und Abb. 6.5e).

Weil Fahrstreifen 5 sicher beide Arme, (3, 4) und (8, 9), erreichen muss und somit Lösungen wie in Abb. 6.5b nicht möglich sind, folgt aus R15, dass dieser alle Fahrstreifen der beiden Arme verbinden muss. Damit verbleibt nur

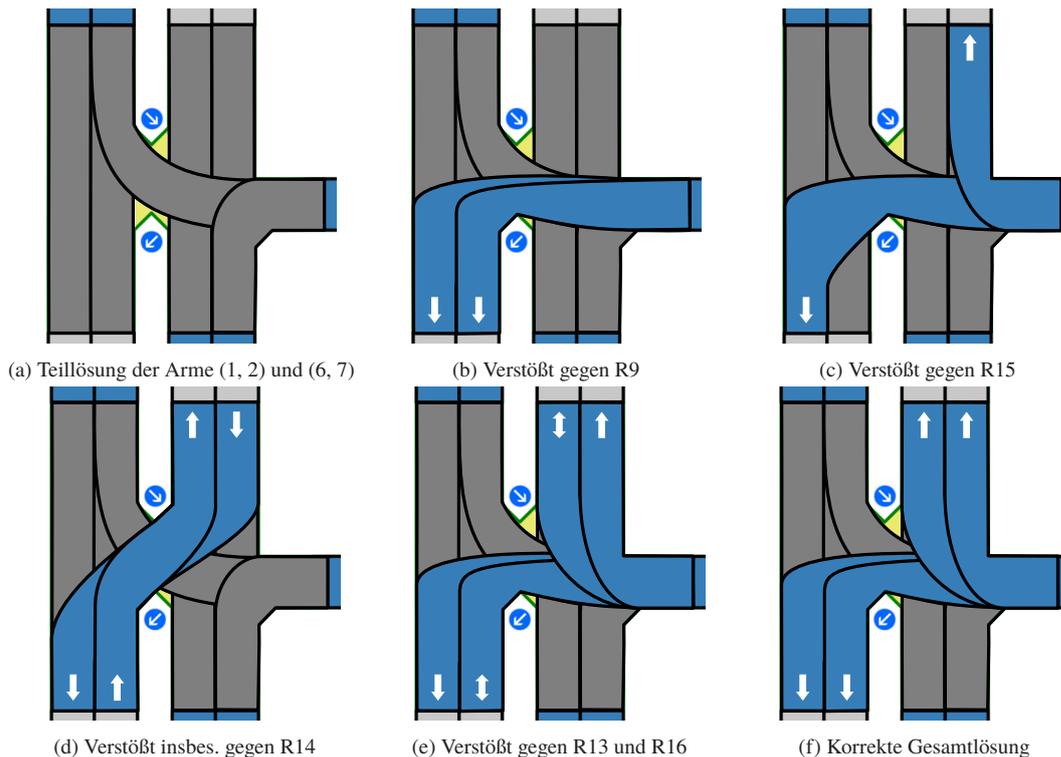


Abbildung 6.5: Einige der möglichen Gesamtlösungen

noch eine Lösung, nämlich die in Abb. 6.5f dargestellte. Lösungen wie z.B. die aus Abb. 6.5b und Abb. 6.5c fallen weg.

R15 mag redundant zur R8 erscheinen, ist aber umfassender, weil offensichtlich auch die Arme berücksichtigt werden, die bei Anwenden der Konfiguration erst befahrbar würden. R8 deckt diese Fälle zwar nicht ab, lässt sich aber deutlich effizienter anwenden, da sie sich nur auf einen Arm bezieht. Ähnlich verhält es sich mit R7 im Verhältnis zu Regel R16.

Die Anwendung von R14 ist hier nicht nötig, sie trifft aber auf Fälle wie in Abb. 6.5d zu. „Kreuzen“ meint hier das vollständige Überqueren der Fahrstreifen. Auf Lösungen wie in Abb. 6.5e ist sie nicht anwendbar, da die Fahrstreifen sich dort nur überlappen, aber nicht vollständig queren. Die Regel ist vor allem auf zweistreifigen Straßen nützlich, die in beide Richtungen befahren werden.

Nach dem Abschluss des Verfahrens können nun die Fahrtrichtungen der angrenzenden Korridore aktualisiert werden, sofern klar ist, dass ein Fahrstreifen in jeder verbleibenden Konfiguration eine Verbindung in einer bestimmten Richtung hat. Ist die Schnittmenge der verbleibenden Lösungen nicht leer, lassen sich mit diesen Konfigurationen die Korridore berechnen. Bleibt nur noch eine einzige Lösung übrig, kann die Kreuzung als gelöst betrachtet werden. Das ist zum Propagieren der Fahrtrichtungen wichtig (siehe Kap. 5.3), da nun die Anzahl der Nachfolger eines an die Kreuzung angrenzenden Fahrstreifens bekannt ist. Außerdem können erst jetzt Verkehrsschilder in der Nähe der Kreuzung zweifelsfrei assoziiert werden.

Um den Ansatz zur Lösung der Kreuzungen zu komplettieren, fehlt nun noch das Verfahren zur Berechnung der Korridore, das auch zur Bestimmung der befahrbaren Pfade und der verwendeten Markierung eingesetzt werden kann. Das wird im nun folgenden Abschnitt vorgestellt.

6.5 Bestimmung valider Pfade innerhalb der Kreuzungsgeometrie

Das Verfahren zur Bestimmung der validen Pfade innerhalb einer Kreuzung ist das Bindeglied zwischen der rein logischen Betrachtung der Kreuzung und ihrer tatsächlichen geometrischen Form. Es ist für den Erfolg der Methode zur Bestimmung der Kreuzungstopologie von großer Bedeutung, dass das Verfahren zuverlässig ist, weil die daraus gezogenen Schlussfolgerungen im weiteren Verlauf nicht mehr revidiert werden können. Es muss also bei dem Entwurf des Verfahrens sichergestellt werden, dass damit getroffenen Aussagen über die Erreichbarkeit eines Fahrstreifens unbedingt zuverlässig sind.

Um prüfen zu können, dass keine Verbindung von zwei an die Kreuzung angrenzenden Fahrstreifen existiert, muss das Verfahren also nachweisen, dass es keinen einzigen Pfad gibt, der diese verbindet und mit den Verkehrsregeln kompatibel ist. Da dieser Test typischerweise für hunderte Pfade pro Kreuzung durchgeführt werden muss, sollte dessen Berechnung so effizient wie möglich sein, da Laufzeit bei der Betrachtung hunderter Kreuzungen schnell unbeherrschbar wird.

Für die Frage nach der Befahrbarkeit einer Verbindung zwischen zwei Fahrstreifen werden zwei Fälle unterschieden. Liegen die beiden Fahrstreifen in benachbarten Kreuzungsarmen, sind sie durch einen gemeinsamen Rand miteinander verbunden. Dieser Rand gibt bereits Aufschlüsse darüber, ob eine Verbindung zwischen den beiden Armen überhaupt möglich ist. Beinhaltet der Rand eine zu große Krümmung, welche wesentlich größer ist als die Krümmung, die ein Fahrzeug zu fahren imstande ist, kann bereits ausgeschlossen werden, dass die beiden Fahrstreifen verbunden sein können. Dies ist auch das Kriterium, mit dem in Abb. 6.2 eine Verbindung zwischen den Armen aus (1, 2) und (3, 4) ausgeschlossen werden konnte.

In allen anderen Fällen muss ein komplexeres Verfahren angewendet werden, das gleichzeitig die Fahreigenschaften eines Fahrzeugs, durch durchgezogene Linien und Verkehrsschilder auferlegte Verbote sowie die zur Verfügung stehende Fläche berücksichtigt. Zusätzlich sollte der gefundene Pfad möglichst gut mit dem Pfad übereinstimmen, den ein menschlicher Verkehrsteilnehmer wählen würde. Dieser kann dann bewertet werden, sodass die verbleibenden Lösungen in R11 miteinander verglichen werden können. Zusätzlich kann der Pfad für die Generierung der Korridore genutzt werden. Zur Bestimmung des Pfades müssen aber widersprüchliche Anforderungen gegeneinander gewichtet werden: Wie lange würde ein Mensch einer Markierung folgen, die zwar zunächst in die richtige Richtung verläuft, aber dann in eine andere Richtung abknickt? Das Verfahren muss also ein schwer in absolute Zahlen zu fassendes menschliches Verhalten modellieren. Dafür kann es kein parameterarmes Verfahren geben. Das gilt aber nur für die Bestimmung des exakten Pfades, den ein Teilnehmer durch die Kreuzung nehmen würde. Zur Beantwortung der Frage, ob es einen validen Pfad gibt, ist das irrelevant.

Anders als bei der Trajektorienplanung, die oft für Fahrzeuge während der Fahrt eingesetzt wird, muss außerdem nicht auf den Geschwindigkeitsverlauf oder eine besonders komfortable Kurvenfahrt geachtet werden. Es muss nur garantiert werden, dass es Fahrzeuge gibt, die einen gefundenen Pfad fahren können, also eine gewisse Krümmung nicht überschreiten. Sollte der exakte Pfad, den ein Fahrzeug über eine Kreuzung nimmt, wichtig sein, wird ohnehin angenommen, dass dieser durch Markierungen verdeutlicht wird (A32).

Das hier vorgestellte Verfahren basiert in seiner Grundidee darin, das Problem in ein Graphenproblem zu überführen. Dafür wird die Kreuzung in ein Gitter diskretisiert, wobei jeder Knoten eine mögliche Pose auf der Kreuzungsfläche ist. Kanten zwischen benachbarten Knoten drücken zulässige Pfadabschnitte aus. Die Frage nach einem fahrbaren Pfad reduziert sich so auf die Frage nach einem Weg durch den Graphen zwischen zwei Knoten. Um den besten Pfad zu bestimmen, können den einzelnen Kanten und Knoten Kosten zugewiesen werden, die ausdrücken, wie geeignet ein Verkehrsteilnehmer diesen konkreten Pfadabschnitt empfinden würde. Um nun den optimalen Pfad zu finden, also den, der die Summe der Kosten minimiert, bietet sich der A*-Algorithmus an.

Der Vorteil dieser Formulierung besteht einerseits in der Effizienz des Verfahrens durch die Optimalitätseigenschaften des A*-Algorithmus und andererseits darin, dass das Gitter, einmal initialisiert, für weitere Routenberechnungen innerhalb der Kreuzung verwendet werden kann. Die Kostenberechnungen für die Knoten müssen also nur einmal durchgeführt werden. Da der A*-Algorithmus nur Knoten betrachtet, die auf dem Weg zum Ziel potentiell geeignet sein können, muss auch nicht das komplette Gitter auf einmal berechnet werden, sondern nur die relevanten Knoten, welche dynamisch berechnet werden können.

Vergleichbare Ansätze finden sich auch in der Literatur, etwa bei [MBB08]. Hier wird ein modifizierter, gitterbasierter A*-Algorithmus verwendet, der zur Initialisierung eines Trajektorienplaners bei der Trajektorienplanung auf offenem Gelände eingesetzt wird. Bei geeigneter Parametrierung garantiert der Algorithmus fahrbare Pfade. Allerdings handelt es sich hier um einen erweiterten A*-Algorithmus, in dem die einzelnen Knoten beim Besuchen durch den Algorithmus noch weitere Eigenschaften erhalten können, basierend auf dem bisherigen Zustand der bislang bekannten Trajektorie. Das Ergebnis ist dann nicht mehr garantiert optimal und durch den veränderten Zustand richtungsabhängig geworden. Tatsächlich ist diese Anpassung nicht notwendig, um garantiert fahrbare Pfade zu erhalten, wenn oft verwendete Kriterien wie Komfort keine Rolle spielen. Für den hier vorgestellten Ansatz wird stattdessen ein Verfahren verwendet, bei dem das Gitter um eine dritte Dimension erweitert wird, welche die Fahrzeuorientierung darstellt.

Für den Entwurf des A*-Algorithmus müssen zwei Gegebenheiten definiert werden, welche im Folgenden detailliert werden: Der Graph mit seinen Knoten und Nachbarschaftsbeziehungen, die in diesem Fall eine Pose und die von dort verfügbaren Bewegungsmöglichkeiten ausdrücken, sowie die Kostenfunktion für Knoten und Kanten in Kombination mit der Heuristik, welche die Kosten bis zum Zielknoten abschätzt.

Bewegungsmöglichkeiten

Um sicherzustellen, dass fahrbare Pfade gefunden werden, müssen die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Knoten eingeschränkt werden. Das geschieht dadurch, dass das Fahrzeug sich immer nur zu den Nachbarknoten hinbewegen darf, die der aktuellen Rotationsrichtung am nächsten sind. Dabei werden auch Bewegungen in schräg diagonalen Richtung („Rösselsprung“) zugelassen, womit sich pro Position 16 mögliche Bewegungsrichtungen ergeben. Da aber der Knoten auch eine Richtung enthält, gibt es nur genau eine nachfolgende Position, oder ggf. zwei, falls zwei Positionen der aktuellen Richtung am nächsten liegen. Zusätzlich wird noch eine Drehung um einen Schritt zugelassen, was insgesamt zu 3, maximal 6 Nachfolgerknoten führt. Ein Beispiel ist in Abb. 6.6 dargestellt.

Bei geeigneter Wahl der Schrittweite und der Winkeldiskretisierung ergibt sich zwangsläufig ein bestimmter minimaler Drehradius, der nicht unterschritten werden kann. Bei einer Diskretisierung von 0,5 m und 32 Winkeln ergibt sich damit beispielsweise ein Kurvenradius von 13 m, was sehr nahe an den von der Straßenverkehrs-Zulassungsordnung (StVZO) vorgeschriebenen Kurvenradius für einen PKW von 12,5 m heranreicht (StVZO §32d).

Innerhalb der Kreuzung gibt es drei mögliche Arten, den Verkehr zu beeinflussen: durch *Straßenränder* bzw. *Fahrbahnränder*, durch Schilder, welche die *Durchfahrt verbieten* (z.B. Verkehrszeichen 267, „Verbot der Einfahrt“, oder Zeichen 222, „Vorgeschriebene Vorbeifahrt“) und durch Schilder, die den *Verkehr lenken* (z.B. Zeichen 211, „Vorgeschriebene Fahrtrichtung“ oder 215, „Kreisverkehr“).

Die Berücksichtigung von Straßenrändern ist offensichtlich. Dafür muss beim Anlegen einer Kante im Graph geprüft werden, ob diese Kante einen Straßenrand bzw. ein Fahrbahnrandsegment überquert. Da die Kreuzungsform und die darin enthaltenen Markierungen bekannt sind, müssen also Schnittpunkte mit dem äußeren Rand, mit Löchern in der Verkehrsgeometrie und mit durchgezogenen Linien gesucht werden. Gibt es solche Schnittpunkte, ist die

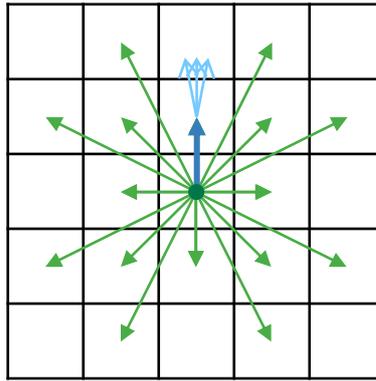


Abbildung 6.6: Nachfolgezellen der mittleren Zelle im A*-Algorithmus (grüne Pfeile) und Nachfolgeposen (hellblau) von der nach oben ausgerichteten Pose (dunkelblau).

Kante unzulässig. Bei einseitig gestrichelten Linien muss zusätzlich geprüft werden, ob die Linie durch die Kante in der erlaubten oder nicht erlaubten Richtung geschnitten wird.

Wenn ein Schild ein Verbot der Durchfahrt anzeigt, kann prinzipiell ähnlich verfahren werden, allerdings muss dabei erst eine durch das Schild bestimmte Linie ermittelt werden, deren Überquerung in einer Richtung nicht erlaubt ist. Dazu wird zunächst der Rand der Kreuzung bestimmt, an dem das Schild steht, indem der Rand aus der Menge aller Ränder und Inseln gewählt wird, der den Abstand minimiert. Ist es ein Rand (und keine Insel), wird je nach Art und Ausrichtung des Schildes der Rand des folgenden Arms gesucht und darauf der Punkt auf dem Rand, der den Abstand minimiert. Ist das Schild auf einer Insel, wird der Punkt kürzester Distanz auf den verbleibenden Rändern und Inseln gesucht, der zugleich grob in der Richtung des Schildes liegt. Die Verbindungslinie zwischen diesem Punkt und dem Mittelpunkt des Schildes definiert dann das Verbot.

Analog zu Rändern muss geprüft werden, ob eine mögliche Kante diese Linie in der vorgegebenen Richtung schneidet. Bei der Richtung des Schildes muss der Typ berücksichtigt werden. Bei Zeichen 222, „Rechts vorbei“ ist nur der Rand links des Schildes betroffen. Bei Zeichen 267 (Verbot der Einfahrt) gilt es für beide Seiten, sofern nicht durch ein anderes, danebenstehendes Schild (z.B. 222) aufgehoben. Das ist wichtig, denn diese beiden Schilder stehen oft nebeneinander auf demselben Grünstreifen. Das eine verbietet dann die Einfahrt in den einen Arm, das andere lenkt den Verkehr zum anderen Arm.

Schilder, die den Verkehr lenken beziehen sich technisch gesehen immer auf einen bestimmten Rand, entweder einen Rand zwischen zwei Kreuzungsarmen oder eine Insel. Dieser Rand darf nur in einer bestimmten Richtung passiert werden. Schild 211 („hier rechts“), wird in der Regel direkt an diesem Rand aufgestellt, daher ist er leicht zu bestimmen. Von diesem Rand wird dann ein lokales Liniensegment ausgewählt, das dem Schild am nächsten ist. Dieses Segment darf dann nicht in einer bestimmten Richtung passiert werden. Die Länge des Segmentes drückt aus, auf welche Distanz seitlich vom Schild sich dieses auswirkt. Beispielsweise ist es kaum zu erwarten, dass ein Verkehrsteilnehmer, der bereits ein gewisses Stück an dem Schild vorbeigefahren ist, sich noch daran hält. Anders verhält es sich bei Zeichen 222 („Kreisverkehr“), da das Schild normalerweise am Eingang zum Kreisverkehr aufgestellt wird und eben nicht auf der Insel, auf die es sich bezieht. Wird ein solches Schild einer Kreuzungsfläche zugeordnet, wird als zugehörige Insel das größte Loch der Kreuzungsfläche definiert. Falls es keines gibt, wird der Rand ausgewählt, der über seine Länge hinweg die größte Winkeländerung verzeichnet. Das ist notwendig, weil die Kreuzungsfläche an großen Kreisverkehren oft in eine Kreuzungsfläche je Einfahrt zerfällt, anstatt eine große Kreuzung für den ganzen Kreisverkehr zu bilden. Am so ausgewählten Rand darf dann ebenfalls nur in einer bestimmten Richtung entlanggefahren werden.

Bei der Generierung einer Kante im Graphen muss nun geprüft werden, ob sich links bzw. rechts von der betrachteten Pose eines dieser Segmente oder Ränder befindet, welches nicht passiert werden darf. Ist der Winkelunterschied zwischen der aktuellen Orientierung und dem Liniensegment, falls es existiert, kleiner als $\pi/2$, ist die Kante unzulässig.

Formulierung der Kostenfunktion und Heuristik

Um den A*-Algorithmus zu vervollständigen, fehlt noch eine Kostenfunktion $f(x, y)$ und eine dazu passende Heuristik $h(x, z)$. Diese geben die Kosten bzw. die geschätzten Kosten zwischen zwei Knoten x und y , bzw. einem dieser Knoten und dem Zielknoten z an. h sollte f so gut wie möglich approximieren, um das Ziel unter Betrachtung so weniger Knoten wie möglich zu erreichen.

Dabei sollte die Heuristik monoton sein, was bedeutet, dass h niemals größer sein darf als die tatsächlichen Kosten durch das Aufsummieren von f über den optimalen Pfad hinweg. Zusätzlich muss die Dreiecksungleichung $h(x, z) \leq f(x, y) + h(y, z)$ erfüllt sein. Ist das nicht der Fall, wird zwar immer noch ein Pfad gefunden, aber es ist nicht mehr der optimale.

