

Rechnergestützte Erkennung und Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

der Fakultät für Informatik
der Universität Karlsruhe (Technische Hochschule)

genehmigte

Dissertation

von

Klaus Mück

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Juli 2000
Erster Gutachter: Prof. Dr. H.-H. Nagel
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. H. Prautzsch

Meiner Familie

Dank

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H.-H. Nagel, der es verstanden hat, meinen Blick auf Wesentliches zu lenken, unermüdlich auch kurzfristig frühere Fassungen meiner Arbeit zu durchforsten und immer wieder neue Denkanstöße zu geben. Sein Angebot, das Thema meiner Diplomarbeit in einer Promotion fortzuführen, hatte mich überrascht, seine Zuversicht, die Arbeit erfolgreich beenden zu können, hat mein Durchhaltevermögen gestärkt und seine aufrichtige Art in der Begegnung mit mir, hat ihn mir als Mensch näher gebracht.

Herrn Prof. Dr. H. Prautzsch danke ich für seine Bereitschaft, das Korreferat kurzfristig trotz Zeitdruck und eigenen Aufgaben übernommen zu haben. Seine rasche und gründliche Durchsicht meiner Abhandlung erlaubte die Einhaltung der zum Schluss eng gesteckten zeitlichen Rahmenbedingungen zur Beendigung dieser Arbeit.

Auch wenn der Löwenanteil der Arbeit zu Hause stattfand, so war mir jegliche Unterstützung meiner Kollegen Angela Gehrke, Dr. Ralf Gerber, Dr. Michael Haag, Marianne Hardt, Ferit Keçeci, Dr. Henner Kollnig, Dr. Holger Leuck, Markus Middendorf und Thomas Müller jederzeit persönlich, telefonisch oder auch via talk sicher. Ein reger Austausch von Gedanken, Problemen und schließlich (Teil-)Erfolgen ist hierbei für den erfolgreichen Abschluss einer wissenschaftlichen Arbeit unabdingbar. Hier gilt mein besonderer Dank Dr. Michael Haag, mit dem ich viele Probleme im Zusammenhang mit begrifflichen Beschreibungen diskutierte, Ferit Keçeci, der für Besprechungen von Problemlösungen mit Quadriken bereit stand, Dr. Holger Leuck, dessen Bereitschaft zur kurzfristigen Lösung und Diskussion von Problemen aller Art mehr als nur hilfreich waren (insbesondere gilt ihm mein Dank für die äußerst kurzfristige und dennoch sehr genaue Durchsicht meiner Arbeit, obwohl er selbst mit seiner Promotion gehörig unter Zeitdruck war) und nicht zuletzt Markus Middendorf, der mir durch Bereitstellung von Fahrzeug-Trajektorien die Grundlage für die Durchführung meiner Experimente lieferte und damit die praktische Machbarkeit meiner These ermöglichte. Die Betreuung der Diplomarbeit von Michael Fautz während des Anfangsstadiums meiner Arbeit eröffnete mir neue Sichtweisen auf die gegebene Aufgabenstellung ebenso wie die Erfahrungen mit Dr. Karl Schäfers Logik-System F-Limette, die letztlich in einer Vereinfachung der begrifflichen Beschreibung resultierten. Wolfgang Theilmann gilt mein Dank für seinen Mut, den am Rande dieser Arbeit entwickelten grafischen Dienstgeber *Graphity* in seiner Diplomarbeit eingesetzt und als Alpha-Tester gedient zu haben. Ein herzliches Dankeschön richtet sich auch an Ingrid Celustek, Ulla Dietrich, Gabi Kliebe und Gerlinde Szameitat, die immer wieder ein nettes Wort parat hatten und mir hilfreich zur Seite standen.

Diese Arbeit hätte niemals entstehen können, gäbe es nicht die Individuelle Schwerstbehindertenbetreuung (ISB), vornehmlich getragen durch den unermüdlichen Einsatz meiner Zivis und Festangestellten, deren Zahl allein für den Zeitraum meiner Tätigkeit am Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme um die 30 Personen betrug. Ihrer Bereitschaft, meine Rückschläge und Erfolge, meine Höhen und Tiefen vor Ort mitzutragen

sowie vor unüblichen Arbeitseinsätzen zu nachtschlafender Zeit nicht zurückzuschrecken und meine wissenschaftlichen Monologe gelassen zu ertragen („Nicht schon wieder!“), gebührt mein besonderer Dank.

Die Wichtigkeit von Freunden schätzt man vor allem dann, wenn das Leben Überraschungen und Schwierigkeiten bereitstellt. Für privates Leben gab es in der Zeit meiner Promotion wenig Raum. Um so glücklicher bin ich jedoch, dass ich der Unterstützung meiner Freunde trotz der spärlichen Zeit für sie immer sicher sein konnte.

Besondere Unterstützung erhielt ich jedoch von meiner Familie, insbesondere von meinen Eltern. Unermüdlich halfen sie mir bei den kleinen und großen Dingen, die einem im Laufe einer solchen Arbeit begegnen. Vieles weiß ich erst jetzt, mit ein bisschen Abstand zum Geschehen, richtig zu schätzen. Mein lieber Dank richtet sich nicht zuletzt an meine Lebensgefährtin Irene Zimmermann, die nicht müde wurde, mich auf der Zielgeraden immer wieder aufzumuntern und zu bestärken, sowie ihrer Tochter Clarissa, meinen Nichten Katharina und Daniela, die mir mit ihrem kindlichen Charme zeigten, dass es auch noch andere wichtige Dinge und vor allem ein Leben nach der „Diss“ gibt.

Kurzfassung

Im Gegensatz zu Bewegungen von Fahrzeugen auf Landstraßen oder Autobahnen bieten Fahrzeugbewegungen im Bereich von innerstädtischen Straßenkreuzungen eine Vielzahl von unterschiedlichen Bewegungsformen, aus der eine Vielfalt von Ereignissen resultiert. Um diese Ereignisse geeignet beschreiben zu können, ist es notwendig, das unbewegte Umfeld zu berücksichtigen. Dies wurde bisher u. a. dadurch erreicht, dass interaktiv spezialisierte geometrische Kreuzungsbeschreibungen zur Verfügung gestellt wurden. In der vorliegenden Arbeit wird anhand von Grauwertbildfolgen mit Szenen innerstädtischer Straßenkreuzungen eine solche spezialisierte geometrische Kreuzungsbeschreibung mit minimalen interaktiven Eingriffen geschätzt und mit einer begrifflichen Beschreibung verknüpft.

Die rechnergestützte Erkennung und Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen wird auf die begriffliche Beschreibung mit einer Terminologie zur Repräsentation der Kreuzungsstruktur und deren Verknüpfung mit Erkennungsroutinen zurückgeführt. Die Bildung einer Terminologie zur Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen stützt sich dabei auf die in der Verkehrsfachliteratur festgelegten Begriffe. Aufgrund der in dieser Terminologie aufgebauten Hierarchie wird es möglich, Begriffe auf Primitive zurückzuführen. Existieren für alle konstituierenden Primitive eines Begriffs zusätzlich Erkennungsroutinen, kann der gewählte Begriff mit Hilfe von Resultaten einer algorithmischen Bildauswertung ausgeprägt werden.

Die vorherrschende Struktur bei Kreuzungen ist die Fahrspur. Aus diesem Grund wird der Erkennung von Fahrspuren der größte Anteil in dieser Arbeit eingeräumt. Bei der Erkennungsroutine für die Ausprägung des Begriffs Fahrspur wird als geometrische Beschreibung ein Hyperbelpaar in Form eines Hyperbelbandes gewählt. Die Kombination solcher Hyperbelbänder zu Hyperbelbandscharen erlaubt die Beschreibung ganzer Kreuzungsarme. Mit mehreren Hyperbelbandscharen können mehrere Kreuzungsarme beschrieben werden, sodass auf diese Weise schließlich eine ganze Kreuzung beschrieben werden kann.

Mit der Verknüpfung von begrifflicher Beschreibung und den zur Verfügung stehenden Erkennungsroutinen entsteht ein algorithmisches System zur Erkennung und Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	5
1.3	Vorgehensweise	6
2	Literaturüberblick	9
2.1	Beschreibungen von Kreuzungen	9
2.2	Detektion von Fahrspuren	12
2.3	Anpassungen von Kegelschnitten an Bildausschnitte	14
2.4	Diskussion	15
3	Begriffliche Beschreibung	17
3.1	Terminologien	17
3.1.1	Syntax einer Terminologie	18
3.1.2	Semantik einer Terminologie	19
3.2	Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen	21
3.2.1	Taxonomie	22
3.2.2	Teil-von-Hierarchie	22
3.2.3	Terminologie	24
4	Geometrische Beschreibung - Erkennungsroutinen	25
4.1	Fahrspur	25
4.1.1	Beschreibung gekrümmter Fahrspuren	25
4.1.2	Beschreibung geradliniger Fahrspuren	32
4.1.3	Modellierung von Fahrspurberandungen	32
4.1.4	Projektion von Hyperbelbändern	32

4.1.5	Kantenelementanpassung	37
4.2	Kreuzungsarm	42
4.2.1	Kombination ähnlicher Hyperbelbänder - Hyperbelbandschar	42
4.2.2	Kantenelementanpassung	47
4.2.3	Berücksichtigung von Abhängigkeiten bei der Anpassung	48
4.3	Kreuzung	49
4.4	Pfeilmarkierung	49
5	Ergebnisse	53
5.1	Anpassung einzelner Fahrspuren	53
5.1.1	Verwendung von Hyperbelbändern mit einheitlicher Breite	53
5.1.2	Verwendung von Hyperbelbändern mit unterschiedlichen Breiten	59
5.2	Anpassung von Hyperbelbandscharen - Kreuzungsarm	62
5.2.1	Straßenverkehrsszene am Bernhardus-Platz	62
5.2.2	Straßenverkehrsszene am Durlacher-Tor-Platz	68
5.2.3	Anpassung nicht gekrümmter Fahrspuren	77
5.3	Anpassung mehrerer Hyperbelbandscharen - Kreuzung	84
5.4	Detektion und Klassifikation von Pfeilmarkierungen	92
6	Zusammenfassung und Ausblick	99
6.1	Zusammenfassung	99
6.2	Ausblick	101
A	Betrachtungen zu Quadriken	103
A.1	Quadriken	103
A.2	Hyperbeln	105
B	Betrachtungen zu Hyperbelbändern	109
B.1	Hyperbelbänder	109
B.2	Abstandsmaß für Hyperbeln	114
C	Fahrzeugtrajektorien	117
D	Anpassung von Hyperbeln	121
D.1	Methode der kleinsten Quadrate	122

D.1.1 Normalisierung mit $A - C = 1$ 122

Literaturverzeichnis **127**

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Warum besitzen Pflanzen im Gegensatz zu Tieren und Menschen kein visuelles Wahrnehmungssystem? Sie unterscheiden sich von der Fauna, neben vielerlei anderen biologischen Merkmalen, vor allem durch die Eigenschaft, den ihnen einmal zugeordneten Standort selbständig nicht mehr verlassen zu können, mit anderen Worten: sie können sich nicht aktiv fortbewegen. Pflanzen sind keine Jäger, die ihre Beute jagen, sie müssen sich keinen Fortpflanzungspartner suchen, sodass es für sie nicht notwendig ist, den Standort zu wechseln. Die Gefahr des Gefressenwerdens verbleibt, was die Natur durch eine hohe Fortpflanzungsrate oder Anreicherung von Giftstoffen ausgleicht. Pflanzen mit einem visuellen Wahrnehmungssystem hätten gegenüber Pflanzen ohne visuelle Wahrnehmung keinen direkt ersichtlichen Überlebensvorteil, da sie die gewonnene Information nicht gewinnbringend, d. h. durch eine entsprechende Reaktion, einsetzen könnten. Die Vermutung, dass vor allem dann eine Auswertung visueller Information von Bedeutung ist, wenn auf eine sich schnell verändernde Umwelt reagiert werden muss, liegt deshalb nahe.

In starkem Gegensatz zur fehlenden Fortbewegung der Pflanzenwelt steht die Forderung nach einer immer größer werdenden Mobilität des Einzelnen innerhalb unserer Gesellschaft. Diese Forderung spiegelt sich in der Beobachtung wider, dass sich die Anzahl aller Fahrzeuge von Jahr zu Jahr stark erhöht. Legt man die oben formulierte Vermutung zugrunde, wächst damit auch die Bedeutung, visuelle Information auszuwerten. Insbesondere wird die Analyse von Bewegungen im Bereich Straßenverkehr immer wichtiger, um die damit gewonnene Information zur Erhöhung der Sicherheit durch Steuerung des Straßenverkehrs oder durch Hinweise an die beteiligten Fahrer zu nutzen.

Für das Erreichen dieses Ziels ist die Beobachtung des Straßenverkehrs eine notwendige Voraussetzung, um die benötigte Information zu erhalten. Teilnehmer im Straßenverkehr, oder die von ihnen gesteuerten Fahrzeuge, bewegen sich normalerweise im Gegensatz zu den meisten anderen bewegten Objekten geordnet nach vom Menschen festgelegten Regeln. Die mit einer unbeweglichen Kamera-Anordnung beobachteten Fahrzeugbewegungen

auf Autobahnen und Landstraßen sind mit wenigen Ausnahmen, die bei Baustellen oder im Ein- und Ausfahrtbereich zu finden sind, nicht sehr vielfältig.

Im Gegensatz zu Autobahnen und Landstraßen bieten Bewegungen im Bereich von innerstädtischen Straßenkreuzungen eine Vielzahl von unterschiedlichen Bewegungsformen und eine entsprechende Vielfalt an den sich daraus ergebenden Ereignissen. Bewegungen auf Straßen sind aufgrund der *Allgemeinen Straßenverkehrsordnung* und einer großen Zahl von Richtlinien stark vom unbewegten Umfeld abhängig. Dies ist der Fall, weil nicht zuletzt dem unbewegten Umfeld mitunter Bedeutungen zur kontrollierten Führung des Straßenverkehrs zugeordnet werden. Hierbei nehmen *Fahrbahnmarkierungen* eine wichtige Rolle ein, da sie vor allem die Verkehrsströme führen und dem Straßenverkehr eine grundlegende Ordnung vorgeben.

Zur Analyse von Bewegungen auf Kreuzungen reicht deshalb die Erfassung der Bewegung alleine ohne Berücksichtigung des unbewegten Umfeldes nicht aus, um eine der Bewegungsvielfalt angemessene Beschreibung einer beobachteten Kreuzungsszene liefern zu können.

Der Begriff des *Diskursbereichs* bezeichnet den Teil eines Weltausschnittes, der sich in den für die jeweilige Anwendung bedeutsamen Teilen in einer abstrakten Form beschreiben lässt. Innerhalb von Städten findet man planfreie Kreuzungen, also Kreuzungen, bei denen die Fahrspuren in einer gemeinsamen Ebene liegen, mit der Eigenschaft, dass die aus verschiedenen Richtungen ankommenden Verkehrsströme die *Fahrbahn* gemeinsam nutzen müssen. Hinsichtlich der bei planfreien Kreuzungen innerhalb von Städten zu beobachtenden Bewegungsvielfalt, die sich auch in besonderem Maße in der Gestaltung des unbewegten Umfeldes niederschlägt, wird für diese Arbeit der Diskursbereich „*Innerstädtische Straßenkreuzung*“ gewählt. Die Erkennung und Beschreibung dieses Diskursbereiches erfordert Wissen über die Struktur eines solchen Diskursbereiches. Dieses Wissen findet sich für den Diskursbereich „*Innerstädtische Straßenkreuzungen*“ z. B. in den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen [RAST-E 71, RAST-K 73, RAST-L 73, RAST-Q 68].