Für den Algorithmus wird eine Kostenfunktion der Form

$$f(x, y) = d(x, y) \cdot v(y) + \alpha\delta(x, y) + e(x, y)$$

und für die Heuristik

$$h(x, z) = d(x, z) + \alpha\delta(x, z)$$

gewählt. Hierbei bezeichnen d die Euklidische Distanz zwischen den beiden Knoten x und z , v die lokalen Kosten des Knotens, α einen Gewichtungsfaktor, δ den Betrag der Winkeldifferenz zwischen den beiden Knoten und e die lokalen Kosten der Kante. Es ist leicht zu sehen, dass die gewählte Heuristik monoton ist, wenn $v \geq 1$ und $e \geq 0$, sowie $\alpha \geq 0$. In diesem Fall ist $f(x, y)$ immer größer als $h(x, y)$, es ist also nicht möglich, die Kosten zu überschätzen. Die Dreiecksungleichung ist ebenfalls erfüllt. Das lässt sich dadurch zeigen, dass f und h in die obige Ungleichung eingesetzt werden und die Tatsache ausgenutzt wird, dass d und δ ihrerseits die Dreiecksungleichung erfüllen, also dass $d(x, z) \leq d(x, y) \cdot v(y) + d(y, z) + e(x, y)$ gilt unter den oben beschriebenen Annahmen für v und e (analog für δ).

Die Funktionen v und e stehen nun zur Verfügung, um den genauen Verlauf des Pfades zu beeinflussen. Dabei wird v benutzt, um Kosten zu modellieren, die linear mit der zurückgelegten Distanz skaliert werden (wie beispielsweise, ob Markierungen in der Nähe sind, welchen das Fahrzeug folgt) und e , um lokale Ereignisse entlang einer Kante zu berücksichtigen, etwa das Überqueren einer Markierung oder das Wechseln der verfolgten Ränder.

Zur Ermittlung der Kosten wird die Gesamtheit der Linien ermittelt, die unmittelbar links und rechts des Knotens liegen und eine ähnliche Orientierung wie das Fahrzeug haben. Zu diesen wird jeweils die kürzeste Distanz nach links d_l und rechts d_r bestimmt, wobei d_l und d_r auch den Wert unendlich haben können, wenn es keinen Rand gibt. Aus diesen Distanzen wird dann das Paar aus Distanzen gefunden, das die folgende Funktion minimiert:

$$v(d_l, d_r) = 1 + \min(|d_l + d_r - 2d_{\text{ideal}}|, c_{\text{max}}) \\ + \min\left(\frac{1}{2}|d_l - d_r|, |d_{\text{ideal}} - d_l|, |d_{\text{ideal}} - d_r|, c_{\text{max}}\right).$$

Hierbei drückt der erste Term die nach oben durch c_{\max} beschränkten Kosten für den Abstand zwischen den beiden Linien im Vergleich zu einer idealen Fahrstreifenbreite $2d_{\text{ideal}}$ aus, der zweite Term drückt aus, wie sehr das Fahrzeug in der Mitte dieses Fahrstreifens fährt, bzw. wie weit es von einer idealen Distanz d_{ideal} zur Linie entfernt ist, falls eine der beiden Distanzen unendlich ist.

Die zu den ausgewählten Distanzen gehörenden Linien sind die Linien, denen das Fahrzeug aktuell folgt. e ist dann definiert als

$$e(x, y) = \beta n_{x,y} + \gamma m_{x,y},$$

wobei $n_{x,y}$ die Anzahl der Markierungen ist, die das Fahrzeug innerhalb der Kante (x, y) kreuzt, und $m_{x,y}$ die Summe der Linien ist, die sich beim Fahren entlang der Kante (x, y) verändern, die also wegfallen oder durch andere Linien ersetzt werden. β und γ sind erneut Gewichtungparameter. Durch diese Terme wird erreicht, dass Pfade bevorzugt werden, bei denen einer bestimmten Linie möglichst lange gefolgt wird, und gleichzeitig möglichst wenig andere Linien überquert werden. Das unterbindet, dass das Fahrzeug unnötig seinen eigenen Korridor verlässt.

Mit der Wahl der Parameter α , β , γ und c_{\max} , kann beeinflusst werden, wie sich der optimale Pfad verhält. Es liegt nahe, ein hohes α zu wählen, da dieser Parameter beeinflusst, wie sehr ein Verkehrsteilnehmer bereit ist, seine Richtung zu ändern, um beispielsweise einer Markierung zu folgen. Man kann davon ausgehen, dass ein Verkehrsteilnehmer praktisch nie die Richtung vom Zielfahrstreifen weg ändern würde, nur um einer Linie zu folgen. Der Parameter γ spielt dem entgegen, denn er bestimmt, wie kritisch es eingeschätzt wird, wenn die Markierung häufig gewechselt wird. Wenn er zu hoch gewählt ist, wird die Lösung immer übermäßig lange den Markierungen und Rändern folgen. Der Parameter c_{\max} bestimmt hingegen, wie sehr die freie Fahrt gegenüber dem Folgen einer Linie benachteiligt wird.

Beispiel

Abb. 6.7 zeigt einen exemplarischen Pfad durch die Kreuzung von Fahrstreifen 2 zu Fahrstreifen 5. Dabei werden jeweils die Linien verfolgt, denen ein menschlicher Fahrer wahrscheinlich auch folgen würde. Zuerst werden dafür die Markierungen und Ränder des geradeaus verlaufenden Fahrstreifens genutzt, bis dann beim Abbiegen auf die nur linksseitige Markierung umgeschwenkt wird. Zum Schluss folgt der Pfad wieder dem Straßenrand vor dem Fahrstreifen 5. Der Pfad darf das durch das obere Verkehrsschild ausgedrückte Einfahrtverbot überqueren, weil es nur für die andere Befahrungsrichtung gilt. Das durch das untere Schild ausgedrückte Einfahrtverbot zu den Fahrstreifen 7 und 8 darf aber nicht überquert werden.

Zur Bewertung der Eignung der gefundenen Pfade lassen sich dann die Kosten der Lösungen bewerten. Im Beispiel aus Abb. 6.2 war das nicht notwendig, aber es ist offensichtlich, dass z.B. die Lösung $\{1 \rightarrow 8, 2 \rightarrow 9\}$ günstiger bewertet würde als $\{1 \rightarrow 8, 2 \rightarrow 9\}$, weil hierfür eine zusätzliche Markierung überquert würde, die Pfade insgesamt mehr Winkeländerungen enthalten und während des Fahrstreifenwechsels keiner Markierung gefolgt werden kann. Sofern also A32 erfüllt ist, dass Mehrdeutigkeiten bei den zu erreichenden Fahrstreifen immer durch Markierungen aufgelöst werden, sollte der hier beschriebene Ansatz für den richtigen Pfad auch immer geringere Kosten berechnen.

Durch die Diskretisierung ist der gefundene Pfad allerdings nicht glatt. Zur Bestimmung der erreichbaren Fahrstreifen und zur Bewertung der Eignung eines Pfades ist das irrelevant, aber zur Berechnung der Korridore muss der Pfad geglättet werden.

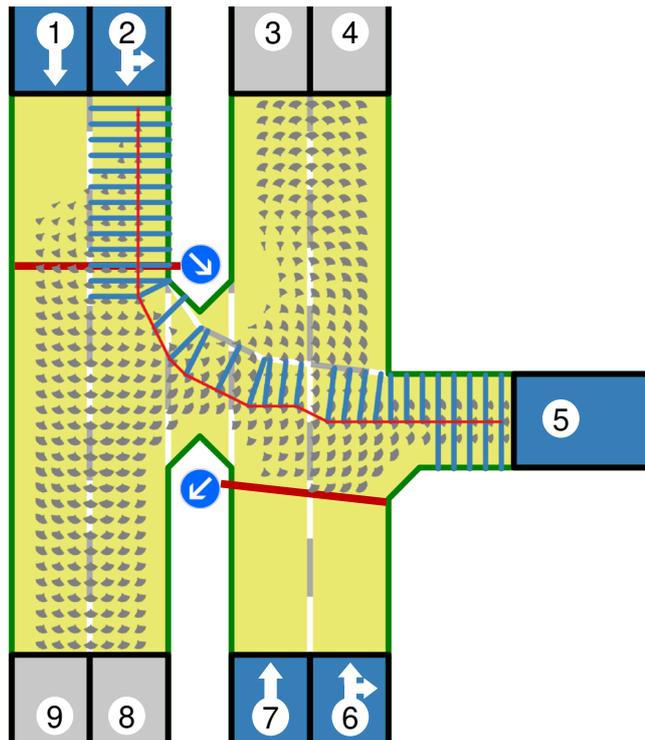


Abbildung 6.7: Mit dem A*-Algorithmus bestimmter Pfad (rot) durch die Kreuzung. Blaue Linien zeigen an, welcher Markierung aktuell gefolgt wird. Graue Kreissegmente markieren alle von Fahrstreifen 2 erreichbaren Positionen/Orientierungen. Das durch das Verkehrsschild unten ausgedrückte Bewegungsverbot (breite rote Linie) kann nicht passiert werden.

6.5.1 Berechnung der Korridore

Die Information, an welchen Stellen Ränder bzw. Markierungen verfolgt werden, kann ausgenutzt werden, um die Korridorberechnung zu vereinfachen. Diese Teile des Korridors können also direkt bestimmt werden. In allen anderen Bereichen muss zwischen der letzten bekannten Markierung und der nächsten bekannten Markierung interpoliert werden.

Dazu wird die ermittelte Trajektorie des Fahrzeuges als Basis genommen. Sie wird zunächst durch ein Glättungsverfahren geglättet. Dazu kann ein in [TMD06] vorgestelltes Verfahren zur Glättung von Trajektorien verwendet werden. Es optimiert die Trajektorie so, dass die Krümmung zwischen den Punkten minimiert wird, während gleichzeitig ein hoher Abstand von der Initialisierung bestraft wird.

Anschließend werden die Distanz d_v der Trajektorie zum letzten Punkt der Vorgänger-Markierung p_v und die Distanz d_n des Pfades zum Nachfolger p_n bestimmt. Dann wird jeder Punkt entlang des Normalenvektors v_n der Verbindungslinie (p_v, p_n) um die Distanz d nach links bzw. rechts versetzt. Die Distanz wird in Abhängigkeit eines bestimmten Punktes p des Pfades folgendermaßen bestimmt:

$$d(p) = \min \left(d_{rand}, d_v + (d_v - d_n) \frac{\|\overrightarrow{p_v, \hat{p}}\|}{\|\overrightarrow{p_v, p_n}\|} \right),$$

wobei d_{rand} den Abstand zum nächstgelegenen Rand der Kreuzung bezeichnet. So wird erreicht, dass der generierte Korridor nie die Kreuzungsfläche verlässt.

Die Ergebnisse dieses Ansatzes für die Kreuzungen aus Abb. 6.1 sind in Abb. 6.8 dargestellt. In beiden Kreuzungen konnten alle Fahrstreifen bestimmt werden, was zumindest für die große Kreuzung links schwer darstellbar ist, weil

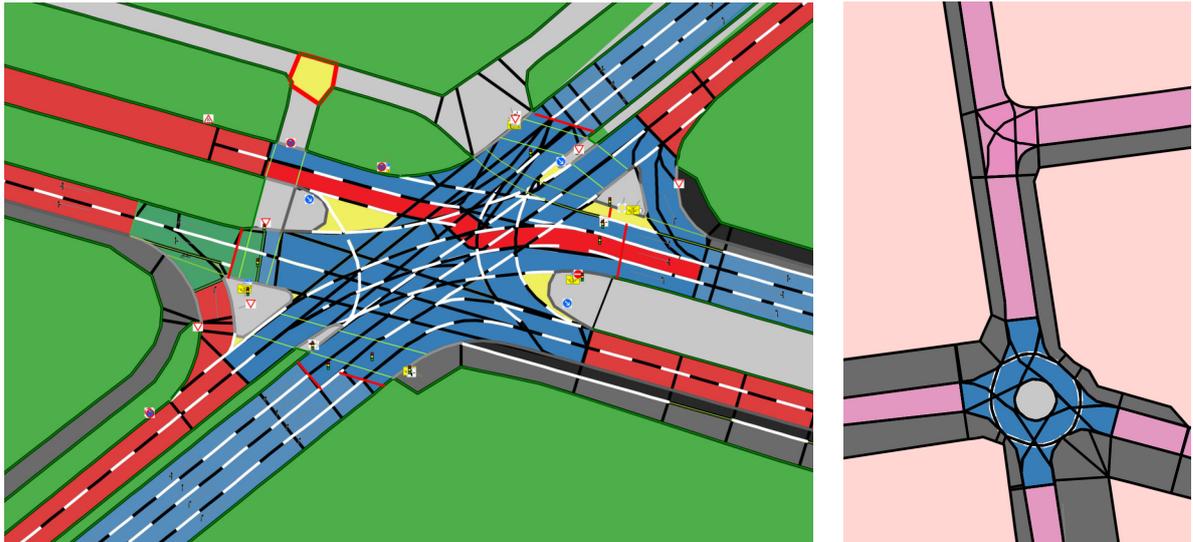


Abbildung 6.8: Ergebnisse für die Kreuzungen aus Abb. 6.1. Links: mehrstreifige Kreuzung, rechts: mehrere kleinere Kreuzungen im Innenstadtbereich. Schwarze Linien auf der Kreuzungsfläche bezeichnen Fahrstreifen.

es so viele überlappende Fahrstreifen gibt. Insbesondere im oberen Kreuzungsbereich können aber nicht immer glatte Pfade bestimmt werden, weil hier sehr viele Linien auf engem Raum in einem flachen Winkel aufeinandertreffen. Daher folgt zum Beispiel der rot hervorgehobene Fahrstreifen, der von rechts kommend geradeaus fährt, zunächst der Kurve nach links und führt dann geradeaus weiter. Tatsächlich ist es auch für Menschen in dieser Situation schwierig, hier den richtigen Pfad zu finden, da der Weg nach links zugleich der Verlauf der Vorfahrtsstraße ist und deswegen sehr dominant markiert wurde. Für den Weg geradeaus gibt es hingegen kurzzeitig keine Markierungen, denen gefolgt werden könnte.

Im Gegensatz dazu gibt es im oberen hineinführenden Arm der Kreuzung wegen eines sehr breiten Fußgängerüberweges überhaupt keine Markierungen. Deshalb folgt der nach rechts abbiegende Korridor zunächst den Markierungen in der Mitte der Kreuzung, bis er dann wieder nach rechts abbiegt.

Im rechts daneben dargestellten Innenstadtbereich gibt es diese Schwierigkeiten nicht, da hier weniger Markierungen sind. Stattdessen ist hier das geringe Wissen über die Fahrstreifen das Problem. Die Abbildung zeigt das Ergebnis nach drei vollen Iterationen, ausgehend von Abb. 5.1. Die obere Kreuzung kann erst gelöst werden, nachdem die Fahrstreifen einer weiter oben außerhalb des Bildes liegenden Kreuzung bestimmt werden konnten. Dadurch ist nun für den Kreisverkehr unten im Bild bekannt, dass der obere Fahrstreifen hineinführen muss. Damit lässt sich schließlich der Kreisverkehr vollständig lösen, da nun alle hineinführenden Fahrstreifen bekannt sind. Als Ergebnis wird nun für jeden der drei möglichen Ausfahrten eines jeden Arms ein Korridor gebildet, welcher dem Verlauf des Kreisverkehrs folgt.

7 Inferieren von Verkehrsregeln

Mit den in den letzten Kapiteln vorgestellten Verfahren lassen sich bereits Karten erzeugen, die dem Bedarf für das automatisierte Fahren in sehr vielen der in Kap. 3.4 aufgestellten Anforderungen gerecht werden. Sie enthalten auch über Kreuzungen hinweg präzise Fahrstreifenverläufe, sodass eine fahrstreifengenaue Wegfindung möglich ist. Durch das Wissen über die Fahrbahnränder können eigene Fahrstreifenwechsel geplant und die anderer Verkehrsteilnehmer vorhergesagt werden. Da die Eingangsdaten nur interpretiert und verknüpft, aber nicht entfernt werden, stehen sie auch weiterhin zur Lokalisierung und Validierung der Karte zur Verfügung. Als letzter Schritt fehlen in der Karte aber noch Informationen über die Verkehrsregeln, die ein automatisiertes Fahrzeug während der Fahrt zu beachten hat.

Durch die Verknüpfung der Informationen wird in der Kartengenerierung bereits ein sehr hoher Grad an Verständnis erreicht, der für die Interpretation der auf den Fahrstreifenabschnitten gültigen Verkehrsregeln ausgenutzt werden kann. Durch die in Kap. 5.3 beschriebenen Methoden werden die Verkehrsschilder bereits den nächstgelegenen Fahrbahnabschnitten zugewiesen, für die sie unmittelbar gültig sind.

Die daraus abzuleitenden Verkehrsregeln sind insbesondere Geschwindigkeitsbeschränkungen, Überholverbote, Vorfahrt, Ampeln sowie die unterschiedlichen Verkehrszonen, also Tempo-30-Zonen, Spielstraßen, Stadtgebiete und Autobahnen. Sie unterscheiden sich durch die Mechanismen, mit denen die Verkehrsregeln vermittelt werden, und wie lange sie gültig sind. Die Überlegungen dieses Kapitels beschränken sich auf Verkehrszeichen, die auf einer Straße fahrenden Verkehrsteilnehmern bestimmte Beschränkungen auferlegen. Zusätzlich zu den hier aufgezählten Verkehrszeichen gibt es noch andere Verkehrszeichen wie Park- oder Halteverbote, die nicht die Fahrt an sich betreffen und daher hier nicht weiter betrachtet werden.

7.1 Arten von Verkehrszeichen und Bedeutung für die Kartierung

Im deutschen Straßenverkehr lassen sich vier unterschiedliche Mechanismen bezüglich der Gültigkeit von Verkehrsregeln identifizieren. Die einfachste davon ist die *Zonen-Regelung*. Zonen gelten immer genau so lange, bis sie durch ein zugehöriges Schild aufgehoben werden, unabhängig vom Straßenverlauf oder anderen dazwischen angezeigten Verkehrsregeln. Das Schild 330 „Autobahn“ beendet daher nicht das Stadtgebiet, erst und ausschließlich das Verkehrszeichen 311 „Ende geschlossene Ortschaft“ tut dies [KD13, S. 871]. Das kann in Einzelfällen dazu führen, dass Straßenabschnitte gleichzeitig innerorts und Autobahnbereich sind. Die VwV-StVO sieht vor, dass an allen Wegen, die zum Verlassen einer Zone genutzt werden können, entsprechende Verkehrsschilder aufgestellt werden müssen, sodass es nicht möglich ist, die Zone zu befahren oder zu verlassen, ohne davon Kenntnis zu nehmen (A35, vgl. StVO zu Zeichen 310, Ziffer III). Anders als bei vielen anderen Verkehrszeichen üblich, werden sie allerdings nicht innerhalb des Geltungsbereichs wiederholt [KD13, S. 863]. Ein übersehenes oder unkenntliches Zonen-Verkehrszeichen kann also nicht kompensiert werden.

Das Verhalten von *an Straßen oder Strecken gebundenen Verkehrsregeln* ist dagegen deutlich komplizierter, da diese aus weitaus mehr Gründen enden können als Zonenregelungen. Zu den wichtigsten davon zählt die Vorfahrtsstraße (Zeichen 306). Der Verlauf einer Vorfahrtsstraße ist zugleich der Verlauf einer Strecke (A38). Er ist nicht identisch

mit dem eigentlichen Straßenverlauf, nämlich dann, wenn dies an einer Kreuzung durch das Schild „abknickende Vorfahrt“ gekennzeichnet ist. Zu den Streckenverboten zählen Geschwindigkeitsbeschränkungen und Überholverbote. Da diese Regeln an eine Strecke bzw. Straße gebunden sind, enden sie auch, sobald diese verlassen wird oder endet.

Demzufolge enden beispielsweise durch das Überqueren eines gestrichelten Breitstrichs an einer Autobahnausfahrt sämtliche bislang gültigen Streckenverbote, da ein Breitstrich zwangsläufig eine Fahrbahnbegrenzung darstellt (StVO §7a Abs. 1). Sollen die Verbote auch für die an der Ausfahrt beginnende Fahrbahn gelten, müssen sie also explizit wiederholt werden.