In technischen Systemen zur Bildauswertung kann das beim Menschen durch Beobachten und Lernen aufgebaute Hintergrundwissen u. a. durch die interaktive Vorgabe von *Modellen* zur Verfügung gestellt werden. Gerade im Bereich der Bildfolgenauswertung variiert der Abstraktionsgrad solcher Modelle aufgrund der hohen Komplexität der zugrundeliegenden Diskursbereiche stark: Zum einen werden starre, auf eine spezielle Szene zugeschnittene Modelle verwendet, zum anderen existieren *generische Beschreibungen*, die auf verschiedenartige Szenen spezialisiert werden können.

Solche speziellen Modelle für innerstädtische Straßenkreuzungen können beispielsweise von einem *Markierungsplan* abgeleitet werden. Die Abbildung 1.1 zeigt einen Ausschnitt des Markierungsplans der Ettlinger-Tor-Kreuzung in Karlsruhe. Ausgehend von diesem Markierungsplan wurde beispielsweise in [Kollnig 95] eine *spezialisierte geometrische Kreuzungsbeschreibung* entwickelt, deren Verfeinerung in Abbildung 1.2 dargestellt ist.

Bei der Entwicklung generischer Beschreibungen wird es notwendig, von gegebenen

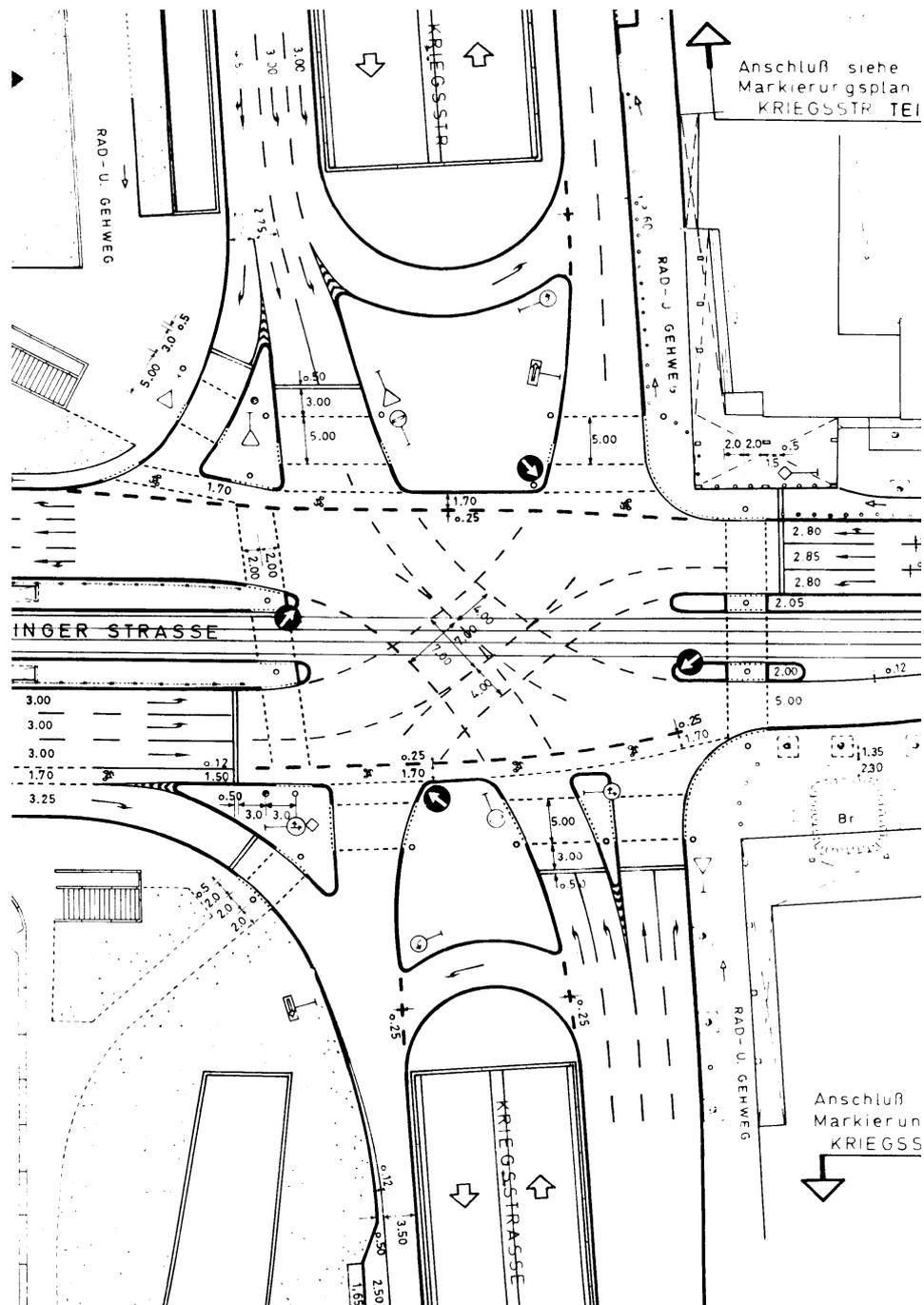


Abbildung 1.1: Dargestellt ist ein Ausschnitt des Markierungsplanes der Ettlinger-Tor-Kreuzung in Karlsruhe. Die Arbeit mit diesem Markierungsplan wurde durch die freundliche Unterstützung der Stadt Karlsruhe möglich.