Neben dem Verlassen der Straße/Strecke kann das Verbot auch durch andere Verkehrsschilder beendet oder durch ein neues ersetzt werden. Zusätzlich können auch Längenangaben gemacht werden, nach denen das Verkehrszeichen nach einer bestimmten Distanz wirkungslos wird. Die Möglichkeit, dass ein Verbot an unkonkrete semantische Angaben wie „bei Nässe“ oder „Wildwechsel“ geknüpft sein kann, wird hier nicht berücksichtigt (A40).

Die dritte Kategorie von Verkehrszeichen nehmen *Ampeln* ein (in der Terminologie der StVO auch „Wechsellichtzeichen“). Anders als die zuvor erwähnten Kategorien sprechen Ampeln nur ein lokal beschränktes Gebot aus, nämlich die zugehörige Haltelinie bei Rot nicht zu passieren. Es wird angenommen, dass Ampeln immer eine zugehörige Haltelinie haben, auch wenn die Verkehrsregelwerke dies nur „in der Regel“ vorschreiben [For80, Teil 1, Kap. 4.6], da dies nahezu immer eingehalten wird und die Ausnutzung dieser Beziehung eine zusätzliche Plausibilisierungsmöglichkeit bei der Kartengenerierung einräumt (A41).

Verkehrampeln gelten dabei grundsätzlich für den gesamten Fahrstreifen, von dem aus sie beobachtet werden können. Allerdings kann ihr Geltungsbereich durch Pfeile eingeschränkt werden. Das heißt, der weitere Fahrstreifenverlauf an einer Kreuzung beeinflusst, ob eine bestimmte Ampel gültig ist oder nicht. Dabei ist hilfreich, dass die Richtung markierter Pfeile auf den Fahrstreifen im Einklang mit denen der Ampel stehen soll (VwV-StVO zu §37, Rdnr. 26). Abgesehen von dieser Beziehung reicht es aus, die durch die Ampeln geregelten Fahrstreifen isoliert zu betrachten. Die Beziehung zu anderen Ampeln an anderen Kreuzungsarmen zu kennen, also den Zusammenhang zu anderen Grünphasen, kann zwar in Einzelfällen hilfreich sein, ist aber für die Kartierung für automatisierte Fahrzeuge nicht unbedingt erforderlich. Dieses Wissen steht schließlich auch menschlichen Verkehrsteilnehmern in der Regel nicht zur Verfügung.

Als letzte Kategorie werden *Vorfahrtsregelungen* betrachtet. Anderes als Ampeln, die auch im normalen Straßenverlauf vorkommen können – beispielsweise an Fußgängerüberwegen – ergeben Vorfahrtsregelungen nur an Kreuzungen Sinn. Wie bereits in Kap. 4.1 erläutert, wird hierbei angenommen, dass Vorfahrtsregelungen auch an Ampeln weiterhin Gültigkeit besitzen, Ampeln und normale Vorfahrtsregeln also unabhängig voneinander betrachtet werden können. Sind die Ampeln so aufeinander abgestimmt, dass sich keine Vorfahrtssituationen ergeben, stellt sich die Frage nach der Vorfahrt ohnehin nicht. Im anderen Fall bilden die Vorfahrtsregeln eine Rückfallebene, an denen sich ein automatisiertes Fahrzeug orientieren kann.

Falls Vorfahrtsregeln durch Verkehrsschilder an einer Kreuzung explizit festgelegt sind, sind sie aus globaler Sicht redundant, da es dann sowohl für die Fahrbahn mit Vorfahrt als auch für die nachrangige Fahrbahn eine Beschilderung geben muss. Im Falle von Vorfahrtsstraßen muss diese allerdings nicht unmittelbar vor der Kreuzung zu finden sein. Außerdem werden Vorfahrtsschilder an Einmündungen oft weggelassen, nämlich dann, wenn sich für einen aus dieser Richtung kommenden Verkehrsteilnehmer gar keine Situation ergibt, in der er Vorfahrt gewähren müsste, da er ohnehin wegen „Rechts vor Links“ Vorfahrt hätte.

Ist die Vorfahrt nicht explizit festgelegt oder sind zwei Kreuzungsarme gleichrangig, gelten die durch die StVO festgelegten impliziten Verkehrsregeln, nämlich der Vorrang von rechts kommender Fahrzeuge gegenüber von links

kommenden Fahrzeugen (StVO §8, Abs. 1). Darüber hinaus besteht der Nachrang von Linksabbiegern gegenüber Geradeausfahrenden und Rechtsabbiegern (StVO §9, Abs 3 und 4). In allen anderen Fällen stellt sich die Frage nach der Vorfahrt entweder nicht oder die kreuzenden Fahrzeuge sind gleichrangig und müssen sich verständigen. Das gilt auch in Situationen, in denen mehrere Fahrzeuge wechselseitig einander Vorfahrt gewähren müssen und keines gegenüber allen anderen Vorfahrt hat. Diese Situationen in die Karte aufzunehmen wäre nicht hilfreich. Stattdessen muss ein automatisiertes Fahrzeug davon ausgehen, dass bei Abwesenheit expliziter Vorfahrtsregelungen in der Karte eine situationsabhängige Lösung gefunden werden muss.

7.2 Verfahren zur Inferenz der Verkehrsregeln

Die vorangestellten Überlegungen machen deutlich, dass die bisher vorliegende Informationsbasis weiter interpretiert werden muss, um eine Basis zu erhalten, auf welcher das Inferieren der Verkehrsregeln möglich ist. Dazu zählt insbesondere die Klassifikation der einzelnen Fahrstreifen innerhalb einer Kreuzung in die Abbiegerichtungen links, rechts und geradeaus, da dies sowohl für Vorfahrtsregelungen als auch für den Verlauf von Streckenverboten eine Grundlage bildet. Weil angenommen wird, dass *geradeaus* auch immer dem Straßenverlauf entspricht (A37), stellt die Klassifikation der Abbiegerichtungen und die Bestimmung des Straßenverlaufs dieselbe Problemstellung dar.

Weiterhin besteht eine Abhängigkeit zwischen der Bestimmung des Verlaufs von Vorfahrtsstraßen, welche an durch Schilder gekennzeichneten Stellen vom eigentlichen Straßenverlauf abknicken können, und dem Verlauf von Streckenverboten, da diese ebenfalls dem Verlauf der Vorfahrtsstraße folgen. Die Bestimmung von Streckenverboten setzt also voraus, dass sowohl die Klassifikation der Abbiegerichtungen als auch der Verlauf der Vorfahrtsstraßen bereits bekannt ist. Ebenso setzt die Bestimmung von Vorfahrtsregeln Kenntnis über den Verlauf der Vorfahrtsstraßen voraus, da in diesem Fall nicht unbedingt ein Schild direkt an der Kreuzung zu finden ist. Für Ampeln und Verkehrszonen besteht dagegen keine Abhängigkeit zu irgendwelchen Vorverarbeitungsschritten. Die einzelnen Bestandteile des vorgeschlagenen Verfahrens werden in den folgenden Abschnitten im Einzelnen vorgestellt.

7.2.1 Klassifikation der Abbiegerichtungen

Die Klassifikation der Abbiegerichtungen bildet die Grundlage für korrekte Verarbeitung der meisten Verkehrsregeln. Ausgangspunkt dafür bilden die auf Basis der in Kap. 6 vorgestellten Methoden bereits bestimmten Korridore innerhalb der Kreuzung. Jeder Fahrstreifen, der eine Einfahrt in die Kreuzung darstellt, verfügt demnach über einen oder mehr Korridore, die ihn mit herausführenden Fahrstreifen verbinden. Das Ziel besteht darin, jedem dieser Korridore den Richtungsbezeichnungen *links*, *rechts* und *geradeaus* zuzuordnen. Genauer genommen bezieht sich diese Angabe nicht auf einen bestimmten Korridor, sondern auf einen gesamten Kreuzungsarm, der aus der Sicht eines anderen Kreuzungsarmes erreicht wird. Zwei Korridore, die an unterschiedlichen Fahrstreifen desselben Arms beginnen und denselben Arm erreichen, müssen daher dieselbe Richtungsbezeichnung haben.

Hilfreich ist dabei, wenn die Richtungsinformation Pfeilen entnommen werden kann, die entweder als Symbole auf den Fahrstreifen markiert sind oder in Form von Schildern vermittelt werden. In diesem Fall ist die Zuordnung eindeutig. Wenn das Symbol in mehrere Richtungen weist, etwa nach geradeaus und rechts, muss der weiter rechts gelegene Kreuzungsarm auch der nach rechts führende sein und der andere zwangsläufig der geradeaus führende. Dass auch tatsächlich genau so viele Kreuzungsarme erreicht werden, wie durch Pfeile verdeutlicht, wird durch Regel R6 bei der Erzeugung der Verbindungen in den Kreuzungen sichergestellt.

Können nicht für alle erreichten Arme mithilfe von Pfeilen die Richtungsbezeichnungen ermittelt werden, müssen für die verbleibenden Richtungen die geometrischen Gegebenheiten der Kreuzung betrachtet werden. Das hier vorgeschlagene Verfahren besteht darin, eine Zuordnung zu finden, bei der die Summe der Differenzen zwischen der tatsächlichen Ausrichtung eines Kreuzungsarms und der erwarteten Orientierung minimiert wird. Bei drei verbleibenden Richtungen gilt es also das folgende Optimierungsproblem zu lösen:

$$(k_l, k_r, k_g) = \underset{(k_l, k_r, k_g) \in K_{h, k_e}}{\operatorname{argmin}} \left(\delta \left(\alpha(k_l), \alpha(k_e) + \frac{\pi}{2} \right) + \delta \left(\alpha(k_g), \alpha(k_e) \right) + \delta \left(\alpha(k_r), \alpha(k_e) - \frac{\pi}{2} \right) \right), \quad (7.1)$$

wobei k_e den eingehenden Kreuzungsarm bezeichnet, K_{h, k_e} die Menge der von k_e erreichten, herausführenden Kreuzungsarme, und k_l , k_r und k_g die gesuchten nach links, rechts und geradeaus führenden Kreuzungsarme mit $k_l \neq k_r \neq k_g \neq k_l$. Zusätzlich bezeichnet α eine Funktion, die jedem Kreuzungsarm seinen Einfallswinkel zuordnet, sowie δ eine Funktion, welche zwei Winkeln den Betrag ihrer Winkeldifferenz zuordnet. Die Lösung dieses Optimierungsproblems kann auch durch naives Ausprobieren mit akzeptabler Effizienz gelöst werden, da die Anzahl der zu prüfenden Kombinationen sehr überschaubar ist. Bei drei Armen und drei Richtungen sind es drei Kombinationen.

Gibt es mehr Arme als Richtungen, liegt es nahe, ihnen dieselbe Richtung zuzuweisen wie der ihnen am nächsten liegende Arm. Sind es weniger Arme, müssen alle Kombinationen ausprobiert werden, bei denen in Gleichung 7.1 jeweils eine entsprechende Anzahl von Termen für k_l , k_g und k_r weggelassen wird.

Als Ergebnis wird erwartet, dass es pro Eingangsarm maximal einen Ausgangsarm gibt, der als „geradeaus“ klassifiziert wird, weil darauf die Annahme vertraut, dass der Straßenverlauf in Kreuzungen immer der geradeaus verlaufenden Richtung folgt. Außerdem sollten die Ergebnisse von zwei Armen, die sich gegenseitig erreichen können, symmetrisch sein. Ist ein Arm A rechts von einem Arm B gelegen, so sollte Arm B in nahezu allen Fällen auch als links von Arm A liegend klassifiziert werden, sofern er von diesem erreicht werden kann. Sind diese beiden Voraussetzungen nicht erfüllt, handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um einen Konflikt bei der Kartengenerierung, der entweder auf einen Kartierungsfehler, wie beispielsweise falsch bezeichnete Richtungspfeile, oder auf eine sehr ungewöhnlich geformte, schiefwinklige Kreuzung zurückzuführen ist, bei der die Fahrtrichtungen auch für Menschen schwer einzuordnen sind.

7.2.2 Bestimmung von Zonen, Vorfahrtsstraßen und Streckenverboten

Da nun die Straßenverläufe geklärt sind, lässt sich daraus der Verlauf der Verbote entlang dieser Straßen bestimmen. Die Vorgehensweise bei der Verarbeitung von Zonen, Vorfahrtsstraßen und Streckenverboten ist dabei sehr ähnlich und unterscheidet sich nur in der Frage, an welchen Stellen ein Verbot endet.

Grundlage für diese Verbote ist eine Graphensuche im bereits bekannten Fahrstreifengraphen. Ausgehend von einem Fahrstreifen, an dem ein Verkehrsschild steht, das den Beginn eines solchen Verbotes markiert, werden iterativ alle nachfolgenden Fahrstreifen in Fahrtrichtung des Schildes durchsucht, sowie alle durch Fahrstreifenwechsel erreichbaren Fahrstreifen, sofern sie in derselben Fahrtrichtung verlaufen. Erfüllt ein besuchter Fahrstreifenabschnitt ein für dieses Schild spezifisches Abbruchkriterium, werden dessen Nachfolger nicht mehr besucht und die Suche endet an dieser Stelle. Das Verfahren endet, wenn es keine Nachfolger mehr gibt, die besucht werden können. Alle Fahrstreifenabschnitte, die das Abbruchkriterium nicht erfüllt haben, sind dann von der Verkehrsregel betroffen.

Als Suchstrategie kann sowohl eine Breitensuche als auch eine Tiefensuche verwendet werden, die Anzahl der zu betrachtenden Knoten ändert sich dadurch nicht.

Das Abbruchkriterium für Zonenregelungen ist trivial. Es ist erfüllt, wenn ein Fahrstreifen in einer Richtung besucht wird, in der ein entsprechendes Schild für das Zonenende aufgestellt ist. Für Verkehrszeichen 310 (Ortstafel) ist das also Verkehrszeichen 311. Dies gilt analog für Autobahnen, Tempo-30-Zonen, Spielstraßen, etc.

Das Abbruchkriterium für Vorfahrtsstraßen (durch Zeichen 305 ausgedrückt) muss zusätzlich den Straßenverlauf berücksichtigen. Es ist erfüllt, wenn ein Fahrstreifen betrachtet wird, dessen unmittelbarer Vorgänger zuvor als „links“, bzw. „rechts“ klassifiziert wurde, es sei denn, das zuletzt betrachtete Verkehrszeichen trägt das Schild „Abknickende Vorfahrt“ (Zeichen 1002) als Zusatz. In diesem Fall ist das Abbruchkriterium für alle in dem Zeichen als nachrangig dargestellten Richtungen erfüllt. Dass erst beim Nachfolger abgebrochen wird, trägt der Tatsache Rechnung, dass Verbote erst nach abgeschlossenem Abbiegevorgang in eine andere Straße ihre Wirkung verlieren und nicht davor. Zusätzlich ist das Abbruchkriterium erfüllt, wenn ein links oder rechts angrenzender Fahrstreifen besucht wird, zu dem ein Fahrstreifenwechsel über einen gestrichelten Breitstrich erfolgen muss. Denn dann handelt es sich um eine neue Fahrbahn, die nicht zwangsläufig eine Vorfahrtsstraße ist. Dies müsste durch ein erneutes Verkehrszeichen verdeutlicht werden.

Ähnlich wie bei Zonen endet das Verfahren ebenfalls, wenn ein Fahrstreifenabschnitt mit einem Verkehrsschild betrachtet wird, das die Vorfahrtsstraße beendet, also Zeichen 306 („Ende der Vorfahrtsstraße“) oder 205 und 206 („Vorfahrt gewähren“). Weitere Zeichen 305 stellen hingegen kein Abbruchkriterium dar, da sie die Verkehrsregel nur wiederholen. Grenzen als Ergebnis zwei oder mehr Fahrstreifenabschnitte aneinander, die jeweils zu einer Vorfahrtsstraße gehören, aber in unterschiedlichen Durchgängen erkannt worden sind, gehören diese zu einer einzigen zusammenhängenden Vorfahrtsstraße.

Die Abbruchkriterien für Streckenverbote sind sehr ähnlich, hier muss allerdings noch zusätzlich dem Verlauf der Vorfahrtsstraße gefolgt werden, sofern das zuletzt betrachtete Verkehrsschild auf einer Vorfahrtsstraße aufgestellt war. Ansonsten endet das Verfahren an nach links oder rechts abgehenden Fahrstreifenabschnitten. Ist das Verkehrszeichen mit einer Distanzangabe versehen, muss zusätzlich die zurückgelegte Strecke bis zum letzten Verkehrszeichen berücksichtigt und bei Überschreitung das Verfahren beendet werden. Als aufhebende Verkehrszeichen gelten hier das zugehörige Endzeichen, das Verkehrszeichen 282 („Ende aller Streckenverbote“), sowie konkurrierende Zeichen wie etwa eine höhere oder niedrigere Geschwindigkeitsbegrenzung. Bei Geschwindigkeitsbegrenzungen zählt auch die Ortstafel zu den konkurrierenden Zeichen.

Die Betrachtung der Fahrstreifen getrennt nach Fahrtrichtung führt dazu, dass sich Anfang und Ende der Verkehrsregeln auf entgegengesetzten Fahrstreifen nicht auf derselben Höhe im Straßenverlauf befinden müssen. Das mag nicht intuitiv erscheinen, entspricht aber der Realität, da Verkehrszeichen in unterschiedlichen Richtungen selten auf exakt gleicher Höhe aufgestellt werden, oder manchmal Verkehrsregeln auch nur exklusiv für eine Richtung gelten.

Fehler bei der Kartierung können in diesem Verfahren aufgrund fehlender Redundanz nur unzureichend erkannt werden. Eine Ausnahme bilden Verkehrsschilder für Zonen, da diese innerhalb der Zone nicht wiederholt werden dürfen. Wird im Laufe des Verfahrens ein Fahrstreifen betrachtet, dem ebenfalls ein Zonenschild in derselben Fahrtrichtung zugeordnet ist, stellt das daher einen Konflikt dar. Dieser ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass an einer Stelle in der Karte ein entsprechendes Endzeichen übersehen wurde, sodass sich die vermeintliche Zone über ihre eigentlichen Grenzen hinweg bis zu einer anderen Zone ausgebreitet hat.

Für Vorfahrtsstraßen gilt das nicht. Hier kann aber immerhin ausgenutzt werden, dass sich zwei Vorfahrtsstraßen nicht kreuzen dürfen. Ein solcher Fall weist also ebenfalls auf einen Kartierungsfehler hin. Bei Streckenverboten bleibt dagegen höchstens die Annahme, dass Geschwindigkeitsbegrenzungen üblicherweise nicht abrupt eingeführt werden, sondern die Geschwindigkeit in mehreren Schritten gesenkt wird. Eine abrupte Änderung deutet auf einen

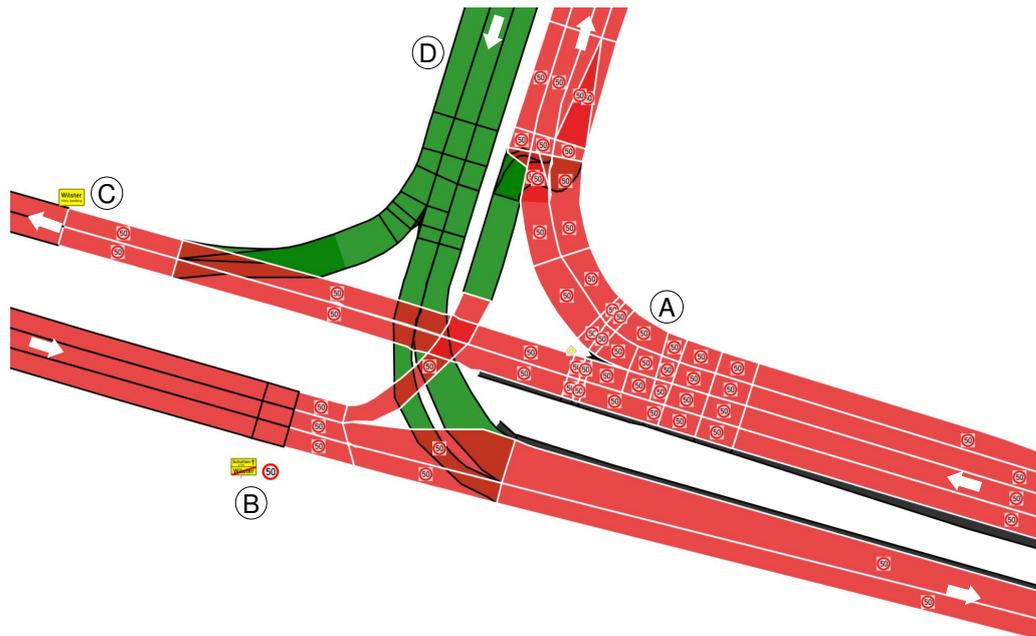


Abbildung 7.1: Durch den beschriebenen Algorithmus bestimmte Verläufe von Geschwindigkeitslimits und Vorfahrtsstraßen. Rote Fahrstreifenabschnitte: Vorfahrtsstraße, grün: restliche Fahrstreifen. Von Geschwindigkeitslimits betroffene Fahrstreifenabschnitte in weißer Umrandung. Siehe Text für die Bedeutung der Lettern A bis D.

Konflikt hin, muss aber nicht zwangsläufig ein Fehler sein, da solche Übergänge nicht verpflichtend vorgeschrieben sind.

Abb. 7.1 zeigt beispielhaft ein Ergebnis des Algorithmus an einer dreiarmligen Kreuzung. Die von rechts kommende Vorfahrtsstraße verzweigt sich hier (A), was durch das an der Verzweigungsstelle aufgestellte Zeichen „Vorfahrtsstraße“ verdeutlicht wird. Ebenso bleibt die zuvor gültige Geschwindigkeitsbegrenzung für beide Straßen bestehen. Für die Gegenrichtung (B) endet kurz vor der Kreuzung der Stadtbereich, deswegen kurz darauf eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 50 ausgesprochen wird. Für den hier nach links abbiegenden Korridor endet diese Begrenzung aber kurz nach dem Abbiegen, bis er im weiteren Verlauf (bei A) auf die Vorfahrtsstraße trifft, wo die Geschwindigkeitsbegrenzung der Vorfahrtsstraße gilt. Das Schild wird hier nicht noch einmal wiederholt. Deshalb kann ein bei B nach links abbiegender Verkehrsteilnehmer hier eigentlich keine Kenntnis von der Geschwindigkeitsbegrenzung haben. Die Beschilderung ist hier also unklar, aber nicht falsch, da keine Pflicht besteht, das Schild an allen Einmündungen zu wiederholen.

Bei C endet die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 50 km/h, da hier das Ortsschild erreicht wird. Ab hier gilt dann das innerörtliche Geschwindigkeitslimit von ebenfalls 50 km/h. Die Straße bei D ist schließlich die einzige Straße, für die keine Geschwindigkeitsbegrenzung gilt. Das ändert sich erst nach dem Abbiegen, womit die Straße endet, da sie keinen Nachfolger geradeaus hat. Auch hier haben Linksabbieger zunächst keine Kenntnis von der Beschränkung auf 50 km/h. Das ändert sich erst weiter rechts, wo das Geschwindigkeitslimit auf 60 km/h angehoben wird (nicht mehr im Bild).

7.2.3 Bestimmung von Vorfahrtsregeln

Das Bestimmen von Vorfahrtsregeln erfordert ein anderes Vorgehen als für die oben diskutierten Verkehrsregeln. Betrachtet wird hier nicht der Fahrstreifengraph, sondern jeweils isoliert eine Kreuzung, denn nur hier kann es überhaupt zu Konflikten mit anderen Verkehrsteilnehmern kommen. Abgesehen von Vorfahrtsstraßen, welche bereits

oben besprochen wurden, beschränken sich die Vorfahrt regelnden Schilder immer nur auf eine Kreuzung, sodass eine globale Betrachtung nicht notwendig ist. Im Allgemeinen muss die Vorfahrt für jede Paarung von Korridoren innerhalb von Kreuzungen bestimmt werden. Nur den letzten Fahrstreifen vor der Kreuzung zu betrachten ist nicht ausreichend, weil die Vorfahrt nicht nur von dem Fahrstreifen abhängt, auf dem sich ein Verkehrsteilnehmer befindet, sondern auch von der Richtung, in die er fahren will. Will er nach links abbiegen, muss er den entgegenkommenden, seinerseits geradeaus fahrenden Verkehr passieren lassen. Fährt er hingegen geradeaus oder nach rechts, hat er seinerseits Vorrang vor entgegenkommenden, links abbiegenden Teilnehmern. Gegenüber von links oder von rechts kommenden Verkehrsteilnehmern ist der Fall hingegen eindeutig: Im ersten Fall besteht grundsätzlich Vorrang, im zweiten grundsätzlich Nachrang, sofern sich die Wege überhaupt kreuzen und keine durch Verkehrszeichen geregelte Vorfahrt besteht.

Dieser Sachverhalt lässt sich leichter verallgemeinern, wenn stattdessen nicht die an die Kreuzung angrenzenden Fahrstreifen, sondern die Korridore innerhalb der Kreuzung betrachtet werden. Denn hier lässt sich sagen, dass bei der Betrachtung von zwei Korridoren k_1 und k_2 der Korridor k_1 genau dann Vorfahrt hat, wenn k_2 links von ihm beginnt und rechts von ihm oder auf demselben Fahrstreifen endet. Ist es umgekehrt, besteht Vorrang für k_2 . Beginnt k_2 links und endet auch links von k_1 , so kreuzen sich die Korridore nicht oder sie sind gleichberechtigt. Diese Eigenschaft ist symmetrisch, es spielt keine Rolle, welcher Korridor zuerst betrachtet wird.

Dass diese Betrachtung äquivalent zur oben beschriebenen ist, lässt sich leicht durch Ausprobieren aller möglichen Fälle prüfen. Diese Methode erfordert zudem keine geometrische Betrachtung der Korridore an sich. Es reicht aus zu wissen, in welcher Reihenfolge die Fahrstreifen, die durch die Korridore verbunden werden, an die Kreuzung angrenzen. Hat einer der betrachteten Korridore durch ein Verkehrszeichen Vorfahrt und der andere nicht, ist die Situation dagegen auch ohne Betrachtung der Geometrie eindeutig. Ein Sonderfall, der speziell betrachtet werden muss, entsteht, wenn ein Korridor an einem Fahrstreifen beginnt, an dem der andere Fahrstreifen endet, was bei bidirektionalen Fahrstreifen vorkommen kann. In diesem Fall hat der zu dem bidirektionalen Fahrstreifen hinführende Fahrstreifen dann Vorfahrt, wenn er von rechts kommt, im anderen Fall hat keiner von beiden Vorfahrt, weil es durch das Rechtsfahrgebot hier entweder nicht zu einem Konflikt kommen kann oder zu einer Situation, in der keiner von beiden Vorrang hat.

Zusätzlich müssen Positionen bestimmt werden, an denen Fahrzeuge, die Nachrang haben, halten sollen. Gibt es eine explizit markierte Haltelinie, sollte bevorzugt daran gehalten werden. Dafür werden alle Vorgänger-Fahrstreifenabschnitte der Korridore mit Nachrang bis zu einem bestimmten Abstand nach einer schneidenden Haltelinie durchsucht. Gibt es eine solche Linie, wird sie als Haltelinie hinterlegt. Ansonsten wird an der Stelle, an der nach Kap. 5.2 der Kreuzungsbereich überschritten wird, eine virtuelle Haltelinie gebildet, da dies definitionsgemäß der letzte Punkt ist, an dem eine Überschneidung mit anderen Fahrstreifen ausgeschlossen ist.

Beispielhafte Ergebnisse für dieses Verfahren sind in Abb. 7.2 dargestellt. Im linken Bild ist dies für eine kleine Kreuzung in der Innenstadt dargestellt. In der Darstellung wurden alle Situationen zusammengefasst, in denen ein von einem bestimmten Kreuzungsarm kommendes Fahrzeug Vorfahrt gewähren muss. Das bedeutet nicht, dass in jeder Situation gegenüber den anderen Kreuzungsarmen Nachrang gilt, denn dafür ist zusätzlich die Abbiegerichtung entscheidend. Ein von Kreuzungsarm 3 kommendes Fahrzeug muss gegenüber den Kreuzungsarmen 1 und 2 Vorfahrt gewähren, wenn es nach links abbiegt, aber nicht, wenn es nach 2 abbiegt. Ein von 4 kommendes Fahrzeug muss nur 3 Vorfahrt gewähren, aber niemals 1 oder 2, weil es nicht nach links abbiegen darf. Dabei ist es unerheblich, wohin von 2 kommende Fahrzeuge fahren wollen, da sie beim Linksabbiegen dem Kreuzungsarm 4 in jeden Fall Vorfahrt gewähren müssen.

Die Kreuzung im rechten Bild verdeutlicht die typische Vorfahrtsituation an einer Vorfahrtsstraße. Von den Kreuzungsarmen 1 oder 4 kommende Fahrzeuge haben dabei grundsätzlich Vorfahrt vor den Armen 3 und 6. Nur beim

8 Evaluation

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln Methoden vorgestellt wurden, wie Karteninformation iterativ aus den beobachteten Informationen inferiert werden kann, soll in diesem Kapitel demonstriert werden, dass diese Methoden für reale Straßensituationen geeignet sind.

Dazu wurde eine Softwareimplementierung der Methoden erstellt, welche in Abschnitt 8.1 detailliert ausgeführt wird. Um die Eignung der Methoden und Regeln zu evaluieren, konnten keine Referenzarbeiten herangezogen werden, da es zu diesem Thema keine solchen gibt. Entsprechend existieren auch keine geeigneten öffentlich verfügbaren Datensätze. Daher wird zur Evaluation ein in Teilen aus existierenden fahstreifengenauen Karten abgeleiteter, etwa 102 km Straßenlänge umfassender Datensatz genutzt. Dieser enthält die Gesamtheit der regulatorischen Elemente eines zusammenhängenden Straßennetzes aus der näheren Umgebung von Karlsruhe. Dabei wurde auf eine große Bandbreite der untersuchten Flächen geachtet. Der Datensatz beinhaltet zu etwa gleichen Teilen innerstädtische Regionen (35% der Gesamtlänge der Fahstreifen) aus verschiedenen Stadtteilen, darunter auch enge Gassen und Einbahnstraßen, sowie überregionale Straßen (27%) und Autobahnen (37%). Der Datensatz und seine Zusammensetzung wird in Abschnitt 8.2 genauer beschrieben.

Das Ziel dieses Kapitels ist es, mit Hilfe dieses Datensatzes nachzuweisen, dass die in dieser Arbeit aufgestellten Methoden und Regeln für die praktische großflächige Anwendung im Straßenverkehr geeignet sind. Dazu soll sichergestellt werden, dass die aus dem Datensatz erzeugte Karte die für ein Fahrzeug relevanten Informationen nach Kap. 3.4 korrekt und vollständig wiedergibt. Der Nachweis besteht darin, systematisch aus den möglichen Fehlerkategorien in der Karte nachprüfbar Symptome abzuleiten. Daraus lassen sich Metriken bestimmen, mit denen diese bewertet und lokalisiert werden können. Die genaue Untersuchung der so bestimmten Positionen möglicher Defekte erlaubt dann Rückschlüsse auf die Korrektheit der Karte. Die dazu nötigen Metriken werden in Abschnitt 8.3 vorgestellt.

Zur Bewertung der Ergebnisse steht eine fahstreifengenaue Referenzkarte großer Teile dieses Gebiets zur Verfügung, welche von einem kommerziellen Kartenanbieter erstellt wurde. Da die Karten nicht exakt deckungsgleich sind und bei der Kartierung unterschiedliche Strategien angewendet wurden, müssen die Metriken entweder invariant gegenüber diesen Strategien sein oder deren Effekte auf die Karte zumindest transparent darstellen. Nicht alle möglichen Kartierungsfehler machen den Vergleich mit einer Referenzkarte nötig. Daher werden in Abschnitt 8.3 auch Methoden vorgestellt, wie die Plausibilität einer Karte in sich, also ohne Vergleich mit einer Referenzkarte, bewertet werden kann.

Schließlich kann anhand dieser Ergebnisse in Abschnitt 8.4 eine Bewertung der vorgestellten Methoden vorgenommen werden. Zusätzlich werden während der Kartenerzeugung erkannte Konflikte bzw. Mehrdeutigkeiten erläutert und ihre Konsequenzen für die Kartenerzeugung diskutiert.

8.1 Implementierung

Zur Umsetzung der beschriebenen Methoden wurde eine Softwareimplementierung in C++ erstellt. Insbesondere die notwendigen Geometrieoperationen einschließlich der Voronoi-Berechnung sind sehr aufwändig zu implementieren. Deswegen wird hierfür auf eine Softwarebibliothek, *Boost.geometry*, zurückgegriffen. Dennoch macht das Abfangen von Sonderfällen in Geometrieberechnungen, die beispielsweise durch numerische Ungenauigkeiten entstehen, größere Teile der Implementierung aus.

Günstig für die Bearbeitung der Daten ist, dass viele Verarbeitungsschritte nahezu beliebig parallelisiert werden können. Nur die ersten beiden Verarbeitungsschritte, die Bestimmung der Straßenfläche und das Segmentieren in Kreuzungsflächen kann nicht parallelisiert werden (vgl. Abb. 5.1). Diese Verarbeitungsschritte machen allerdings nur einen kleinen Teil der Gesamtrechenzeit aus. Hier ist die Komplexität durch den verwendeten Voronoi-Algorithmus $O(n \log(n))$ (vgl. Kap. 5.2) in Bezug auf die Anzahl der Liniensegmente in den Eingangsdaten das beschränkende Element. In den übrigen Verfahrensschritten, etwa dem Inferieren der Fahrstreifeninformation, kann jeder potenzielle Fahrstreifen und seine nähere Umgebung isoliert betrachtet werden, um dessen Eigenschaften zu bestimmen. Die Berechnungen können für jeden Verkehrsstreifen separat durchgeführt werden. Daher lässt sich das Verfahren hier fast beliebig parallelisieren. Das Inferieren der Kreuzungstopologie kann wiederum für jede Kreuzung isoliert durchgeführt werden.

Die Implementierung nutzt dieses Potential nicht vollständig aus. Aber bereits hier liegt die Berechnungszeit auf dem 100 km Streckenlänge umfassenden Datensatz auf einem Kern einer Intel E5-2640 CPU (2,6 GHz) bei etwa 1:46 min, bei zwei Kernen bei 1:02 min, bei vier Kernen bei 0:45 min und sinkt dann bei zehn Kernen schließlich auf 0:30 min. Es lässt sich also erkennen, dass weitere Kerne die Berechnung deutlich beschleunigen. Der größte Anteil entfällt dabei auf die geometrische Bestimmung der Kreuzungen gemäß Kap. 6.5, welche bei zehn Kernen 18 s benötigt. Die Schritte von der Vorverarbeitung bis zur Bestimmung der einzelnen Fahrstreifen benötigen dagegen nur 8 s, der Rest entfällt überwiegend auf das Bestimmen der Fahrstreifeninformationen. Das Inferieren der Verkehrsregeln benötigt weniger als eine Sekunde.

Bei wenige Kilometer umfassenden Kartenausschnitten beträgt die Berechnungszeit nur noch einzelne Sekunden, was absolut hinreichend ist, um etwa mit einem Nutzer im Dialog einen Ausschnitt der Karte zu bearbeiten und dabei Konflikte in den Eingangsdaten zu erkennen und zu beseitigen.

Für die generierte Karte wird das Format Lanelet2 [2] genutzt, in welchem auch die Referenzkarte vorliegt. Aus diesem Format lassen sich die Topologieinformation extrahieren und Routen durch die Fahrstreifenabschnitte sowie die dabei gültigen Verkehrsregeln bestimmen.

8.2 Datensatz

Abb. 8.1 gibt einen Überblick über den Datensatz. Entlang der 102 Straßenkilometer wurden 596 km Straßenränder, Bordsteine und Markierungen sowie 895 Verkehrsschilder, 335 Ampeln und 983 Pfeilmarkierungen kartiert. Diese Daten wurden überwiegend bestehenden, fahrstreifengenauen Karten entnommen, mehrheitlich aus dem frei verfügbaren Kartendatensatz zum *Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg*. Zwei Autobahnbrücken wurden aus dem Datensatz entfernt, weil diese von der Implementierung nicht bearbeitet werden können. Denn dort kreuzen sich zwei nicht höhengleiche Straßen.

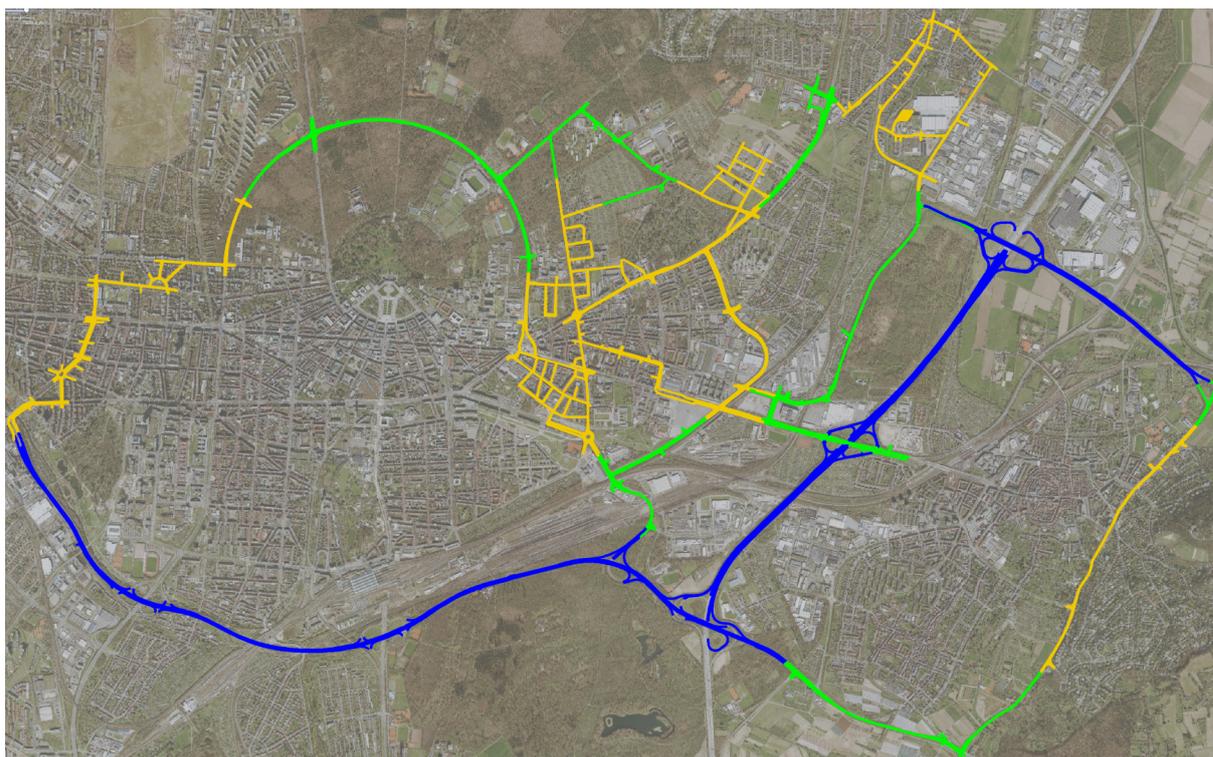


Abbildung 8.1: Überblick über den Evaluationsdatensatz, eingefärbt nach Straßentyp: Innenstadt gelb, außerorts grün, Autobahn blau. Er umfasst im Wesentlichen Teile der Karlsruher Innenstadt sowie einiger angrenzender Stadtviertel, die autobahnähnliche Südtangente (unten), einen Abschnitt der Autobahn A5 (rechts) und einen größeren Abschnitt der B3 (ganz rechts). Quelle Luftbild: Stadt Karlsruhe, Lizenz: dl-de/by-2-0

Die den Fahrstreifen in den Vergleichsdatensätzen zugrundeliegenden Markierungen sind auch zugleich ein Teil der Eingangsdaten für die zu evaluierende Kartengenerierung. Das ist günstig, weil so eine geometrisch ähnliche Karte erzeugt wird, die leichter mit dem Referenzdatensatz verglichen werden kann.