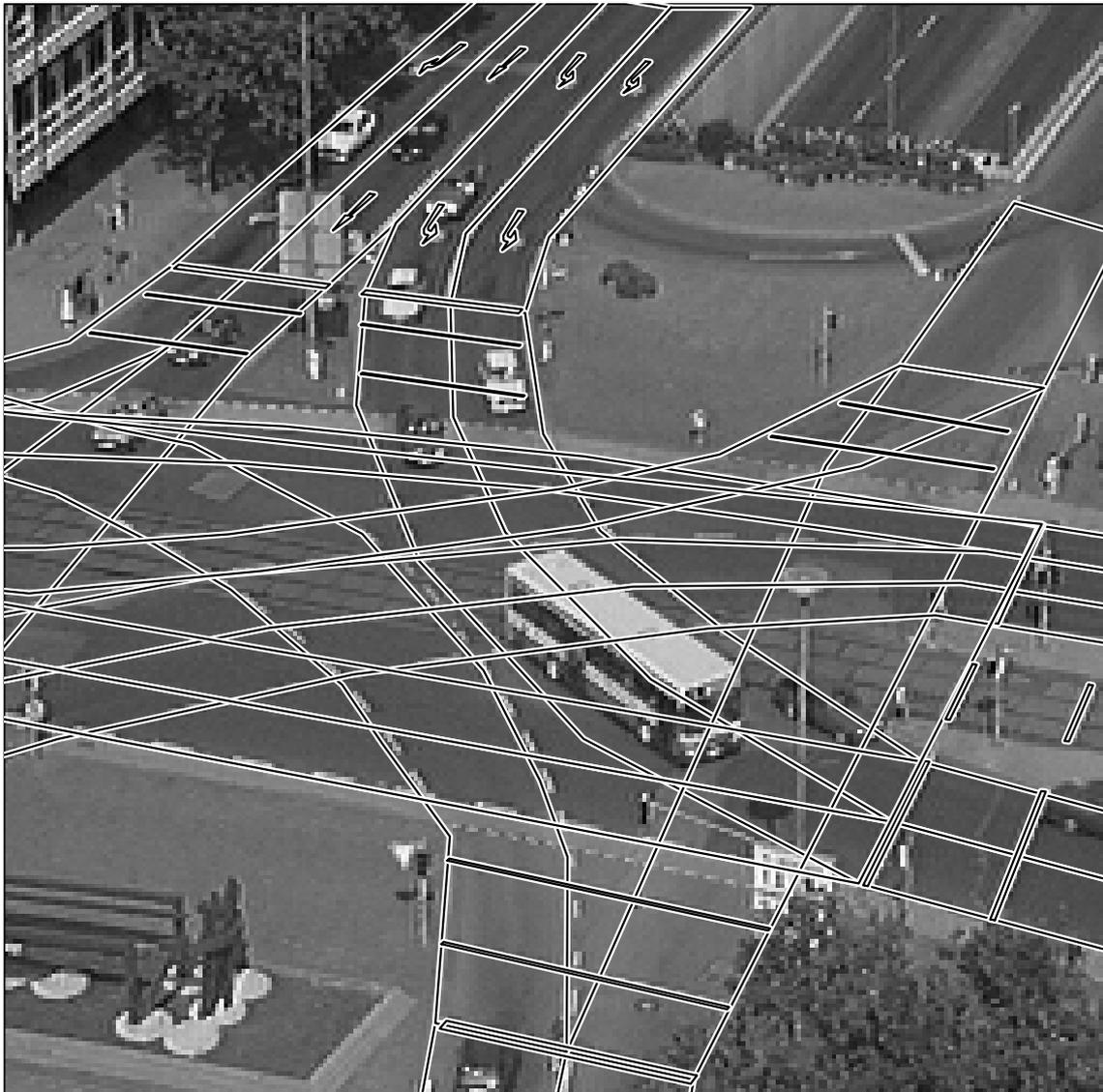


Abbildung 1.2: Einem Bild aus der Bildfolge der Ettlinger-Tor-Szene wurde eine Verfeinerung der spezialisierten geometrischen Kreuzungsbeschreibung nach [Kollnig 95] überlagert, die vom Markierungsplan aus Abbildung 1.1 abgeleitet wurde. Dieses Bild wurde freundlicherweise von M. Fautz zur Verfügung gestellt (s. a. [Fautz 96]).

Ausprägungen zu abstrahieren. Im Diskursbereich „Innerstädtische Straßenkreuzungen“ bietet es sich an, die vorhandenen Strukturen aus den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen abzuleiten, da sie die Grundlage für den Bau innerstädtischer Straßenkreuzungen darstellen. Als eine sinnvolle Vorgehensweise hat sich die Unterscheidung der *begrifflichen Zusammenhänge* und der *geometrischen Beschreibung* von Objekten erwiesen:

- eine *Taxonomie* stellt eine hierarchische Ordnung von Begriffen dar, die sich aus den

verschiedenen Richtlinien zur Anlage von Stadtstraßen unter Berücksichtigung der gegebenen Zusammenhänge von Kreuzungskomponenten ableiten lässt;

- eine *geometrische Beschreibung* dient der Zuordnung von Begriffen der Taxonomie zu Kreuzungskomponenten in der Szene oder deren Abbildungen im Bildbereich.

Eine solche generische Beschreibung bildet den Ausgangspunkt für die rechnergestützte Erkennung und Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen.

1.2 Zielsetzung

In dieser Arbeit werden Ansätze zu einem System vorgestellt, das mit Hilfe einer generischen Beschreibung die Komponenten einer innerstädtischen Straßenkreuzung erkennen, zueinander in Beziehung setzen und damit Abbilder einer konkreten innerstädtischen Straßenkreuzung beschreiben kann.

Die Auswertung von Bildfolgen wird aufgrund der Komplexität der in Bildfolgen auftretenden Zusammenhänge üblicherweise in einem hierarchisch organisierten Ansatz durchgeführt. Die Auswertung erfolgt dabei ausgehend vom *signalnahen* hin zum *begrifflichen* Bereich. Der Aufbau generischer Beschreibungen legt das in der Auswertung von Bildfolgen verwendete Wissen in formalisierter Form offen. Um dieses Wissen zur Analyse von Bildfolgen nutzen zu können, wird eine Taxonomie erstellt, die geeignete Begriffe zur Beschreibung des Diskursbereiches umfasst. Begriffe in dieser Taxonomie korrespondieren mit Abbildungen von Objekten in einer Szene oder Beziehungen zwischen solchen Objekten bzw. deren Abbildungen. Aufgrund der in dieser Taxonomie festgelegten Hierarchie wird es möglich, Begriffe der Taxonomie auf *Primitive* zurückzuführen. Existieren für alle konstituierenden Primitive eines Begriffes zusätzlich *Erkennungsroutinen*, die ein Primitiv in Beziehung zu einem Bildausschnitt setzen, wird es möglich, den gewählten Begriff erfolgreich auszuprägen. Dies entspricht der erfolgreichen *Erkennung* des zum Begriff korrespondierenden Objektes bzw. der Beziehung zwischen im Bild sichtbaren Objekten.

Durch explizite Nutzung des Wissens über Zusammenhänge zwischen Begriffen ist es nicht mehr notwendig, für jeden Begriff eine eigene Erkennungsroutine bereitzustellen. Die Beschreibung von Entwicklungen in Bildfolgen durch Komponenten begrifflicher Primitive reduziert die Anzahl der zu implementierenden Erkennungsroutinen. Gleichzeitig unterstützt die Beschränkung der Komplexität von Erkennungsroutinen die Verwendung von in der Bildauswertung üblichen Verfahren. Nicht zuletzt wird durch dieses Vorgehen ein Austausch von Teilen generischer Beschreibungen zwischen unterschiedlichen Diskursbereichen sowie die Wiederverwendung von Erkennungsroutinen gefördert.

Anhand des durch viele Richtlinien zur Anlage von Stadtstraßen strukturierten Diskursbereiches „Innerstädtische Straßenkreuzungen“ wird durch Rückgriff auf die in der Verkehrsfachliteratur verwendeten Begriffe eine Taxonomie erstellt, die den Aufbau innerstädtischer Straßenkreuzungen widerspiegelt. Eine Spezialisierung der auf dieser Ta-

xonomie beruhenden generischen Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen, angewandt auf Bildfolgen einer vorgegebenen Szene, wird auf Primitive zurückgeführt, die mit Erkennungsroutinen verbunden sind. Beispielsweise erlaubt die Zuordnung von Pfeilmarkierungen zu Fahrspuren die Spezialisierung von Fahrspuren. Eine solche Charakterisierung von Fahrspuren ermöglicht schließlich die Formulierung von Erwartungen über das Verhalten von Fahrzeugen, die sich auf den betreffenden Fahrspuren bewegen. Solche Erwartungen können zur Initialisierung, Verfolgung und Beschreibung von Fahrzeugbewegungen genutzt werden.

Ausgangspunkt der in der oben beschriebenen Form umrissenen rechnergestützten Erkennung und Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen bilden digitisierte Grauwertbildfolgen von Kreuzungsszenen, die mit einer Standardvideokamera aufgezeichnet wurden. Die erforderliche Repräsentation von Wissen sowie der darauf operierenden Schlussfolgerungsmechanismen erfolgt durch Nutzung eines zur Verfügung stehenden “Unschärfer Metrisch Temporalen Logiksystems” (s. [Schäfer 96]).

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit lässt sich somit umreißen. Zur rechnergestützten Erkennung und Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen ...