Allerdings sind die Referenzkartendaten sehr unvollständig, was kreuzende oder einmündende Fahrstreifen betrifft. Ein Beispiel dafür kann Abb. 8.2 entnommen werden. Wie dort zu sehen ist, enthält der Vergleichsdatensatz nur für die durchgehenden Fahrstreifen einer Kreuzung Daten. Auch diese sind teilweise nicht korrekt, wie etwa die gestrichelte Markierung, welche über die Kreuzung führt, aber in der Realität nicht existiert. Diese Daten wurden für die Eingangsdaten der Kartierung korrigiert. Dafür wurden etwa 20% der erwähnten 596 km Gesamtlänge der Eingangsdaten mithilfe von Luftbildern ergänzt. Andernfalls wären einige der für die Bewertung des Verfahrens interessanten Kreuzungen nicht enthalten gewesen. Es hätte außerdem sonst für die Verarbeitung benötigte Kontextinformation gefehlt, da beispielsweise der Straßenrand für die erfolgreiche Verarbeitung zwingend bekannt sein muss. Beim Abgleich der erzeugten Karte mit der Referenzkarte muss nun allerdings berücksichtigt werden, welche Fahrstreifen auf diese Art ergänzt wurden.

Durch die Ergänzungen enthält der Datensatz insgesamt 247 Kreuzungen, mit zwischen drei und 24 einmündenden Fahrstreifen. Ebenfalls enthalten sind vier Kreisverkehre.

Bei Fahrstreifen am Rand des Kartenbereichs kann oft nicht ermittelt werden, ob sie einmündend sind. Hat der Fahrstreifen am Kartenrand bis zur nächsten Kreuzung keine Schilder oder Pfeile, die auf die Fahrtrichtung hindeuten, ist an der Kreuzung oft mehrdeutig, ob er nur aus der Kreuzung herausführt oder auch in sie hineinführt. Aufgrund dieser Mehrdeutigkeit kann dann zwar bestimmt werden, ob über den Fahrstreifen aus dem Kartenbereich herausgefahren werden kann, aber nicht, ob hineingefahren werden kann. Daher wurden an diesen Rändern Richtungshinweise hinterlegt. Bei 107 der 625 hineinführenden Fahrstreifen war das der Fall.



Abbildung 8.2: Gegenüberstellung von Vergleichsdatensatz (links) und zur Kartierung verwendeten Kartendaten (rechts). Quelle Luftbild: Stadt Karlsruhe, Lizenz: dl-de/by-2-0.

Mit insgesamt 298 km Fahrstreifenlänge ist der Datensatz so umfangreich, dass erwartet werden kann, dass er auch einige seltene Sonderfälle beinhaltet. Zur allgemeinen Beurteilung der Anwendbarkeit des vorgestellten Verfahrens ist er damit geeignet. Auch wenn auf eine repräsentative Verteilung unterschiedlicher Straßentypen geachtet wurde, sollte betont werden, dass der Datensatz nur einen Bruchteil der Gesamtstraßenlänge Deutschlands darstellt, der zudem auf eine einzige Region beschränkt ist. Öffentliche Datensätze mit einer vergleichbaren Qualität sind, wie eingangs des Kapitels erläutert, nicht verfügbar. Da deutschlandweit dieselben Straßenbaurichtlinien gelten, aus denen letztlich das hier vorgestellte Verfahren abgeleitet wurde, besteht aber Anlass zu der Annahme, dass die Ergebnisse der Evaluation auch auf andere Regionen zutreffen. Schließlich wird bei der Straßengestaltung generell ein ähnliches Erscheinungsbild angestrebt, um ortsunkundigen Fahrern das Verständnis zu erleichtern.

8.3 Evaluationsmethode

Die generierte Karte wird nach zwei unterschiedlichen Gesichtspunkten untersucht. Zum einen kann durch einige einfache Methoden die Validität der Karte bestimmt werden, ohne sie mit einer anderen Karte vergleichen zu müssen. So können offensichtliche Inkonsistenzen, wie Unterbrechungen im Fahrstreifengraphen, gefunden werden. Der zweite Gesichtspunkt ist der Vergleich der Karte mit der Referenzkarte. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die beiden Karten nach unterschiedlichen Strategien erstellt wurden, also in Teilen gar nicht identisch sein können.

Zwei Beispiele dafür sind in Abb. 8.3 dargestellt. Die automatisch erzeugte Karte enthält bei Straßen, die nur aus einer Fahrbahn bestehen, nur einen bidirektionalen Fahrstreifen. Die Referenzkarte hingegen enthält zwei Fahrstreifen, die durch eine künstlich eingefügte Mittellinie getrennt sind. Beide Möglichkeiten sind sinnvoll. Die erste Möglichkeit lässt mehr Freiraum für die Verhaltensplanung eines automatisierten Fahrzeugs und ist näher an den Realdaten, während die zweite leichter verarbeitet werden kann, weil auf dem Fahrstreifen kein Gegenverkehr erwartet werden muss. Ob sich Fahrzeuge auch tatsächlich an die Fahrstreifen halten, ist allerdings fraglich.

Die Karten unterscheiden sich aber auch im Umgang mit wegfallenden bzw. hinzukommenden Fahrstreifen (Abb. 8.3 Mitte). Im Referenzdatensatz wird einer der Fahrstreifen immer als der durchgängige betrachtet. Der zweite kann dann durch einen Fahrstreifenwechsel über eine virtuelle Linie erreicht bzw. verlassen werden. In der automatisch erzeugten Karte wird dagegen für jeden Fahrstreifen ein Übergang ähnlich einer Weiche erzeugt, welcher zu diesem Fahrstreifen hinführt. Auch hier sind beide Strategien valide, unterscheiden sich aber in ihrem Effekt auf das Fahrzeugverhalten, da in einem Fall ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt wird, im anderen nicht. Beim Vergleich der Karten muss dieser Unterschied also berücksichtigt werden.

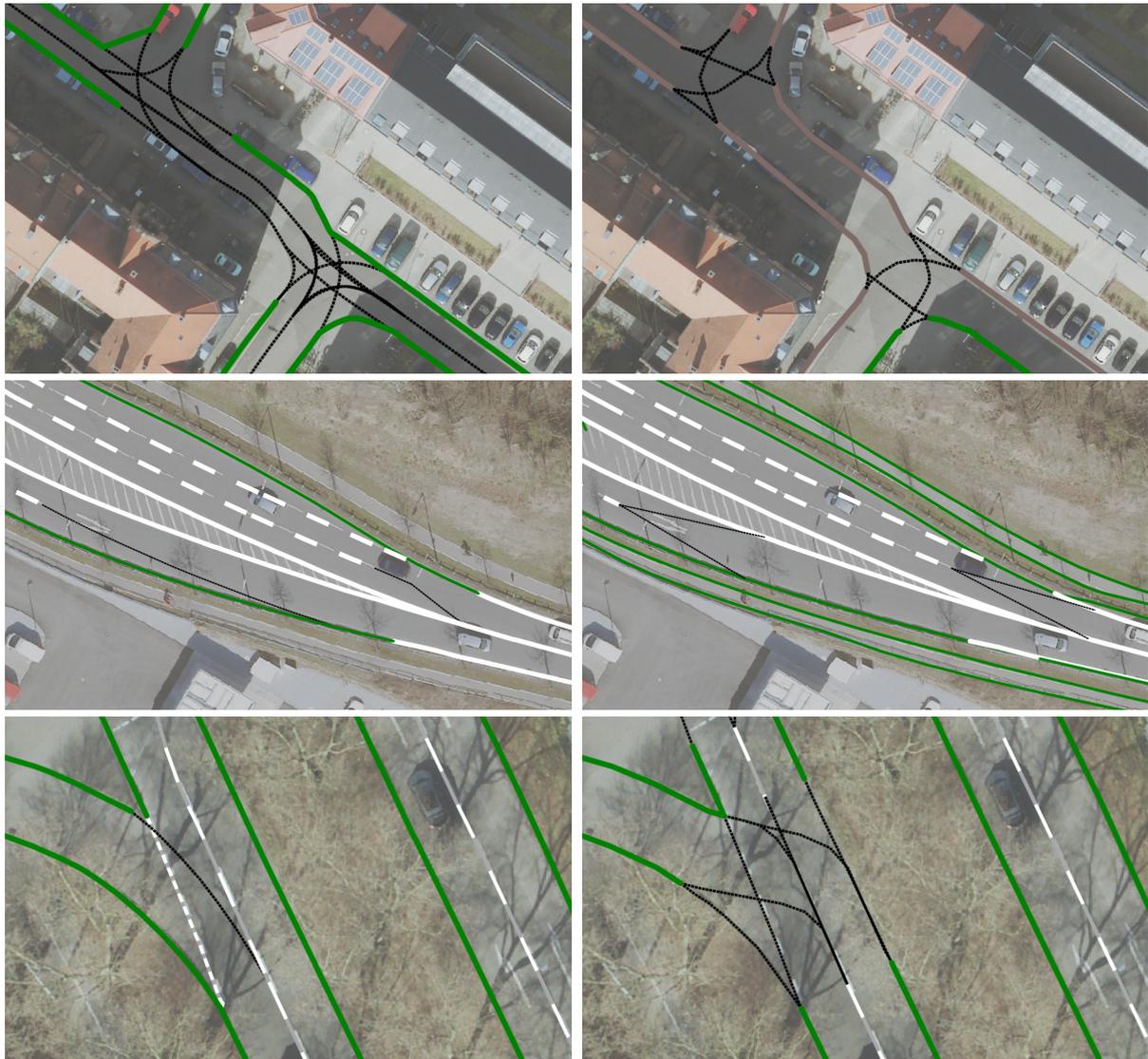


Abbildung 8.3: Unterschiedliche Kartierungsstrategien zwischen Referenzkarte (links) und erzeugter Karte (rechts). Künstlich ergänzte Fahrstreifenränder schwarz, Markierungen weiß, Straßenrand grün. Quelle Luftbilder: Stadt Karlsruhe, Lizenz: dl-de/by-2-0.

Die Behandlung von einmündenden Fahrstreifen an Kreuzungen ist ebenfalls nicht identisch mit der Referenzkarte (Abb. 8.3 unten). Während bei der automatisierten Fahrstreifenenerstellung für einzelne einmündende Fahrbahnen gemäß R8 aus Kap. 4.2 Übergänge zu allen Fahrstreifen erzeugt werden (auf dem Bild für den von rechts einmündenden Fahrstreifen in die nach unten führende Richtungsfahrbahn), werden in der Referenzkarte oft nur für den rechtsäusseren Fahrstreifen Übergänge gebildet, das Vorgehen ist aber nicht einheitlich. An manchen Kreuzungen wird nur zu einem Fahrstreifen ein Übergang gebildet, an anderen mehrere.

Um die Korrektheit der Karte systematisch zu validieren, bietet es sich an, die Karte aus der Sicht der sich ergebenden Topologie zu untersuchen, da dort die für das Fahrzeugverhalten relevanten Informationen der unteren Kartenebenen zusammentreffen (vgl. Kap 3.4). Ein Fehler innerhalb eines einzelnen Fahrstreifenabschnitts beeinflusst immer auch die gesamte Topologie der Karte und somit den Fahrstreifengraph. Dabei können mehrere unterschiedliche Arten von Defekten auftreten: Fehlende Fahrstreifen, falsche Fahrstreifen, falsche Fahrrichtungen für die Fahrstreifen, falsche Beziehungen zwischen den Fahrstreifen (Fahrstreifenwechsel) und falsche Verkehrsregeln für die Fahrstreifen. Analoge Betrachtungen sind auch für die Verkehrsbereiche anderer Verkehrsteilnehmer wie Radfahrer und Fußgänger möglich. Mit dem verwendeten Datensatz ist das jedoch nur an wenigen Stellen

möglich, da nur wenige Fußwege enthalten sind. Die Referenzkarte enthält dagegen nur Fahrstreifen und gar keine Fuß- oder Radwege.

Ein Großteil der möglichen Defekte lässt sich bereits während der Kartengenerierung beziehungsweise direkt im Anschluss daran durch Plausibilisierung der Karte validieren. Fehlende Fahrstreifenabschnitte hinterlassen eine Unterbrechung im Fahrstreifengraphen oder sorgen dafür, dass er in mehrere Teile zerfällt, die nicht miteinander verbunden sind. Das Fehlen eines ganzen Fahrstreifens kann dadurch bemerkt werden, dass ein Fahrstreifen zwar durch eine gestrichelte Linie begrenzt wird, er in dieser Richtung aber keinen Nachbarn hat. Das Fehlen eines ganzen Straßenabschnitts kann so allerdings nicht erkannt werden, da es sich prinzipiell auch um ein nicht kartiertes Straßenstück handeln kann. Hier hilft nur der Vergleich mit der Referenzkarte.

Das Entstehen von falschen Fahrstreifen abseits von Kreuzungen ist sehr selten. Die häufigste Ursache dafür sind doppelt kartierte Markierungen, welche dann nicht konsistent für die Ränder benutzt werden. Derartige Fehler in den Eingangsdaten führen aber wiederum zu entweder extrem schmalen Fahrstreifen, was leicht bemerkt werden kann, oder zu inkonsistenten Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Fahrstreifen, die analog zu fehlenden Fahrstreifen erkannt werden können. Werden Korridore innerhalb von Kreuzungen falsch bestimmt, ruft auch das meist einen Konflikt mit den angrenzenden Fahrstreifen hervor. Das muss aber nicht unbedingt der Fall sein. Auch fehlende oder missachtete Abbiegeverbote können eine Ursache sein. Dann gibt es keine Konflikte mit der Fahrtrichtung des angrenzenden Fahrstreifens, aber der Korridor widerspricht der Beschilderung.

Falsche Fahrtrichtungen führen erneut zu Defekten in der Karte, die meist schon während des Kartierungsprozesses auffallen. Etwa, wenn Fahrstreifen unterschiedlicher Fahrtrichtung aufeinandertreffen oder die Fahrtrichtung nicht abschließend geklärt werden kann. Dafür ist in der Regel eine fehlende oder unklare Beschilderung verantwortlich. Situationen, in denen es nicht zu einem Konflikt kommt, die gefundene Lösung aber dennoch nicht korrekt ist, sind selten, aber nicht ausgeschlossen. Daher ist auch hier ein Vergleich mit der Referenzkarte nötig.

Die Plausibilität von Verkehrsregeln schließlich lässt sich ebenfalls sehr einfach prüfen. Bei Ampeln und Vorfahrtsituationen sollte für jeden Fahrstreifen ein Schild bzw. eine Ampel vorhanden sein, mit Ausnahme von Situationen, wo dies durch „rechts vor links“ abgedeckt ist. Außerdem dürfen keine zwei Vorfahrtsstraßen aufeinandertreffen. Verkehrsschilder, die Zonen einleiten, dürfen nicht wiederholt werden (vgl. Kap. 7). Daher dürfen keine zwei Zonen gleichen Typs unmittelbar aneinandergrenzen. Ansonsten fehlt an mindestens einer Stelle ein Schild, das die jeweilige Zone beendet. Streckenverbote sind am schwierigsten zu prüfen, da als Grundvoraussetzung zunächst der Verlauf einer Vorfahrtsstraße korrekt bestimmt werden muss. Ist dieser falsch, sind auch die davon abgeleiteten Verbote eventuell nicht korrekt. Auch hier bleibt nur ein Abgleich mit einer Referenzkarte.

Um diesen Abgleich durchzuführen und die Kartierungsfehler bestimmen zu können, welche nicht durch Plausibilitätsprüfungen gefunden werden können, werden in beiden Karten Positionen ermittelt, an welchen sich die Topologie der Karte verändert: Verzweigungspunkte, Vereinigungspunkte sowie Beginn und Ende eines Fahrstreifens. Für jeden dieser kritischen Punkte in der Topologie der beiden Karten wird entlang des Fahrstreifens nach einem Pendant in der anderen Karte gesucht. Abweichungen zwischen den beiden Karten lassen sich dann daran erkennen, dass ein solcher Punkt entweder nicht gefunden werden kann oder ein anderer Punkt gefunden wird. Da aufgrund der verschiedenen Kartierungsstrategien an einigen Stellen Verzweigungen in der automatisch generierten Karte, dagegen Fahrstreifenwechsel in der anderen Karte enthalten sind, ist zu erwarten, dass in den Ergebnissen mehrfach unterschiedliche Punkte für diese beiden Typen einander zugeordnet werden.

Einen groben Anhaltspunkt für die Vollständigkeit der erzeugten Karte bietet auch der reine Vergleich der existierenden Fahrstreifen miteinander. An jeder Stelle, an der in der Referenzkarte ein Fahrstreifen ist, sollte auch in der automatisch generierten Karte ein Fahrstreifen sein. Dieser Vergleich eignet sich aber nur für einen groben ersten Eindruck, da die Methode innerhalb von Kreuzungen nicht für die Validierung der Topologie geeignet ist.

Dort gibt es zu viele Fahrstreifen pro Fläche, um Fehlzuordnungen auszuschließen. Um Unterschiede bei den Fahrstreifenwechseln und Geschwindigkeitsbegrenzungen zu bestimmen, wird außerdem die Gesamtheit der für Fahrstreifenwechsel genutzten Ränder bestimmt und diese miteinander verglichen. Für Geschwindigkeitsbeschränkungen wird ähnlich verfahren, hier werden Mittellinien der Fahrstreifen für ein bestimmtes Geschwindigkeitslimit verglichen.

Die so erlangten Werte erlauben schließlich Rückschlüsse auf die Ähnlichkeit und somit die Korrektheit der beiden Karten. Jedoch erlauben sie keine Rückschlüsse darüber, welche Konsequenzen das für die Routenbestimmung der so erlangten Karte hat. Um diese globalen Auswirkungen zu untersuchen, werden schließlich noch Routen zwischen zufällig ausgewählten Start- und Zielpunkten in beiden Karten bestimmt und diese wiederum miteinander verglichen. Zwei Routen gelten als gleichwertig, wenn die Fahrstreifen einen Abstand von 10 m nicht überschreiten oder sich deren Gesamtlängen um weniger als 5% unterscheiden. Sollten Abweichungen zwischen den beiden Karten tatsächlich globale Effekte haben, so sollte es Fälle geben, in denen Routen systematisch nicht gleichwertig sind. Das muss immer dann der Fall sein, wenn für den kürzesten Pfad eine Route benutzt werden müsste, bei welcher der Defekt in der Karte eine Rolle spielt.

8.4 Ergebnisse und Diskussion

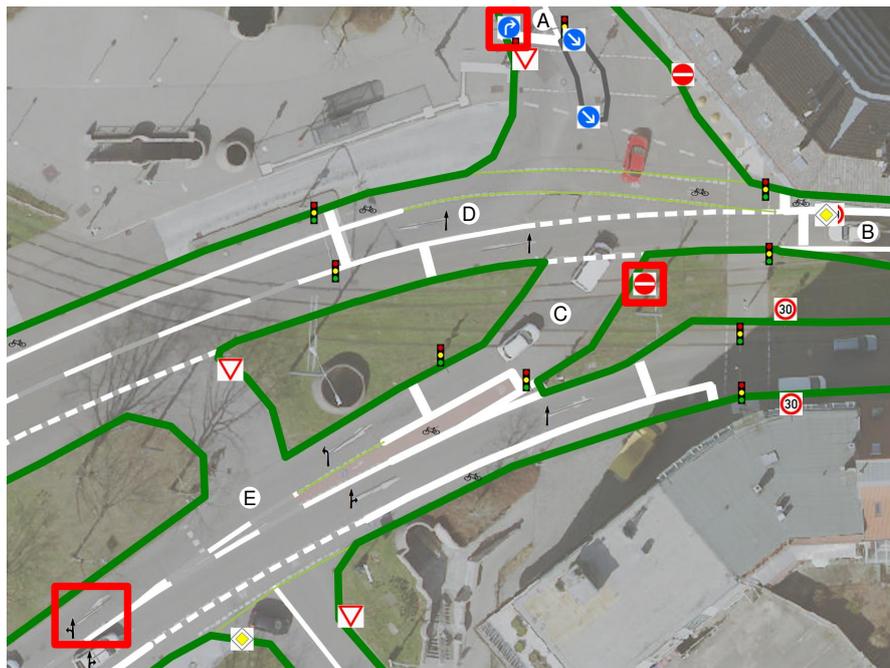
Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt getrennt nach den zwei unterschiedlichen Ansätzen zur Evaluation der Kartengenerierung. Zunächst wird in Abschnitt 8.4.1 diskutiert, welche Anpassungen und Ergänzungen in den Eingangsdaten zur Kartierung vorgenommen werden mussten, um eine erfolgreiche Kartengenerierung zu erreichen, welche die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Plausibilitätsprüfungen besteht. Im zweiten Abschnitt 8.4.2 wird dann auf die Unterschiede zwischen der Referenzkarte und der automatisch generierten Karte eingegangen.

8.4.1 Bei der Kartierung erkannte Abweichungen und Mehrdeutigkeiten

Einige Beispiele für Ergänzungen, die an den Eingangsdaten vorgenommen werden mussten, sind in Abb. 8.4 dargestellt. Die häufigsten Problemursachen sind nicht hinreichend gekennzeichnete Kreuzungsarme.

In Abb. 8.4a ist ein solcher Fall für die oben rechts zu sehende Kreuzung dargestellt. Von A einführende Fahrzeuge können nicht erkennen, dass sie weder geradeaus nach C fahren dürfen, noch links nach B abbiegen dürfen. In beiden Fällen würden sie in den Gegenverkehr fahren. Das ergibt sich jedoch nur aus dem weiteren Verlauf, da die Fahrbahn bei C später (bei E) zur Gegenfahrbahn von D wird, welche durch einen Grünstreifen getrennt ist. Um hier eine falsche Kartierung zu unterbinden, wurde bei A das Zeichen „rechts“ eingefügt. Weil auch für von B kommende Fahrzeuge nicht eindeutig ist, dass sie nicht links (nach C) abbiegen dürfen, wurde bei C zur Klärung zusätzlich das Zeichen „Verbot der Einfahrt“ ergänzt.

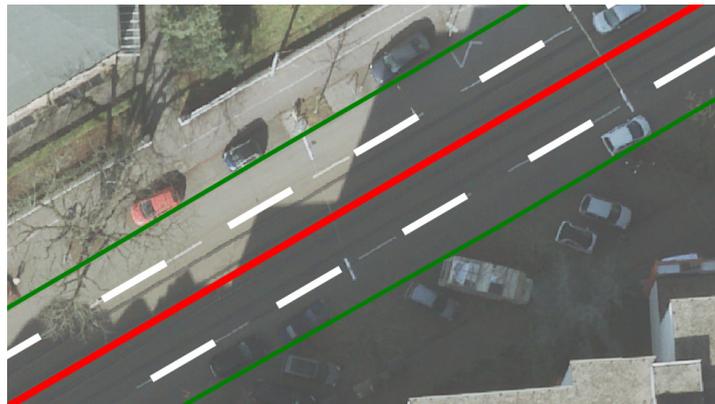
Ein vergleichbares Problem ergibt sich oft an Kreuzungen, an denen die Straßen in der Mitte durch einen Grünstreifen getrennt sind (siehe z.B. Abb. 8.4b). In aller Regel steht am Beginn des Grünstreifens das Verkehrszeichen „hier rechts“ (Zeichen 222), um die richtige der beiden Einfahrten zu kennzeichnen. In dem Stadtteil Weststadt in Karlsruhe ist das jedoch nicht immer der Fall. Hier wird offenbar von den Verkehrsteilnehmern erwartet, dass sie ohne Hilfestellung erkennen, welcher der beiden Kreuzungsarme zum Gegenverkehr gehört. Bei der Kartierung bereitet das jedoch Schwierigkeiten. Denn der räumliche Zusammenhang der beiden Straßenarme kann nicht eindeutig bestimmt werden und darüber hinaus ist A1 verletzt, welche besagt, dass Verkehrsteilnehmern an Kreuzungen durch Verkehrszeichen und Markierungen immer eindeutig vermittelt wird, welche Arme befahren werden dürfen.



(a) Unklare Abbiegerichtungen



(b) Einfahrten an Grünstreifen



(c) Fehlende Mittellinie

Abbildung 8.4: Anpassungen in den Eingangskartendaten (rot hervorgehoben). Quelle Luftbilder: Stadt Karlsruhe, Lizenz: dl-de/by-2-0.

Konflikte bei der Kartengenerierung entstehen auch bei Pfeilen, welche an dicht aufeinander folgenden Kreuzungen auf der Straße markiert sind. In Abb. 8.4a ist ein solcher Fall unten links zu sehen. Da dort ein Pfeil nach links aufgetragen ist, müsste daraus eigentlich folgen, dass hier nur links, nämlich in die Wendeschleife bei E, eingebogen werden darf, nicht aber bei C. Ähnliche Situationen gibt es auch an großen Kreuzungen, wenn kurz zuvor eine kleinere Straße einmündet. Die Pfeile passen dann nicht zu der Kreuzung, die an der kleineren Straße entsteht. In solchen Fällen ließ sich die Mehrdeutigkeit beheben, indem die Implementierung dahingehend angepasst wurde, dass Pfeile nicht beachtet werden, wenn es weniger Kreuzungsarme gibt als Pfeilrichtungen. In der Situation aus Abb. 8.4a ist das nicht möglich, denn hier stimmt die Anzahl der Pfeilrichtungen zufällig trotzdem überein. Darum wurde hier der Pfeiltyp von ursprünglich *links* zu *geradeaus und links* angepasst.

Die letzte Anpassung, die vorgenommen werden musste, ist in Abb. 8.4c dargestellt. Hier handelt es sich um eine Straße, die eigentlich vierstreifig ist, aber keine Mittellinie hat. Nur die beiden äußeren Fahrstreifen sind klar markiert, werden von Fahrzeugen aber in der Regel nicht genutzt, da sie von in der zweiten Reihe parkenden Fahrzeugen versperrt sind. Zusätzlich verlaufen in der Mitte noch Straßenbahnschienen. Die fehlende Straßenmarkierung ist

Tabelle 8.1: Kreuztabelle für die Unterschiede in der Topologie der beiden Karten. Klassen: Beginn eines Fahrstreifens (B), Aufteilung in 2-4 Fahrstreifen (A), Ende eines Fahrstreifens (E), Zusammenführen mehrerer Fahrstreifen (Z) sowie nicht assoziiert (N).

		Referenzkarte								Σ
		B	A2	A3	A4	E	Z2	Z3	N	
automatisch generierte Karte	B	180	4						25	209
	A2	24	122						41	187
	A3	3	6	22					11	42
	A4	1	4	3						8
	E					100	4		27	131
	Z2					10	140	1	34	185
	Z3						9	21	4	34
	N	36	73	8		60	105	20		302
	Σ	244	209	33	0	170	258	42	142	

eine klare Abweichung von der Richtlinie zur Markierung von Straßen [For80, Teil 2, Kap. 3.1]. Diese regelt, dass in Straßen, in denen die Gleiszone vom Individualverkehr mitbenutzt wird, der Gegenverkehr durch durchgezogene Linie abgetrennt sein muss. Daher wurde hier eine solche Linie ergänzt.

Insgesamt wurden auf der Karte 22 Anpassungen vorgenommen, davon 19 „hier rechts“, sowie die gezeigten Änderungen bei „Einfahrt verboten“, der Mittellinie und dem Pfeil.

8.4.2 Vergleich zwischen generierter Karte und Referenz

Tabelle 8.1 stellt die Unterschiede in der Topologie der Karte dar, wie sie durch die Zuordnung der in Abschnitt 8.3 beschriebenen markanten Stellen – also aufspaltende, beginnende, zusammenführende und endende Fahrstreifen – bestimmt wurde. Dabei wurden nur die Fahrstreifen in der automatisch generierten Karte verwendet, die auch im kartierten Gebiet der Referenzkarte lagen. Das traf auf etwa 68% der Fahrstreifenlänge zu. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass eine Ähnlichkeit zwischen den Karten bestehen muss, denn für 53% der markanten Punkte wurde auch eine passende Entsprechung gefunden. Für 40% wurde allerdings gar keine Entsprechung gefunden. Wie sich zeigen wird, lassen sich aber fast alle Fälle gut durch die unterschiedlichen Kartierungsstrategien erklären.

Die meisten dieser Abweichungen entstehen bei sich aufteilenden Fahrstreifen. Hier zeigen sich die unterschiedlichen Strategien (siehe Abschnitt 8.2). Besonders in innerstädtischen Regionen auf Straßen ohne Mittellinie unterscheiden sich diese deutlich. Hier konnten kaum markante Punkte zugeordnet werden, denn an den Kreuzungen von solchen einstreifigen Straßen sind in der Referenzkarte mindestens doppelt so viele aufteilende und zusammenführende Fahrstreifen enthalten wie in der erzeugten Karte. Dort besteht jede Straße aus je einem Fahrstreifen pro Richtung, wohingegen in der automatisch erzeugten Karte nur ein Fahrstreifen für beide Richtungen enthalten ist.

Die unterschiedliche Behandlung von hinzukommenden bzw. wegfallenden Fahrstreifen, die ebenfalls bereits in Abschnitt 8.2 erläutert wurde, findet sich in Tabelle 8.1 wieder. In der Referenzkarte wird das oft durch einen neu entstehenden Fahrstreifen beziehungsweise wegfallenden Fahrstreifen repräsentiert, zu dem ein Fahrstreifenwechsel möglich ist, während in der automatisch generierten Karte der Fahrstreifen in zwei neue Fahrstreifen geteilt wird. Diese Unterschiede führen dazu, dass beginnende Fahrstreifen in der Referenzkarte meist aufspaltenden Fahrstreifen

Tabelle 8.2: Geschwindigkeitsbegrenzungen der Fahrstreifen und Entsprechung mit der Referenzkarte als übereinstimmender Anteil an der Gesamtstrecke der automatisch generierten Karte

Geschwindigkeit	Entspr.	Gesamtstrecke
15 km/h	81%	1,3 km
30 km/h	95%	20 km
50 km/h	97%	49 km
60 km/h	99%	27 km
70 km/h	91%	9 km
80 km/h	100%	31 km
100 km/h	81%	17 km
120 km/h	97%	15 km

zugeordnet wurden. Lagen die markanten Stellen in den beiden Karten zu weit auseinander, konnten sie oft auch gar nicht zugeordnet werden. Dasselbe gilt für endende und zusammenführende Fahrstreifen.

Auch der dritte Unterschied in der Kartierungsstrategie – die Verbindung möglichst aller hinaus führenden Fahrstreifen eines Arms mit den zugehörigen Fahrstreifen eines einmündenden Arms – lässt sich in Tabelle 8.1 nachvollziehen. Der Unterschied führt dazu, dass tendenziell mehr aufspaltende und zusammenführende Fahrstreifen erzeugt werden, für die sich keine Entsprechungen in der Vergleichskarte finden. Das ist eine Erklärung dafür, dass für keinen der acht sich aufteilenden Fahrstreifen der generierten Karte eine Entsprechung mit gleich vielen aufteilenden Fahrstreifen gefunden wurde.

Für eine große Ähnlichkeit der beiden Karten spricht die Anzahl der Fahrstreifen, für die in der jeweils anderen Karte eine Entsprechung gefunden wurde. Eine Entsprechung für eine bestimmte Position auf der Mittellinie des Fahrstreifens gilt dann als gefunden, wenn es in unmittelbarer Nähe zu dem Fahrstreifen eine Mittellinie eines in der selben Richtung verlaufenden Fahrstreifens aus der anderen Karte gibt. Der Maximalabstand zum Fahrstreifen wurde so gewählt, dass die bidirektionalen Fahrstreifen der automatisch generierten Karte zuverlässig zu den Richtungsfahrstreifen der Referenzkarte zugeordnet werden konnten. Der Unterschied zwischen den beiden Kartierungsstrategien wirkt sich daher nicht negativ auf das Ergebnis aus. Mit dieser Methode konnte lediglich für 327 m (0,18%) Fahrstreifenlänge in der automatisch generierten Karte keine Entsprechung gefunden werden. Ebenso wurde für 417 m (0,2%) in der Referenzkarte keine Entsprechung gefunden. Die meisten dieser Abweichungen entstanden bei an neu hinzukommenden Fahrstreifen, sowie in den Randbereichen der Karte, weil dort Fahrstreifen an leicht unterschiedlichen Stellen beginnen.

Diese Werte eignen sich sehr gut, wie in Abschnitt 8.3 erwähnt, um die Exaktheit der Karte außerhalb von Kreuzungen zu beurteilen, allerdings nicht zur Beurteilung der Topologie, also den Beziehungen zwischen den Fahrstreifen. Hierfür ist die Beurteilung möglicher Fahrstreifenwechsel aussagekräftiger. Die Auswertung zeigt hier, dass für nur 790 m Fahrstreifenlänge der insgesamt 63 km Gesamtlänge an Fahrstreifen, wo Fahrstreifenwechsel möglich sind, keine Entsprechung in der Referenzkarte gefunden werden konnte. Umgekehrt konnte aber für 5,3 km Fahrstreifenlänge in der Referenzkarte keine Entsprechung in der automatisch generierten Karte gefunden werden. Der Grund dafür ist, dass die automatisch generierte Karte in Kreuzungen keine Fahrstreifenwechsel zulässt, die Referenzkarte aber in der Regel schon. Nach Abzug der Regionen innerhalb von Kreuzungen verbleiben noch 1,8 km ohne Entsprechung. Diese wiederum lassen sich überwiegend auf die Kartierungsstrategie zurückführen, bei ausweitenden Fahrstreifen einen der beiden Fahrstreifen nur über einen Fahrstreifenwechsel erreichbar zu machen.

Zur Bewertung der interpretierten Verkehrsregeln wurden die Geschwindigkeitsbegrenzungen der generierten Karte mit denen der Referenzkarte verglichen. Auch hierfür wurden die Mittellinien der Fahrstreifen der Referenzkarte

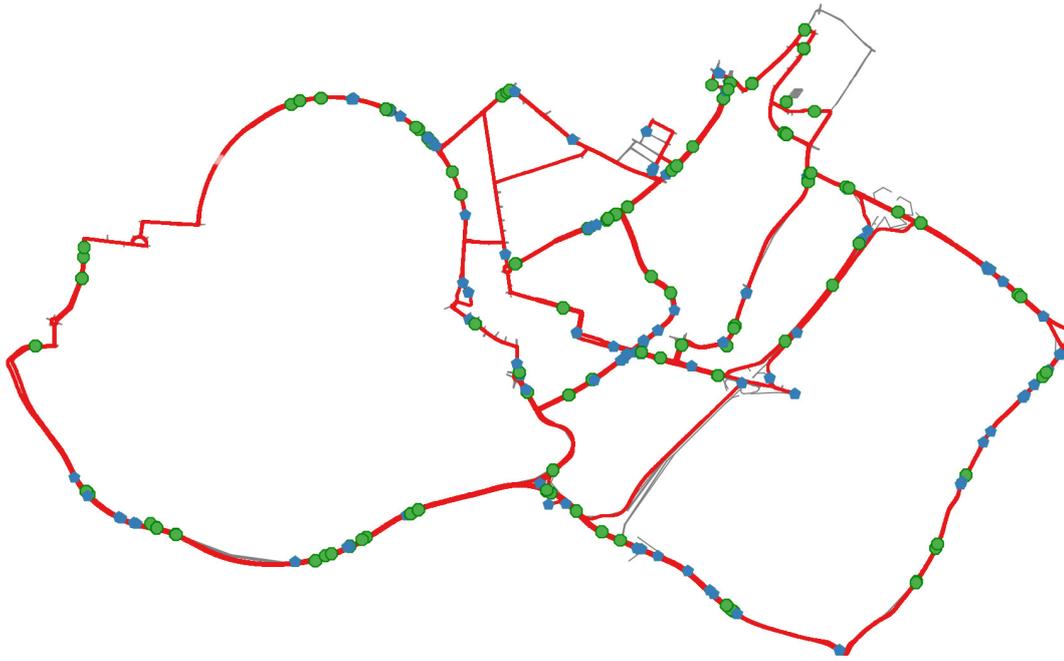


Abbildung 8.5: Überblick über die geprüften, zufällig gewählten Routen. Startpunkte in blau, Zielpunkte in grün, geprüfte Strecke rot, nicht abgedeckte Strecken grau.

in 1 m Abstand gerastert und eine Mittellinie in der Referenzkarte gesucht, welche dieselbe Geschwindigkeitsbegrenzung aufweist. Die Ergebnisse sind in Tab. 8.2 dargestellt.

Bei der Untersuchung der Ergebnisse zeigte sich, dass in der Referenzkarte die Verkehrsregeln weniger fein aufgelöst wurden als durch das hier beschriebene Verfahren. Wenn eine Geschwindigkeitsbegrenzung beispielsweise beim Verlassen der Innenstadt durch eine Ortstafel beendet wird und erst kurz darauf eine neue Geschwindigkeitsbegrenzung ausgesprochen wird, ergibt sich dazwischen ein kurzer Bereich, in dem die Geschwindigkeit der maximal erlaubten Geschwindigkeit außerorts, also 100 km/h, entspricht. In der Referenzkarte wurde das jedoch meistens ausgespart und direkt die neue Geschwindigkeitsbegrenzung hinterlegt. Dadurch ergeben sich immer einige hundert Meter Abweichung, welche sich zusätzlich noch mit der Anzahl der Fahrstreifen dieser Straße multipliziert. So erklärt sich die vergleichsweise geringe Übereinstimmung bei der Geschwindigkeit 100 km/h. Bei Ausfahrten wurde außerdem oft die Geschwindigkeitsbegrenzung beibehalten, obwohl die StVO hier eigentlich regelt, dass das nicht der Fall ist (StVO §7a Abs. 1). Zusätzlich mussten noch einige Kartierungsfehler in der Referenzkarte behoben werden, etwa eine nicht kartierte Tempo-30-Zone.

Die Untersuchung der Ergebnisse zeigte außerdem eine Abweichung in der automatisch generierten Karte, nämlich an einer Straße mit Geschwindigkeitsbegrenzung 30 km/h, welche eine Vorfahrtsstraße kreuzt. Gemäß den in Kap. 7.2.2 aufgestellten Regeln ist die Begrenzung auch nach der Kreuzung noch gültig, da die Straße hier ja nicht endet. Das Schild wird nach der Kreuzung mit der Vorfahrtsstraße nicht mehr wiederholt und auch die Gegenrichtung enthält kein solches Schild, was darauf hindeutet, dass nicht beabsichtigt ist, dass die Begrenzung noch besteht. Möglicherweise muss die verwendete Interpretation einer „Strecke“ dahingehend erweitert werden, dass auch eine Kreuzung mit Vorfahrtsstraßen eine Strecke beendet. Da nur ein solcher Fall im Evaluationsdatensatz auftritt und auch die betrachtete Literatur zum Verkehrsrecht nicht darauf eingeht, kann dies nicht abschließend geklärt werden. Alle übrigen Abweichungen aus Tab. 8.2 können durch Ungenauigkeiten bei dem genauen Beginn des Geltungsbereiches erklärt werden.

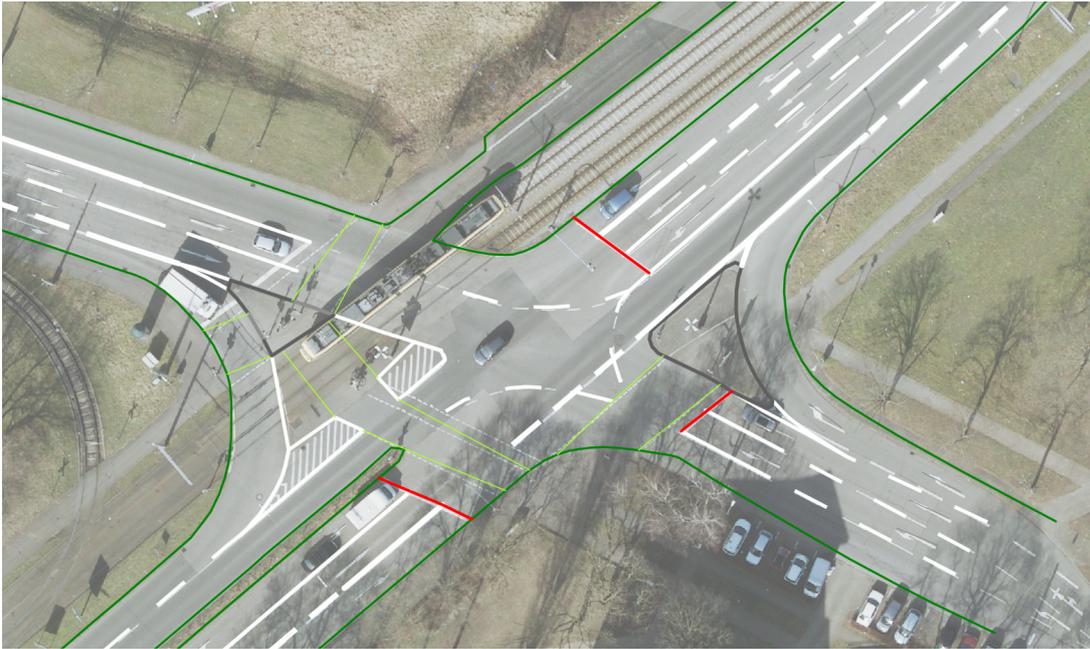


Abbildung 8.6: Durch gesondert herausführende Straße fehlerhaft kartierte Kreuzung. Quelle Luftbild: Stadt Karlsruhe, Lizenz: dl-de/by-2-0.