1. ... muss eine Taxonomie gebildet werden, deren Begriffe aus den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen abgeleitet werden sollen. Die Beziehungen der Begriffe zueinander muss durch Relationen beschrieben werden können. Die Semantik einer solchen *Terminologie* muss dabei mit der Struktur innerstädtischer Straßenkreuzungen korrespondieren und einem technischen System wie beispielsweise dem “Unschärfer Metrisch Temporalen Logiksystem” von [Schäfer 96] zugänglich sein.
2. ... müssen Erkennungsroutinen zur Verfügung gestellt werden, die mit Begriffen der aufgestellten Taxonomie korrespondieren. Da innerstädtische Straßenkreuzungen vor allem durch die auf ihr liegenden *Fahrspuren* geprägt sind, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Erarbeitung von Erkennungsroutinen zur Erkennung von Fahrspuren und von konkatenierten Fahrspuren.

1.3 Vorgehensweise

Ausgehend von den Begriffen in der Verkehrsfachliteratur (s. [Mück 94, Fautz 96]) wird eine Taxonomie entwickelt, die sich auf wenige Begriffe beschränkt, um die grundlegende Struktur einer innerstädtischen Straßenkreuzung begrifflich beschreiben zu können. Die wesentlichen Begriffe dabei sind *Fahrspur*, *Strichmarkierung* und *Pfeilmarkierung*. Aufbauend auf einer solchen Taxonomie wird eine Terminologie entwickelt, die Beziehungen zwischen einzelnen Begriffen durch Relationen berücksichtigt.

Damit eine innerstädtische Straßenkreuzung anhand von Grauwertbildfolgen automatisch erkannt werden kann, sollen für die oben genannten Begriffe Erkennungsroutinen bereitgestellt werden. Dabei wird vom Begriff *Fahrspur* ausgegangen, da durch Fahrspuren der örtliche Verlauf des Straßenverkehrs festgelegt wird. Die Kennzeichnung einer

Fahrspur erfolgt durch Strichmarkierungen oder durch Randelemente. Im *Kreuzungsbe- reich*, also dort, wo sich die Fahrspuren einer Kreuzung queren, sind jedoch häufig keinerlei oder nur geringe Kennzeichnungen einer Fahrspur zu finden.

Die einfachste Art von Fahrspuren besteht in der einspurigen geradlinigen Form. Die- se sind in der Realität eher selten anzutreffen. Bereits die bei Kreuzungen notwendigen Abbiegespuren sind gekrümmt. Gekrümmte Fahrspuren werden grundsätzlich durch *Klo- thoiden* konstruiert, also Kurven, deren Krümmungsradius sich linear mit der Bogenlänge ändert. Innerhalb von Städten sind Kurven jedoch recht kurz. Es ist deshalb nicht not- wendig, auf die aufwendige Beschreibung von Klothoiden zurückzugreifen. Eine Näherung solcher Kurven besteht in der Beschreibung durch *Hyperbeln*¹. Es wird daher ein *Hyper- belband* entwickelt, das zur Beschreibung sowohl von gekrümmten als auch von geradlinig verlaufenden Fahrspuren herangezogen wird. Solche Hyperbelbänder werden schließlich zu *Hyperbelbandscharen* konkateniert, mit denen sich die Beschreibungen parallel ver- laufender Fahrspuren verknüpfen lassen. Die Kombination mehrerer Hyperbelbandscha- ren erlaubt die Beschreibung der grundlegenden Fahrbahnstruktur einer innerstädtischen Straßenkreuzung.

Bei der in dieser Arbeit durchgeführten Anpassung von Hyperbelbandscharen an Abbildern von Fahrspurbegrenzungen handelt es sich um einen nichtlinearen Schätzpro- zess, sodass eine Initialisierung erforderlich wird. Basis dieser Initialisierung sind Trajek- torien, die durch ein datengetriebenes Verfahren zur Verfolgung von Fahrzeugen ermittelt wurden (s. a. [Middendorf 99]). Die dabei bestimmten Trajektorien dienen als Ausgangs- punkt einer Anpassung einzelner oder mehrerer Hyperbelbänder oder Hyperbelbandscha- ren an Bildfolgen innerstädtischer Straßenkreuzungen.

Strichmarkierungen dienen in den meisten Fällen dazu, Fahrspuren in Form von *Fahr- streifenbegrenzungslinien* zu kennzeichnen. Auftretende Quermarkierungen entstehen, ab- gesehen von *Haltlinien*, *Fußgängerfurten* und *Fußgängerüberwegen* (Zebrastreifen), im all- gemeinen durch Kennzeichnung kreuzender Fahrspuren. Die Detektion von Fahrspuren beinhaltet somit gleichzeitig auch die Detektion von Strichmarkierungen in Form von *Fahrstreifenbegrenzungslinien*. *Pfeilmarkierungen* werden nach den Richtlinien zur Anlage von Stadtstraßen in der Mitte von Fahrspuren aufgebracht. Nach der erfolgreichen Erken- nung von Fahrspuren wird deshalb die Suche nach Pfeilmarkierungen erleichtert. Nach Erkennung einer Pfeilmarkierung kann die zugehörige Fahrspur entsprechend charakteri- siert werden.

Die Erkennung von Fahrspuren und die Ausprägung einer spezialisierten generischen Beschreibung führt schließlich zu einem Gesamtsystem zur automatisierten Erkennung und Beschreibung von innerstädtischen Straßenkreuzungen in Videobildfolgen von Ver- kehrsszenen.

¹Es wird sich in den Experimenten des Kapitels 5 zeigen, dass diese Näherung für die Aufgabenstellung dieser Arbeit hinreichend gut ist.

Kapitel 2

Literaturüberblick

2.1 Beschreibungen von Kreuzungen

[Sung 88] legt bei seiner Auswertung von Bildfolgen Grauwertbilder einer innerstädtischen Straßenkreuzung zugrunde. Aus der Verfolgung von Objektabbildern werden datengetriebene Trajektorien gewonnen, die zur Auswertung von Kreuzungsstrukturen herangezogen werden: Die beobachteten Trajektorien des Verfolgungsschrittes wurden überlagert und dem Begriff *Fahrbahn* zugeordnet. Die zeitlich durchgeführte Interpretation der detektierten Trajektorien erlaubt Aussagen über die Ampelphasen der beobachteten Kreuzung. Die aus der Auswertung der beobachteten Szene abgeleiteten Aussagen werden schließlich so aufbereitet, dass sie einem sprachverarbeitenden System zur weiteren Analyse zur Verfügung gestellt werden konnten.

Auf der Arbeit von [Sung 88] und der Erfahrung des modellgestützten Ansatzes von [Koller 92] aufbauend, wurde in [Kollnig et al. 94] ein rein datengetriebenes Verfahren zur Objektverfolgung entwickelt. Dieses Verfahren wurde in [Kollnig 95] dadurch verfeinert, dass die Rückprojektion aller demselben Objektabbild zugeordneter optischen Flussvektoren innerhalb derselben Fahrspur liegen. Für dieses Zuordnungskriterium wurde eine einfache geometrische Beschreibung eingesetzt, die interaktiv in Form einer spezialisierten geometrischen Kreuzungsbeschreibung zur Verfügung gestellt und automatisch an Bildfolgen innerstädtischer Straßenkreuzungen angepasst wurden (s. a. [Osswald 94, Leuck 94, Gengenbach et al. 95]). Unter Rückgriff auf einen Markierungsplan konnte [Leuck 95] diese spezialisierte geometrische Kreuzungsbeschreibung weiter verfeinern. [Krüger 92] führte ein begriffliches Kreuzungsmodell ein, das mit synthetischen Daten verknüpft wurde. In [Mück 94] wurde anhand der aus der Verkehrsfachliteratur bekannten Begriffe für innerstädtische Straßenkreuzungen ein begriffliches und geometrisches Modell entwickelt. [Fautz 96] verfolgt schließlich das Ziel, anhand einer einfachen begrifflichen Beschreibung die Struktur innerstädtischer Straßenkreuzungen zu erfassen und einer logischen Auswertungsebene zugänglich zu machen.