Um schließlich die Auswirkungen der Unterschiede zwischen den Karten auf die Wegfindung als Ganzes beurteilen zu können, wurden in den beiden Karten 100 kürzeste Pfade zwischen zufällig ausgewählten Start- und Zielpunkten ermittelt. Dafür wurden jeweils 50 Start- und Zielfahrstreifen in der Referenzkarte und 50 in der automatisch generierten Karte zufällig ausgewählt, welche außerhalb von Kreuzungen lagen und eindeutig einem Fahrstreifen in der anderen Karte zugeordnet werden konnten. Für diese Start- und Zielfahrstreifen wurde mithilfe von *Lanelet2* in beiden Karten ein kürzester Pfad bestimmt und bewertet, ob diese beiden Pfade identisch sind.

Bei einem ersten Durchgang stellte sich heraus, dass in der Referenzkarte an einigen großen Kreuzungen Abbiegemöglichkeiten nicht kartiert waren. Darum waren nur 52% der Pfade gemäß der in Abschnitt 8.3 vorgestellten Methode äquivalent. Da die Kreuzungen mitten im kartierten Gebiet lagen, beeinflussten sie die Wegfindung sehr stark. Nachdem diese Kartierungsfehler korrigiert waren, wurden 98 der 100 der Pfade als identisch bewertet. Die Korrekturen sind in den obigen Zahlen bereits berücksichtigt.

Bei den beiden verbleibenden Pfaden handelte es sich einmal um einen Pfad, bei dem eine in der Referenzkarte enthaltene Wendemöglichkeit im Kreisverkehr genutzt werden konnte, weswegen ein kürzerer Pfad gefunden wurde als in der automatisch generierten Karte. Weil bei der automatischen Kartengenerierung der gesamte Kreisverkehr als eine Kreuzung betrachtet wurde und Wendemöglichkeiten bei der Kartengenerierung nicht betrachtet werden, fehlte ein entsprechender Pfad in der automatisch generierten Karte. Für die zweite Abweichung war eine fehlende Abbiegemöglichkeit in einer Kreuzung (siehe Abb. 8.6) verantwortlich. Hier verläuft eine schmale, durch einen Gleiskörper abgetrennte Straße jenseits der eigentlichen Kreuzung (im Bild oberhalb davon), teilt sich aber den Kreuzungsbereich mit dieser. Weil alle einmündenden Fahrstreifen der Kreuzung Pfeile haben und diese eindeutig nicht zu dieser Straße zeigen, folgte bei der Kartengenerierung daraus, dass die Straße nicht in dieser Richtung für Fahrzeuge befahrbar sein kann, sodass letztlich ein anderer Pfad gewählt wurde.

Diese Situation stellt einen der wenigen und unwahrscheinlichen Fälle dar, wo die Abweichung nicht durch Plausibilisierung der Karte gefunden werden konnte. Ein Konflikt hätte sich nur ergeben, wenn im weiteren Verlauf der Straße beispielsweise ein Schild gestanden hätte, das darauf schließen ließ, dass die Straße doch in dieser Richtung

befahrbar ist. Weil es bis zur nächsten Kreuzung kein solches Schild gibt, kam es auch nicht zu einem solchen Konflikt.

Eine technische Lösung für dieses Problem ist sehr schwierig, weil die Kreuzungsflächen zwischen dieser Straße und der angrenzenden größeren Kreuzung ungewöhnlich verwoben sind und damit nicht zu A6 passen, dass alle Kreuzungsflächen zumindest so separat sind, dass sie eindeutig voneinander getrennt werden können. Ein solcher Fall trat aber nur einmal in betrachteten Straßengebiet auf.

Zusammenfassend ließ sich mit Ausnahme dieses Sonderfalls kein Fehler in der automatisch generierten Karte nachweisen. Da die geometrische Form der Eingangsdaten nicht verändert, sondern als Teil der Fahrstreifengeometrie übernommen wird, entspricht die räumliche Genauigkeit der Karte der Genauigkeit der Eingangsdaten. Sofern diese die Genauigkeitsanforderungen für automatisierte Fahrzeuge erfüllen, ist die generierte Karte demzufolge gemäß der in Kap. 3.4 getroffenen Anforderungen für das automatisierte Fahren geeignet.

Zusätzlich zu den in der obigen Evaluation betrachteten Kreuzungen wurden aber noch einige komplexe Kreuzungen korrekt gelöst, welche im Evaluationsdatensatz gar nicht oder nicht mit allen Armen enthalten waren. Einige davon sind in Abb. 8.7 dargestellt, um dem Leser die Gelegenheit zu geben, sich einen Eindruck zu verschaffen. Um die möglichen Fahrtrichtungen besser verständlich zu machen, wurden die Fahrstreifen gemäß ihrer Richtung eingefärbt. Dabei ist es unvermeidlich, dass bei abzweigenden Fahrstreifen unterschiedliche Farben in aufeinander folgenden Fahrstreifen verwendet werden. Daher haben abzweigende Fahrstreifen dort immer die Farbe der Fahrbahn, in die sie einmünden.

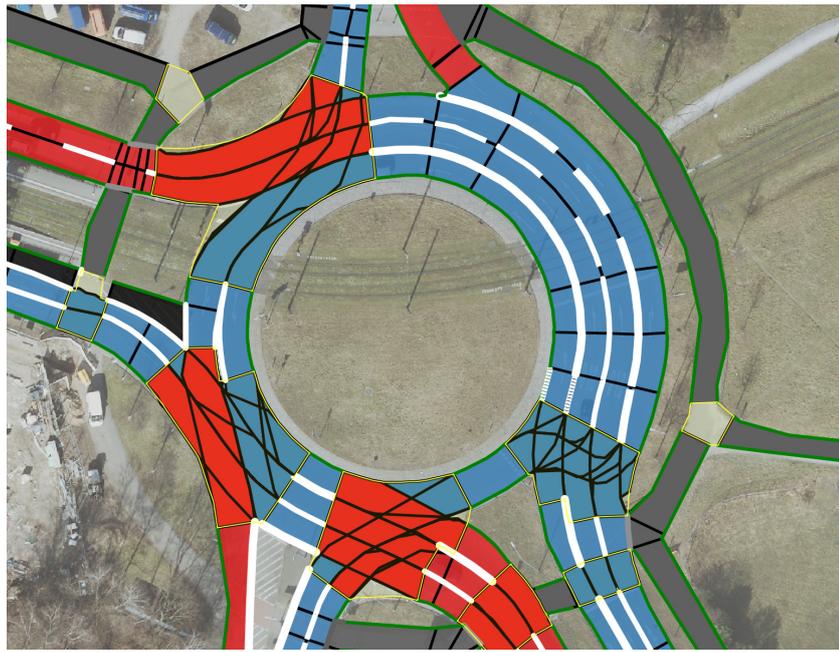
In den Abbildungen ist zunächst eine Gruppe von Kreuzungen (kein Kreisverkehr) in der Oststadt Karlsruhes dargestellt, welcher in Karlsruhe für überdurchschnittlich hohe Unfallraten bekannt ist (Abb. 8.7a). Dafür verantwortlich ist die dichte Abfolge der Kreuzungen auf engem Raum in Kombination mit einer sehr unerwarteten Führung der Fahrstreifen. Abb. 8.7b zeigt ebenfalls eine Art Kreisverkehr, nämlich den in Abb. 1.1 eingangs dieser Arbeit gezeigten, welcher sich besonders durch die ungewöhnliche Verkehrsführung mit Fahrstreifen für den Geradeausverkehr in der Mitte des Kreises, Ampeln, sowie einen für den Fahrzeugverkehr gesperrten Abschnitt für Straßenbahnen zwischen den Fahrstreifen auszeichnet.

Abb. 8.7c zeigt eine innerstädtische Region mit Kreisverkehr, der dieses Mal auch als solcher beschildert ist, welcher wegen der teilweise bidirektionalen einmündenden Fahrstreifen sowie den vielen Kreuzungen auf kleinem Raum eine Herausforderung für die Kartengenerierung darstellt.

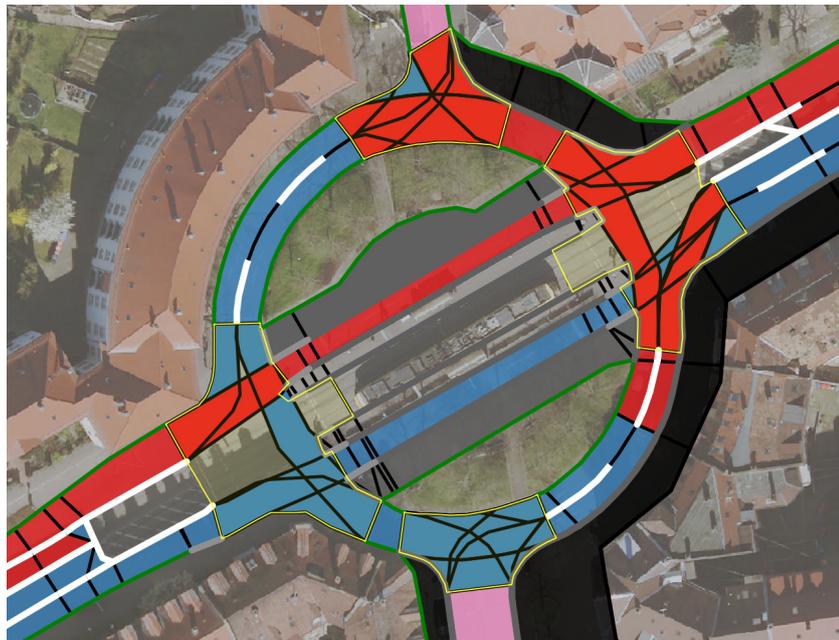
Konträr zeigt Abb. 8.7d einen Ausschnitt der kartierten Autobahnstrecke. Auch wenn die Anzahl der Fahrstreifen das Problem komplex erscheinen lässt, ist der vorausgegangene Kreisverkehr wegen der vielen sich kreuzenden Straßen die größere Herausforderung. Auf Autobahnen gibt es dagegen keine derartigen Kreuzungen, weil einmündende Fahrstreifen stets über einen separaten Beschleunigungsstreifen auf die Autobahn geleitet werden.

Abb. 8.7e zeigt zwei Kreuzungen, die zusammen mit der in Abb. 6.8 links dargestellten Kreuzung zu den größten des Datensatzes gehören. An der linken Kreuzung sind insgesamt 23 angrenzende Fahrstreifen beteiligt, was die Betrachtung der möglichen Lösungen kombinatorisch sehr komplex werden lässt. Abb. 8.7f schließlich zeigt die generierte Kreuzung, die unter Zuhilfenahme der in Abb. 8.4 dargestellten Anpassungen in den Eingangsdaten entstanden ist.

(a) „Oststadtkreisel“, Kreuzungen zwischen Ludwig-Erhard-Allee, Stuttgarter Str. und Wolfartsweiherer Str.



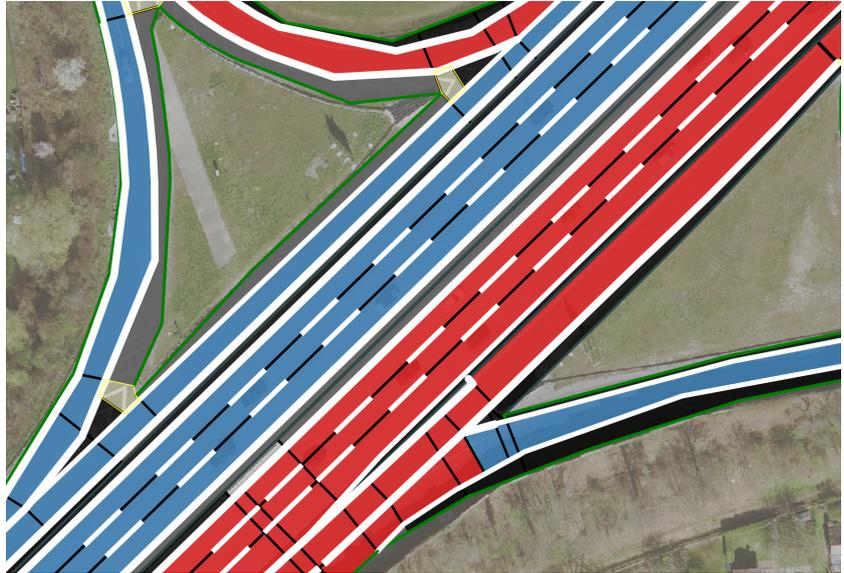
(b) Karl-Wilhelm-Platz, Karlsruhe Oststadt



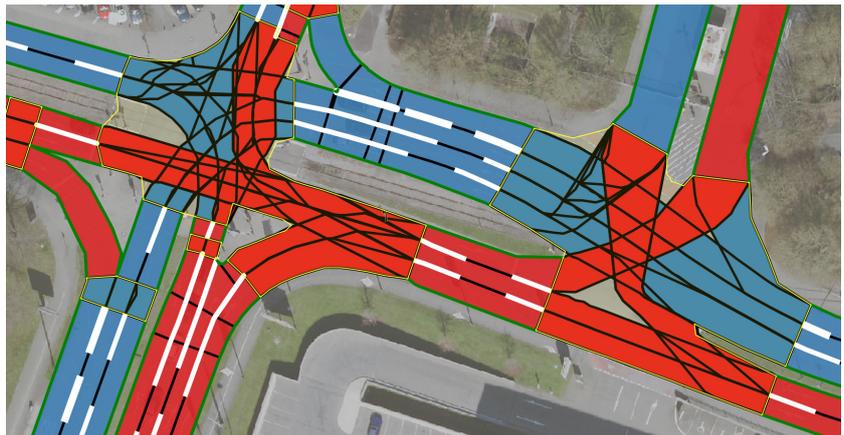
(c) Kreisverkehr im Stadtteil Hagsfeld zwischen Brückenstr., Karlsruher Str., Schwetzingen Str.



(d) Ausschnitt der Autobahnausfahrt
Karlsruhe-Durlach der A5



(e) Kreuzung zwischen Gerwigstr.
und Weinweg (u.a.)



(f) Kreuzungen zwischen Kriegsstr.,
Wilhelm-Baur-Str. und Wichernstr.

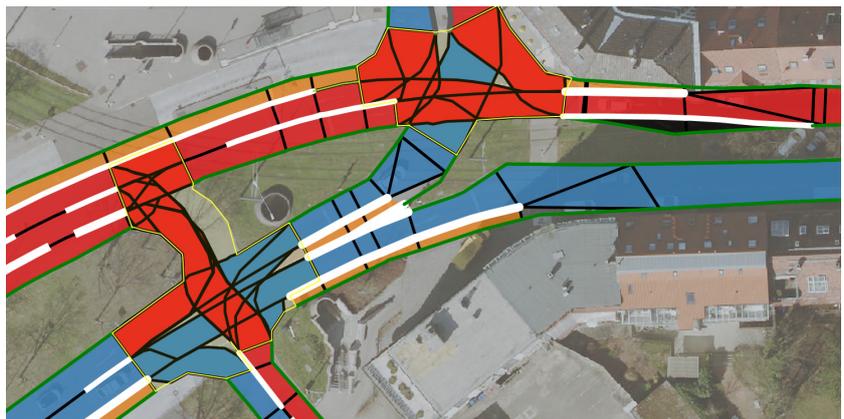


Abbildung 8.7: Ergebnisse aus der Kartengenerierung. Unterschiedliche Fahrrichtungen sind blau, bzw. rot eingefärbt. Violette Fahrstreifen sind bidirektional, nicht befahrbare schwarz. Quelle Luftbilder: Stadt Karlsruhe, Lizenz: dl-de/by-2-0.

9 Schlussbetrachtung und Ausblick

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Methoden vorgestellt, welche für die Entwicklung eines Expertensystems geeignet sind, das aus gut beobachtbaren Merkmalen wie Markierungen, Straßenrändern und Verkehrsschildern Karten für das automatisierte Fahren automatisch generiert und das Ergebnis dabei weitgehend selbst plausibilisieren kann. Die Erzeugung der Fahrstreifen in der generierten Karte erfolgt modellfrei und ist in ihrer Genauigkeit prinzipiell allein an die Genauigkeit der Eingangsdaten gebunden. Eine Analyse der vorhandenen Literatur hat dabei gezeigt, dass die benötigten Eingangsdaten für das Verfahren mit dem heutigen Stand der Technik weitgehend zuverlässig detektiert werden können.

Das entwickelte Verfahren besteht aus drei Stufen. Zunächst wird unter der Annahme von vollständigem Wissen über die beobachtbaren Merkmale einer Straße die Position möglicher Fahrstreifen bestimmt. Im nächsten Schritt werden iterativ die Eigenschaften der möglichen Fahrstreifen bestimmt: Die Verkehrsteilnehmer, die sich darauf bewegen, und die Verkehrsrichtungen. Mit diesem Wissen kann dann mit einer Kombination geometrischer Methoden und logischen Schließens der Verlauf von Fahrstreifen innerhalb von Kreuzungen ermittelt werden. So können auch in Regionen bislang unvollständigen Wissens die Eigenschaften der Fahrstreifen bestimmt werden. Dies geschieht in einem iterativen Verfahren. In einem letzten Schritt werden weitere Verkehrsregeln mit den Fahrstreifen assoziiert, insbesondere Vorfahrtsbestimmungen, Verkehrsampeln und Geschwindigkeitsbeschränkungen.

Die nach dieser Methode erzeugten Karten entsprechen den in Kap. 3 gestellten Anforderungen an die Beschaffenheit einer Karte für automatisierte Fahrzeuge, denen zufolge Fahrstreifenabschnitte das zentrale Element bilden sollten. Mit diesen Fahrstreifenabschnitten sind die Informationen verknüpft, mit denen Fahrzeuge während der Fahrt die relevanten Verkehrsregeln und mögliche Manöver für sich selbst und andere Fahrzeuge ableiten können. Von der Sensorik beobachtete Informationen können durch den Abgleich mit der Karte zur Validierung genutzt werden.

Bei dem Test des Verfahrens mit Realdaten hat sich gezeigt, dass die Annahmen, welche über die Beschaffenheit der Straße getroffen wurden, ausreichend generisch für die großflächige Anwendung auf Straßennetze sind. Aufgrund der Fähigkeit, im Laufe der Anwendung des Verfahrens Konflikte, Widersprüche und Mehrdeutigkeiten erkennen und so den Kartengenerierungsprozess selbst plausibilisieren zu können, wies die Topologie der generierten Karte weniger Kartierungsfehler auf als die einer weitgehend von Menschen erzeugten, kommerziellen Vergleichskarte.

Dies zeigt, wie wichtig es ist, bei der Generierung von Karten einen hohen Automatisierungsgrad zu erreichen. Wegen der sicherheitskritischen Relevanz von Kartenmaterial für automatisierte Fahrzeuge sind von Menschen erstellte Karten viel zu fehlerbehaftet und unsicher, insbesondere innerhalb großer Kreuzungen. Einige Kreuzungen im Datensatz enthielten über 25 Verbindungen zwischen den angrenzenden Fahrstreifen. Das sind zu viele, um für Menschen überschaubar zu sein. Allein schon eine überschaubare Visualisierung aller Verbindungen fällt schwer.

Somit leistet diese Arbeit einen Beitrag zu einer wichtigen offenen Fragestellung für das Automatisierte Fahren, nämlich wie beobachtete Informationen in einen höheren, abstrakteren Kontext eingeordnet, also *verstanden*, werden können. Denn nur so können daraus sichere Handlungsentscheidungen für ein Fahrzeug abgeleitet werden. Bisher bekannte Verfahren setzen hierfür entweder einen in der Praxis kaum erreichbaren Grad der Vorverarbeitung der Eingangsdaten voraus, waren nicht generisch genug oder konnten Karteninformationen nicht detailliert genug inferieren.