[Li-Qun et al. 92] werten eine Bildfolge einer Straßenverkehrsszene aus, mit dem Ziel,

durch Verfolgung von vielen Objekten statistisch relevante Aussagen über den Verlauf der beobachteten planfreien Straßenkreuzung zu gewinnen (vgl. [Sung 88]). Die beobachtete Straßenkreuzung besteht aus geradlinigen Fahrspuren. Der in Blickrichtung der statisch positionierten Kamera verlaufende Kreuzungsarm besteht aus insgesamt vier Fahrspuren, mit zwei Fahrspuren je Fahrtrichtung. Die kreuzenden Fahrspuren verlaufen quer zur Blickrichtung der Kamera. Für jede Fahrtrichtung dieser kreuzenden Fahrspuren gibt es nur eine Fahrspur. Der Straßenverkehr wird durch Signalanlagen geregelt. Die Objektverfolgung erfolgt im Bildbereich. Die zugrundegelegte Bildfolge ermöglichte eine Beobachtungsdauer von 30 Minuten bei einer Abtastrate von 3.3 Bilder/s mit einer Auflösung von 180×143 Bildpunkten. Die Implementierung erfolgte mit POP-11 und C in einem POPLOG-System. Mit Hilfe der Trajektorien aller verfolgten Objekte werden Häufungspunkte im Bild bestimmt, die die Lage der Fahrspuren kennzeichnen. Die Fahrspurbegrenzung wird dort angenommen, wo die Häufungspunkte minimal auftreten. Aufgrund des Wissens über die Fahrtrichtung jeder Fahrspur können Abweichungen im Fahrverhalten detektiert werden.

[Fernyhough et al. 96] stellt eine Weiterentwicklung von [Li-Qun et al. 92] dar. Auch hier wird durch die Verfolgung vieler Objekte ein statistisches Modell über die auftretenden Bewegungen aufgebaut. Die Verfolgung der Objekte erfolgt ausschließlich im Bildbereich. Im Gegensatz zu [Li-Qun et al. 92] wird nicht mehr vorausgesetzt, dass die Bewegung der Objekte geradlinig verläuft. Aus den Objektumrissen werden Pfade generiert, die in eine Datenbank eingetragen werden. Ist bereits ein ähnlicher Pfad bestimmt worden, wird der entsprechende Eintrag in der Datenbank aktualisiert. Aus den in der Datenbank eingetragenen Pfaden werden abschließend *semantische Regionen* abgeleitet. Bei der Bestimmung von semantischen Regionen wird die Überlappung von Pfaden als Unterteilungskriterium herangezogen. Nach [Fernyhough et al. 96] ist es damit möglich, den Bildbereich beispielsweise in Fahrspuren und Vorfahrtsbereiche zu unterteilen (s. a. [Buxton & Gong 95a]). In [Fernyhough et al. 98, Fernyhough et al. 00] wird dieser Ansatz durch eine zeitliche Komponente erweitert, sodass verschiedene Geschwindigkeiten von Fahrzeugen unterschieden werden können. Dadurch wird es möglich, den räumlichen Abstand zweier Fahrzeuge zeitabhängig zu bewerten. Die Ergebnisse von [Fernyhough et al. 96] werden in [Fernyhough et al. 00] durch die Analyse einer Autobahnscene ergänzt.

Das in [Buxton & Gong 95a, Buxton & Gong 95b] beschriebene VIEWS-Projekt dient der echtzeitfähigen, sichtsystemgestützten Überwachung von Straßenverkehrsszenen. In VIEWS wird dazu Wissen über die aufnehmende Kamera, die Fahrbahnebene, die beobachteten Objekte, deren Bewegung und ihr Verhalten eingesetzt. Die geometrische Beschreibung der Fahrbahnebene baut auf einer Teil-von-Hierarchie auf, deren Primitive (leaf regions) durch einfache Polygone beschrieben werden. Den aus diesen Primitiven zusammengesetzten Strukturen werden Bedeutungen zugeordnet: Fahrbahn (road surface), Zu- und Abfahrtsbereich (entry and exit roads), Rechtsabbiegebereich (turn-right zone), Kreisverkehr (roundabout), Fahrspuren_des_Zufahrtsbereichs (lanes of the entry road), Vorfahrtsbereich (give-way zone), Abbiegebereich (turning zone) und der Vorfahrt-

achtenbereich (give-way-to zone). Die bei den beschriebenen Experimenten verwendete spezialisierte geometrische Kreuzungsbeschreibung wurde interaktiv erstellt.

In [Dance et al. 96] wird ein hierarchischer Ansatz zur Beschreibung von Geschehen in Bildfolgen mit Straßenverkehrsszenen vorgestellt. Die Auswertung erfolgt dabei zum einen auf der geometrischen, zum andern auf der symbolischen Ebene. Für jede Auswertungsebene wird eine für die jeweilige Aufgabe geeignete Programmiersprache verwendet. Zur Auswertung der geometrischen Information werden eine prozedurale Programmiersprache und einfache Algorithmen benutzt, während bei der symbolischen Ebene eine logische Programmiersprache eingesetzt wird, mit deren Hilfe Schlussfolgerungen in einem hierarchischen Netzwerk von Begriffsrahmen getroffen werden. Geschehen werden mit Hilfe von Begriffsrahmen formal beschrieben. Die Primitiven „tInXn“ (T-intersection), „inXn“ (intersection) und „road“ stellen dabei den einzigen Bezug zur Kreuzungsbeschreibung in diesem System dar. Die geometrischen Eigenschaften dieser Primitiven (Kanten, Ecken, Polygone) wurden mit einfachen Standardverfahren aus dem Bild interaktiv extrahiert und in einer Datenbank abgelegt¹.

Die nachfolgenden beiden Beiträge werten keine Bildfolgen aus. Grundlage der Auswertung von [Mayer et al. 93, Hartog et al. 96] sind digitisierte Markierungspläne (Katasterpläne), die u. a. auch innerstädtische Straßenkreuzungen beinhalten können.

Für die Auswertung in [Mayer et al. 93] wird Modellwissen über den Aufbau von Markierungsplänen eingesetzt. Dieses Modellwissen wurde hierarchisch in vier Ebenen strukturiert und als semantisches Netz mit Hilfe von Common-Lisp und CLOS implementiert. Die im semantischen Netz formulierten Regeln korrespondieren zu den Eigenschaften der zu erkennenden Objekte, wie *Gehweg*, *Flurstück*, *Grünstreifen*, *Straße*. Die Auswertung von Markierungsplänen erfolgt schließlich durch die Ausprägung von Schemata, die im semantischen Netz definiert sind. Die Leistungsfähigkeit dieses Ansatzes wird anhand einer schrittweise dargestellten automatischen Auswertung zweier Markierungspläne mit unterschiedlichen Maßstäben demonstriert.

[Hartog et al. 96] verfolgen einen ähnlichen Ansatz wie [Mayer et al. 93]. Die Auswertung erfolgt modellbasiert und die Repräsentation des dabei verwendeten Wissens wird explizit in einer logischen Beschreibungssprache formuliert. Mit Hilfe eines möglichst allgemein formulierten Auswertungsverfahrens soll dabei der Wechsel des Diskursbereiches erleichtert werden. Dazu werden drei Konzepte vorgestellt: (1) Extraktion von Primitiven aus dem Binärbild eines digitisierten Markierungsplans, (2) Trennung des anwendungsspezifischen Wissens von der Implementierung unter Verwendung einer geeigneten Sprache zur Wissensrepräsentation, (3) Mechanismus zur Interpretation des Bildes basierend auf dem *a priori*-Wissen über den Diskursbereich und den tatsächlich vorliegenden Dokumenten. Für die durchgeführten Experimente wurden die Beschreibungen für *Pipeline*-Segmente, *Haus*-Segmente, *Pfeile*, *Punkte* und *Ziffern* benötigt. Bei der Beschreibung dieser fünf „Hauptsymbole“ wird die geometrische und die begriffliche Beschreibung durch eigene Repräsentationsformen unterschieden. Das System wurde anhand der Auswertung

¹Diese Vermutung bestätigte der Autor T. Caelli in einer privaten Mitteilung vom 10. Mai 2000.

von zwei Markierungsplänen diskutiert und bewertet.

2.2 Detektion von Fahrspuren

Die Verfahren zur Detektion von Fahrspuren können in drei Kategorien eingeteilt werden; Detektion von Fahrspuren ...

1. ... aus großer Höhe,
z. B. bei Satelliten- oder Flugzeugaufnahmen;
2. ... mit einer auf der Erde statisch positionierten Kameraanordnung,
insbesondere bei Beobachtungen von Straßenzügen: Autobahnen, Landstraßen, innerstädtische Straßenkreuzungen;
3. ... mit einer bewegten Kameraanordnung,
beispielsweise im Zusammenhang mit Untersuchungen zur autonomen Fahrzeugführung oder zu Fahrerassistenzsystemen.

Arbeiten mit Aufnahmen aus großer Höhe werden hier nicht diskutiert, da die dort beschriebene Aufgabenstellung zu sehr von den in dieser Arbeit diskutierten Zielen abweicht. In der Literatur konnten zur Beobachtung von Straßenverkehrsszenen auf Autobahnen und Landstraßen mittels statisch positionierter Kameraanordnungen nur Beiträge gefunden werden, die Bewegung von Fahrzeugen zur Geschwindigkeitskontrolle oder zu Überwachungszwecken schätzen. Anpassungen von Fahrspurmodellen wurden dabei in keinem Beitrag beschrieben. Einen neuen Ansatz und einen Überblick zu diesem Thema bietet [Zhu et al. 00]. Literaturbeiträge zu Modellen von Fahrspuren innerstädtischer Straßenkreuzungen, die bei der Beobachtung von Straßenverkehrsszenen mit einer statisch positionierten Kameraanordnung verwendet werden, wurden bereits im letzten Abschnitt beschrieben. Der Einsatz von Videokameras im Zusammenhang mit autonomer Fahrzeugführung und Fahrerassistenzsystemen ist von Echtzeitverarbeitung beherrscht. Deshalb werden vorwiegend einfache Verfahren verwendet, die unter bestimmten Annahmen die gestellten Aufgaben lösen können. Einen Überblick und eine mögliche Bewertung von Fahrspurdetektionen findet man in [Kluge 97].

[Guiducci 99] stellt eine Möglichkeit vor, wie Fahrspuren mit Hilfe einer in einem Fahrzeug installierten Videokamera geschätzt werden können. Er setzt dabei Fahrspuren mit einer leichten Krümmung voraus, die *im Bildbereich* mittels Hyperbeln genähert werden. Die Beschreibung der Fahrspurbegrenzung durch Hyperbeln leitet [Guiducci 99] aus der projektiven Abbildung von Kreisbögen her. Die Anpassung an Bildmerkmale erfolgt durch einen Kalman-Filter-Ansatz. Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung dieses Verfahrens war die Berücksichtigung von Echtzeitbedingungen. Das Verfahren wurde im mobilen Labor MOB-LAB (s. a. [Bertozzi & Broggi 98]) eingesetzt und an einer Bildfolge mit 1000 Bildern getestet.

[Guichard & Tarel 99] beschreiben eine Vorgehensweise zur Detektion von Fahrspurbegrenzungen unter ähnlichen Bedingungen wie [Guiducci 99]. Aufgrund der Echtzeitbeschränkung wird zur Detektion von Kantenelementen ein schwellwertbasiertes Verfahren eingesetzt. Die gefundenen Kantenelemente werden mit Modellwissen unter Einsatz eines graphenbasierten Verfahrens konkateniert und mit einem Kalman-Filter-basierten Ansatz an eine vorgegebene Klasse von Kurven angepasst. Aufgrund der Nutzung von Wissen über den Verlauf von Straßen erhalten die Autoren eine Beschreibung für die Fahrspurbegrenzungen.

[Kreucher & Lakshmanan 99] analysieren bei der Suche nach Fahrspurbegrenzungen den Frequenzbereich von Einzelbildern der beobachteten Bildfolge (LANA = Lane finding in ANother domAin). Jedes Einzelbild wird in Blöcke unterteilt, für die ein frequenzbasierter Merkmalvektor bestimmt wird. Zur Detektion der Fahrspurbegrenzungen wird ein schablonenbasiertes Verfahren verwendet, das die erwartete Form von Fahrspurbegrenzungen mit den berechneten Merkmalvektoren zur Deckung bringt. Abschließend vergleichen die Autoren ihren Ansatz mit einem räumlich basierten Verfahren zur Detektion von Fahrspuren (LOIS) (vgl. [Kluge & Lakshmanan 95]).

[Beauvais & Lakshmanan 00] kombinieren in ihrem System CLARK (Combined Likelihood Adding Radar Knowledge) Informationen eines visuellen mit Information eines radarbasierten Sensors. Die Information aus dem radarbasierten Sensor eignet sich für die Detektion von Hindernissen, wie z. B. vorausfahrende Fahrzeuge. Diese Information wird genutzt, um die Detektion von Fahrspuren mit dem Verfahren LOIS zu verbessern. Dieser kombinierte Ansatz wird qualitativ mit dem Verfahren LOIS ohne Berücksichtigung von Information des radarbasierten Sensors verglichen.

[Goldbeck et al. 00] entwickeln für eine autonome Fahrzeugführung ein System, das die Fahrspurbegrenzung aus Sicht eines Fahrers detektiert und die Steuerung des autonom gesteuerten Fahrzeugs mit DGPS (Differential Global Positioning System) abstimmt. Als Fahrspurmodell werden zwei parallel verlaufende Fahrspurbegrenzungen angenommen, die mit Klothoiden konstruiert wurden. Als Näherung für die Fahrspurbegrenzungen arbeiten die Autoren sowohl für die horizontale als auch vertikale Richtung mit Polynomen dritten Grades. Zur Bestimmung der Parameter des Fahrspur- und des Fahrzeugmodells aus den Bilddaten wird ein nichtlineares Gleichungssystem ausgewertet, dessen Lösung mit einem Erweiterten-Kalman-Filter (EKF) geschätzt wird (vgl. [Dickmanns et al. 93]). Die internen und externen Kameraparameter werden durch eine getrennt durchgeführte Kamerakalibrierung bestimmt. Bildpunkte, die Abbildern von Fahrspurbegrenzungen zugeordnet werden, müssen einem schmalen dunkel-hell-dunkel Bereich zugehören. Eine weitere Auswahl der detektierten Bildpunkte und die Initialisierung des EKF werden nicht diskutiert.

2.3 Anpassungen von Kegelschnitten an Bildausschnitte

In der Literatur sind sehr viele Verfahren zur Anpassung von Ellipsen im Gegensatz zur Anpassung von Hyperbeln bekannt. Diese Verfahren können jedoch nicht immer zur Anpassung von Hyperbeln verwendet werden, da die resultierenden Schätzfehler zu groß sind.