Mit der in letzter Zeit stark verbesserten Qualität von Detektionsverfahren bekommt dieses Thema aber eine neue Relevanz und könnte sich zu einem Schwerpunkt in diesem Forschungsgebiet entwickeln. Diese Arbeit wird dafür noch längst nicht das Ende der Forschung markieren. Es muss sich erst noch zeigen, welche weiteren Informationen über die statische Umgebung ein Fahrzeug für sicheres automatisches Fahren benötigt. Die Kartengenerierung für andere Länder oder andere Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger oder Fahrradfahrer wurde in dieser Arbeit nur oberflächlich betrachtet. Auch für Sondermanöver wie Parken und Halten werden mit der weiteren Entwicklung der Fähigkeiten eines automatisierten Fahrzeugs neue Anforderungen an das Kartenmaterial entstehen. Es besteht jedoch durchaus Anlass zur Annahme, dass sich diese Informationen einfach in das hier vorgestellte Verfahren integrieren lassen. Dafür spricht die in sich abgeschlossene Konzeption der einzelnen Verarbeitungsschritte und die explizite Formulierung der zur Inferenz eingesetzten Regeln, welche eine einfache Erweiterbarkeit erlaubt.

Eine Herausforderung für zukünftige Arbeiten zum Verstehen von Straßenszenen ist die Berücksichtigung von Verkehrsregeln, mit denen alle Handlungen eines automatisierten Fahrzeugs in Einklang stehen müssen. Wie sich in dieser Arbeit gezeigt hat, sind Verkehrsregelwerke wie die Straßenverkehrsordnung in ihrer aktuellen Form für automatisierte Fahrzeuge nur bedingt hilfreich, weil sie zentrale Begriffe, wie die genaue Definition eines Fahrstreifens, und etliche Sonderfälle nicht klären und deren Interpretation den Verkehrsteilnehmern und letztlich Gerichten überlassen. Für automatisierte Fahrzeuge wären Richtlinien erforderlich, die sich deutlich eindeutiger in Verhaltensregeln und schließlich Handlungsanweisungen für Fahrzeuge überführen lassen.

Ähnliches gilt auch für Verkehrszeichen, deren Zweck es letztlich ist, Verkehrsteilnehmern diese Handlungsanweisungen zu vermitteln, sodass ihnen klar ist, welches Verhalten an einer bestimmten Stelle erwartet wird und was nicht erlaubt ist. Solange von menschlichen Teilnehmern ausgegangen werden kann, mag es ausreichen, dass sich diese fehlende oder unklare Informationen aus dem Kontext oder mithilfe von Vorwissen erschließen. Von Maschinen kann aber kaum mehr erwartet werden, als dass sie ein Schild oder den Verlauf der Fahrstreifen dafür zu Hilfe nehmen. Dass sie beispielsweise, wie Menschen es mitunter tun, die Ausrichtung parkender Fahrzeuge zu Hilfe nehmen, um zu erkennen, ob es sich bei einem Kreuzungsarm um eine Einbahnstraße handelt, kann kaum eine geeignete Lösung darstellen. Selbst wenn die Technik hierfür jemals so weit sein sollte, ist es fraglich, ob derart unsichere Informationen wirklich eine Grundlage für die Entscheidungsfindung automatisierter Fahrzeuge bilden sollten.

Auch bei der Gestaltung der Straßeninfrastruktur kann das hier vorgestellte Verfahren also eine Hilfe sein, denn es ließe sich damit analysieren, ob ein bestimmter Straßenabschnitt bei Kenntnis der regelgebenden Elemente maschinell vollständig verstanden werden kann. Konflikte oder Mehrdeutigkeiten deuten darauf hin, dass die Gestaltung fehlerhaft ist. Eine Umgestaltung oder Präzisierung durch zusätzliche Schilder würde dann vermutlich auch für Menschen die Verkehrssicherheit erhöhen. Ein nächster Schritt könnte darin bestehen, einzelne regelgebende Elemente zufällig zu verfälschen, um zu prüfen, wie dabei Interpretation degradiert. So könnte sogar ein Maß für die Robustheit abgeleitet werden.

Schließlich sollte die Straßeninfrastruktur idealerweise so redundant gestaltet sein, dass gelegentliche Sensorfehler oder Verdeckungen eben nicht zu kritischen Fehlinterpretationen der Verkehrssituation führen, nur weil beispielsweise ein einzelnes Schild nicht erkannt wurde.

Zusammenfassend zeigt die vorliegende Arbeit, dass es möglich und sinnvoll ist, ein maschinelles Verständnis der statischen Straßenszene in einem Detailgrad zu erreichen, der für das automatisierte Fahren in komplexen Szenarien benötigt wird. Um die benötigte Sicherheit und Zuverlässigkeit der automatisierten Systeme zu erreichen, sind jedoch nicht nur technische Fortschritte erforderlich, sondern auch eine gewissenhaftere, auf Eindeutigkeit achtgebende Gestaltung der Infrastruktur sowie eine präzisere Gesetzgebung, welche weniger Spielraum bei der Antwort auf die Frage lässt, welches Verhalten genau von automatisierten Fahrzeugen erwartet wird.

Literaturverzeichnis

- [AGV17] ARTUÑEDO, A. ; GODOY, J. ; VILLAGRA, J.: Smooth path planning for urban autonomous driving using OpenStreetMaps. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2017, S. 837–842
- [ARB⁺15] AEBERHARD, M. ; RAUCH, S. ; BAHRAM, M. ; TANZMEISTER, G. ; THOMAS, J. ; PILAT, Y. ; HOMM, F. ; HUBER, W. ; KAEMPCHEN, N.: Experience, results and lessons learned from automated driving on Germany's highways. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 7 (2015), S. 42–57. <http://dx.doi.org/10.1109/MITS.2014.2360306>. – DOI 10.1109/MITS.2014.2360306
- [BHLLR14] BAR HILLEL, A. ; LERNER, R. ; LEVI, D. ; RAZ, G.: Recent progress in road and lane detection: a survey. In: *Machine Vision and Applications* 25 (2014), Nr. 3, S. 727–745. <http://dx.doi.org/10.1007/s00138-011-0404-2>. – DOI 10.1007/s00138-011-0404-2
- [BKFC07] BRAITMAN, K. A. ; KIRLEY, B. B. ; FERGUSON, S. ; CHAUDHARY, N. K.: Factors leading to older drivers' intersection crashes. In: *Traffic Injury Prevention* 8 (2007), Nr. 3, S. 267–274. <http://dx.doi.org/10.1080/15389580701272346>. – DOI 10.1080/15389580701272346
- [BLR⁺17] BAILO, O. ; LEE, S. ; RAMEAU, F. ; YOON, J. S. ; KWEON, I. S.: Robust road marking detection and recognition using density-based grouping and machine learning techniques. In: *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2017, S. 760–768
- [BLSI16] BARBIER, M. ; LAUGIER, C. ; SIMONIN, O. ; IBAÑEZ-GUZMÁN, J.: Functional discretization of space using Gaussian processes for road intersection crossing. In: *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2016, S. 156–162
- [BRWZ17] BITTEL, S. ; REHFELD, T. ; WEBER, M. ; ZÖLLNER, J. M.: Estimating high definition map parameters with convolutional neural networks. In: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2017, S. 52–56
- [BS14] BECK, J. ; STILLER, C.: Non-parametric lane estimation in urban environments. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, 2014, S. 43–48
- [BSM⁺99] BAUMGARTNER, A. ; STEGER, C. ; MAYER, H. ; ECKSTEIN, W. ; EBNER, H.: Automatic road extraction based on multi-scale, grouping, and context. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 65 (1999), S. 777–786
- [BZS14] BENDER, P. ; ZIEGLER, J. ; STILLER, C.: Lanelets: efficient map representation for autonomous driving. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, 2014, S. 420–425
- [CBSW19] CALTAGIRONE, L. ; BELLONE, M. ; SVENSSON, L. ; WAHDE, M.: LIDAR -- camera fusion for road detection using fully convolutional neural networks. In: *Robotics and Autonomous Systems* 111 (2019), S. 125–131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2018.11.002>. – DOI 10.1016/j.robot.2018.11.002
- [CC17] CHEN, Zhe ; CHEN, Zijing: RBNNet: A Deep Neural Network for Unified Road and Road Boundary Detection. In: *Neural Information Processing*. Cham : Springer International Publishing, 2017, S. 677–687

- [CG16] COFIELD, R. G. ; GUPTA, R.: Reactive trajectory planning and tracking for pedestrian-aware autonomous driving in urban environments. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2016, S. 747–754
- [COR16] CORDTS, M. ; OMRAN, M. ; RAMOS, S.: The cityscapes dataset for semantic urban scene understanding. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, S. 3213–3223
- [FH16] FANKHAUSER, Péter ; HUTTER, Marco: A Universal Grid Map Library: Implementation and Use Case for Rough Terrain Navigation. Version: 2016. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-26054-9_5. In: *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference (Volume 1)*. Cham : Springer International Publishing, 2016. – DOI 10.1007/978-3-319-26054-9_5, 99–120
- [For80] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN: *Richtlinien für die Markierung von Straßen*. Bd. 330/2. Köln : FSG-Verlag, 1980
- [For86] FORTUNE, S: A sweepline algorithm for voronoi diagrams. In: *Proceedings of the Second Annual Symposium on Computational Geometry*, 1986, S. 313–322
- [For15] FORSA GESELLSCHAFT FÜR SOZIALFORSCHUNG UND STATISTISCHE ANALYSEN MBH: *Deutschland mobil 2015*. <https://static01.cosmosdirekt.de/CosmosCAE/S/linkableblob/home/125498.1445327719000/data/falschfahrer-noindex-data.pdf>. Version: 2015. – Abgerufen am 26.04.2019
- [FZL⁺18] FAN, H. ; ZHU, F. ; LIU, C. ; ZHANG, L. ; ZHUANG, L. ; LI, D. ; ZHU, W. ; HU, J. ; LI, H. ; KONG, Q.: Baidu Apollo EM motion planner. In: *CoRR* (2018). <http://arxiv.org/abs/1807.08048>. – Abgerufen am 26.04.2019
- [Gei13] GEIGER, A.: *Probabilistic models for 3d urban scene understanding from movable platforms*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Mess- und Regelungstechnik, Diss., 2013
- [GZYK17] GU, S. ; ZHANG, Y. ; YANG, J. ; KONG, H.: Lidar-based urban road detection by histograms of normalized inverse depths and line scanning. In: *European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, 2017, S. 1–6
- [Hak10] HAKLAY, M.: How good is volunteered geographical information? A comparative study of openstreet-map and ordnance survey datasets. In: *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 37 (2010), Nr. 4, S. 682–703. <http://dx.doi.org/10.1068/b35097>. – DOI 10.1068/b35097
- [HER19] HERE: *HERE HD Live Map – on the road towards autonomous driving*. Version: 2019. <https://www.here.com/products/automotive/hd-maps> Abgerufen am 26.04.2019
- [HRL15] HARMS, H. ; REHDER, E. ; LAUER, M.: Grid map based free-space estimation using stereovision. In: *Proc. Workshop Environment Perception Automated On-road Vehicles, IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2015
- [Hum09] HUMMEL, B.: *Description logic for scene understanding at the example of urban road intersections*. Saarbrücken: Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Mess- und Regelungstechnik, Diss., 2009
- [HW08] HAKLAY, M. ; WEBER, P.: OpenStreetMap: user-generated street maps. In: *IEEE Pervasive Computing* 7 (2008), Nr. 4, S. 12–18. <http://dx.doi.org/10.1109/MPRV.2008.80>. – DOI 10.1109/MPRV.2008.80
- [J3018] Norm J3016 Juni 2018. *Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles*
- [JPM⁺16] JENSEN, M. B. ; PHILIPSEN, M. P. ; MØGELMOSE, A. ; MOESLUND, T. B. ; TRIVEDI, M. M.: Vision for looking at traffic lights: issues, survey, and perspectives. In: *IEEE Transactions on Intelligent*

- Transportation Systems* 17 (2016), Nr. 7, S. 1800–1815. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2015.2509509>. – DOI 10.1109/TITS.2015.2509509
- [KD13] KÖNIG, P. ; DAUER, P. ; FLOEGEL, J. (Hrsg.) ; HARTUNG, F. (Hrsg.) ; JAGUSCH, H. (Hrsg.) ; HENTSCHEL, P. (Hrsg.): *Straßenverkehrsrecht*. 42. Auflage. München : C.H.Beck, 2013 (Becksche Kurz-Kommentare). – ISBN 9783406643729
- [Kjæ13] KJÆRULFF, U. B. ; MADSEN, A. L. (Hrsg.): *Bayesian Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis*. New York : Springer, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-5104-4>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-5104-4>. – ISBN 978-1-4614-5103-7
- [KSB16] KUNTZSCH, C. ; SESTER, M. ; BRENNER, C.: Generative models for road network reconstruction. In: *International Journal of Geographical Information Science* 30 (2016), Nr. 5, S. 1012–1039. <http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2015.1092151>. – DOI 10.1080/13658816.2015.1092151
- [LBI17] LI, F. ; BONNIFAIT, P. ; IBANEZ-GUZMAN, J.: Estimating localization uncertainty using multi-hypothesis map-matching on high-definition road maps. In: *IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2017, S. 1–6
- [LYWW18] LIU, P. ; YANG, M. ; WANG, C. ; WANG, B.: Multi-lane detection via multi-task network in various road scenes. In: *Chinese Automation Congress (CAC)*, 2018, S. 2750–2755
- [MBB08] MONTEMERLO, M. ; BECKER, J. ; B. ET AL., Suhrid: Junior: The Stanford entry in the Urban Challenge. In: *Journal of Field Robotics* 25 (2008), Nr. 9, S. 569–597. <http://dx.doi.org/10.1002/rob.20258>. – DOI 10.1002/rob.20258
- [MNP15] MATHIBELA, B. ; NEWMAN, P. ; POSNER, I.: Reading the road: road marking classification and interpretation. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16 (2015), Nr. 4, S. 2072–2081. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2015.2393715>. – DOI 10.1109/TITS.2015.2393715
- [MSOS18] MEYER, A. ; SALSCHIEDER, N. O. ; ORZECZOWSKI, P. F. ; STILLER, C.: Deep semantic lane segmentation for mapless driving. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018, S. 869–875
- [MTM12] MOGELMOSE, A. ; TRIVEDI, M. M. ; MOESLUND, T. B.: Vision-based traffic sign detection and analysis for intelligent driver assistance systems: perspectives and survey. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13 (2012), Nr. 4, S. 1484–1497. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2012.2209421>. – DOI 10.1109/TITS.2012.2209421
- [MWFU16] MÁTTYUS, G. ; WANG, S. ; FIDLER, S. ; URTASUN, R.: HD maps: fine-grained road segmentation by parsing ground and aerial images. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, S. 3611–3619
- [MWG⁺16] MARMANIS, D. ; WEGNER, J. D. ; GALLIANI, S. ; SCHINDLER, K. ; DATCU, M. ; STILLA, U.: Semantic segmentation of aerial images with an ensemble of CNNs. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences III-3* (2016), S. 473–480. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-473-2016>. – DOI 10.5194/isprs-annals-III-3-473-2016
- [RBP⁺17] RUHAMMER, C. ; BAUMANN, M. ; PROTSCHKY, V. ; KLOEDEN, H. ; KLANNER, F. ; STILLER, C.: Automated intersection mapping from crowd trajectory data. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 18 (2017), Nr. 3, S. 666–677. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2016.2585518>. – DOI 10.1109/TITS.2016.2585518
- [Sch13] SCHINDLER, A.: *Vehicle self-localization using high-precision digital maps*. Aachen: Shaker Verlag, Universität Passau, Fakultät für Informatik, Diss., 2013

- [She16] SHERRAH, J.: Fully convolutional networks for dense semantic labelling of high-resolution aerial imagery. In: *CoRR* (2016). <http://arxiv.org/abs/1606.02585>. – Abgerufen am 26.04.2019
- [SKF13] SCHREIBER, M. ; KNÖPPEL, C. ; FRANKE, U.: LaneLoc: lane marking based localization using highly accurate maps. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2013, S. 449–454
- [SMA⁺17] SENARATNE, H. ; MOBASHERI, A. ; ALI, A. L. ; CAPINERI, C. ; HAKLAY, M.: A review of volunteered geographic information quality assessment methods. In: *International Journal of Geographical Information Science* 31 (2017), Nr. 1, S. 139–167. <http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2016.1189556>. – DOI 10.1080/13658816.2016.1189556
- [Sta10] STAUBACH, M.: *Identifikation menschlicher Einflüsse auf Verkehrsunfälle als Grundlage zur Beurteilung von Fahrerassistenzsystem-Potentialen*. Saarbrücken: Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, Technische Universität Dresden, Diss., 2010
- [SVP19] SINDHU, O. S. S. V. ; VICTER PAUL, P.: Computer vision model for traffic sign recognition and detection – a survey. In: KUMAR, A. (Hrsg.) ; MOZAR, S. (Hrsg.): *ICCCE 2018*. Singapore : Springer Singapore, 2019, S. 679–689
- [TMD06] THRUN, S. ; MONTEMERLO, M. ; DAHLKAMP, H. ; et. al.: Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. In: *Journal of Field Robotics* 23 (2006), Nr. 9, S. 661–692. <http://dx.doi.org/10.1002/rob.20147>. – DOI 10.1002/rob.20147
- [Tom19] TOMTOM: *TomTom HD map with RoadDNA*. <https://automotive.tomtom.com/automotive-solutions/automated-driving/hd-map-roaddna>. Version: 2019. – Abgerufen am 26.04.2019
- [Töp14] TÖPFER, D.: *On compositional hierarchical models for holistic lane and road perception in intelligent vehicles*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Mess- und Regelungstechnik, Diss., 2014. <http://dx.doi.org/10.5445/IR/1000044955>. – DOI 10.5445/IR/1000044955
- [Uni68a] UNITED NATIONS CONFERENCE ON ROAD TRAFFIC: *Übereinkommen über den Straßenverkehr*. 1968
- [Uni68b] UNITED NATIONS CONFERENCE ON ROAD TRAFFIC: *Übereinkommen über Strassenverkehrszeichen*. 1968
- [VBC⁺18] VIVACQUA, R. P. D. ; BERTOZZI, M. ; CERRI, P. ; MARTINS, F. N. ; VASSALLO, R. F.: Self-localization based on visual lane marking maps: an accurate low-cost approach for autonomous driving. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 19 (2018), Nr. 2, S. 582–597. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2017.2752461>. – DOI 10.1109/TITS.2017.2752461
- [VIR18] VIRES: *OpenDRIVE*. www.opendrive.org/. Version: 2018. – Abgerufen am 26.04.2019
- [VzK17] VzKAT: *Verkehrzeichenkatalog in der Fassung der Bekanntmachung vom 29.05.2017*. Bundesanzeiger AT 29.05.2017 B8, 2017
- [Woo18] WOOD, H.: *1 million map contributors!* <https://blog.openstreetmap.org/2018/03/18/1-million-map-contributors>. Version: 2018. – Abgerufen am 26.04.2019

Eigene Veröffentlichungen

- [1] POGGENHANS, F. ; HELLMUND, A.-M. ; STILLER, C. : Application of line clustering algorithms for improving road feature detection. In: *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2016, S. 2456–2461
- [2] POGGENHANS, F. ; PAULS, J.-H. ; JANOSOVITS, J. ; ORF, S. ; NAUMANN, M. ; KUHN, F. ; MAYR, M. : Lanelet2: a high-definition map framework for the future of automated driving. In: *IEEE 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018, S. 1672–1679
- [3] POGGENHANS, F. ; SALSCHIEDER, N. O. ; STILLER, C. : Precise localization in high-definition road maps for urban regions. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018, S. 2167–2174
- [4] POGGENHANS, F. ; SCHREIBER, M. ; STILLER, C. : A universal approach to detect and classify road surface markings. In: *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2015, S. 1915–1921
- [5] TAŞ, Ö. Ş. ; SALSCHIEDER, N. O. ; POGGENHANS, F. ; WIRGES, S. ; BANDERA, C. ; ZOFKA, M. R. ; STRAUSS, T. ; ZÖLLNER, J. M. ; STILLER, C. : Making Bertha cooperate – Team AnnieWAY’s entry to the 2016 Grand Cooperative Driving Challenge. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 19 (2018), Nr. 4, S. 1262–1276. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2017.2749974>. – DOI 10.1109/TITS.2017.2749974