Eine Zusammenfassung wichtiger Verfahren zur Anpassung von Kegelschnitten wird in [Zhang 97] diskutiert. Anhand der Anpassung von Ellipsen an vorgegebene Stützpunkte werden verschiedene Anpassverfahren diskutiert: Lineare Regression unter Verwendung des algebraischen Abstandes, des euklidischen Abstandes und eines gradientengewichteten Ansatzes, sowie die Anpassung mittels Kalman-Filter-Technik. Eine Sammlung von Anpassungstechniken für Ellipsen an eine Menge von Stützpunkten wird auch in [Rosin 99] diskutiert.

In [Porrill 90] wird die Anpassung von Ellipsen durch Einsatz eines Erweiterten-Kalman-Filters (EKF) unter Berücksichtigung der durch Verwendung des algebraischen Abstands entstehenden Verzerrung beschrieben. Die Festlegung eines Toleranzschlauches ermöglicht die Gewichtung von Stützpunkten beim Schätzprozess.

[Werman & Geyzel 95] stellen ein Verfahren vor, mit dem an Stützpunkten Kurven zweiter Ordnung angepasst werden. Sie stützen sich auf ein stochastisches Verfahren, das berücksichtigt, dass Stützpunkte üblicherweise mit Rauschen behaftet sind. Bei ihrer Anpassung von Kegelschnitten unterscheiden sie Kreise, Ellipsen, Hyperbeln und Parabeln. Bei ihrer Bewertung vergleichen sie die Ergebnisse eines auf der linearen Regression basierenden Verfahrens mit den Ergebnissen ihrer Anpassung und den tatsächlichen Werten, die aufgrund der zugrundegelegten synthetischen Daten exakt bekannt sind. Die Ergebnisse des in [Werman & Geyzel 95] vorgestellten Verfahrens weisen dabei geringere Fehler auf als die Anpassung basierend auf einer Schätzung mittels linearen Regression.

In [Pilu et al. 96, Fitzgibbon et al. 99] wird beschrieben, wie eine bei Ellipsenanpassung mittels linearer Regression übliche Beschränkungsgleichung so gestaltet werden kann, dass auch bei stark verrauschten Daten als Kegelschnitt nur eine Ellipse angepasst wird und nicht eine Hyperbel oder Parabel. Diese Gleichungen lassen sich auch für Hyperbeln formulieren. Untersuchungen dazu existieren jedoch noch nicht.

[Zhu & Peng 99] und etwas ausführlicher in [Zhu 99] stellen ein Verfahren vor, das eine Menge von Kegelschnittabschnitten an eine Objektkontur anpassen kann. Sie verwenden einen algebraischen Ansatz, der es erlaubt, die Art der anzupassenden Kegelschnitte zu unterscheiden.

[Bennett et al. 99] beschreiben einen Ansatz, mit dessen Hilfe Ellipsen detektiert werden können. Dabei verwenden sie eine Hough-Transformation, wobei es möglich ist, *a priori*-Wissen über die zu detektierenden Ellipsen zu berücksichtigen. In ihrem Ansatz wird außerdem ein Parameter eingesetzt, der es ermöglicht, bei der Bestimmung des an-

zupassenden Kegelschnittes zwischen einer Ellipse und einer Hyperbel zu unterscheiden.

2.4 Diskussion

Kreuzungsbeschreibungen werden in unterschiedlicher Form und für verschiedene Zwecke verwendet. Bei allen in diesem Kapitel angegebenen Systemen wird jedoch die mit der Kreuzungsbeschreibung verknüpfte Information für eine detailliertere Beschreibung der beobachteten Szene insbesondere für Auswertungsstufen im begrifflichen Bereich eingesetzt. Es können zwei Formen der Kreuzungsbeschreibung unterschieden werden: die geometrische und die begriffliche Beschreibung. Bei den meisten Systemen werden aus dem Bild Merkmale extrahiert, die *interaktiv* Kreuzungsstrukturen zugeordnet werden. Eine Ausnahme hiervon bilden [Sung 88, Gengenbach et al. 95, Fernyhough et al. 96]. In [Sung 88, Fernyhough et al. 96] können aufgrund einer langen Beobachtung der Szene statistische Aussagen über das Verhalten der beobachteten Fahrzeuge gemacht werden. Diese Aussagen werden mit einer begrifflichen Beschreibung verknüpft, die abschließend einer weiteren Auswertung zugeführt werden kann. Während [Sung 88] zur Auswertung der Kreuzungsszene die Trajektorien der beobachteten Fahrzeuge heranzieht und Ampelphasen schätzt, stehen bei [Fernyhough et al. 96] räumliche Folgerungen im Vordergrund. Die Breite der Fahrspuren leiten [Fernyhough et al. 96] aus den im Bild vom Fahrzeugabbild überdeckten Bereich ab. Dabei wird für die resultierenden Fahrspurbegrenzungen weder die perspektivische Verzerrung berücksichtigt, noch eine Anpassung an die tatsächlich im Bild beobachteten Fahrspurbegrenzungen vorgenommen. Bei [Gengenbach et al. 95] wird dagegen eine spezialisierte geometrische Kreuzungsbeschreibung entwickelt und an die Bilder der beobachteten Bildfolge mittels eines Erweiterten-Kalman-Filters angepasst, sodass die erhobene Forderung, ein durchgängiges System vom „Signal zum Begriff“ zu entwickeln, nicht verletzt wird. Für jede Kreuzung muss jedoch interaktiv eine spezialisierte geometrische Kreuzungsbeschreibung zur Verfügung gestellt werden, die beispielsweise aus Markierungsplänen bestimmt werden kann (vgl. [Leuck 95]).

In der Literatur beschränken sich Verfahren zur Erkennung von Fahrspuren entweder auf Szenen von Autobahnen, die mit einer statisch positionierten Kamera aufgenommen wurden, oder auf Szenen, die mit einer bewegten Kamera innerhalb eines Fahrzeuges beobachtet wurden (Aufnahmen aus großer Höhe werden aus den oben genannten Gründen nicht betrachtet). Das Fahrspurmodell bei der Beobachtung von Fahrzeugen auf Autobahnen beschränkt sich auf parallel zur optischen Achse der Kamera verlaufende Fahrspurbegrenzungen, die üblicherweise nicht an die im Bild beobachteten Fahrstreifenbegrenzungen angepasst werden müssen (vgl. [Zhu 99]). Fahrspuren, die mit einer Kamera aus einem bewegten Fahrzeug heraus detektiert werden müssen, haben eine ganz spezielle Lage: (a) die Fahrspur nimmt einen großen Ausschnitt des Bildes ein, und damit sind auch Fahrbahnmarkierungen entsprechend groß, (b) Fahrspurbegrenzungen sind in einem bestimmten Ausschnitt des Bildes zu finden, (c) die Fahrspur muss nur in einem von der Geschwindigkeit abhängigen nahen Bereich korrekt geschätzt wer-

den². Aufgrund der Echtzeitbeschränkungen werden zur Fahrspurdetektion oft Methoden verwendet, die ausschließlich im Bildbereich mit einfachen Berechnungen arbeiten und auf einzelne Problemstellungen zugeschnitten sind. Szenenbasierte Verfahren wie [Dickmanns et al. 93, Goldbeck et al. 00] verwenden dagegen ein Fahrspurmodell, das sich aus den zitierten Richtlinien zur Erstellung von Fahrspuren ableitet. Dafür muss zur Einhaltung von Echtzeitbedingungen bei der Bildfolgenauswertung die entsprechende Rechnerleistung bereitgestellt werden. Durch die Einbringung von Modellwissen über eine beobachtete Szene kann die Verwendung von Heuristiken vermindert werden, wodurch sich die verwendeten Verfahren besser begründen und bewerten lassen. Dies zeigt sich nicht zuletzt in einer Verbesserung der Ergebnisse.

Kein System konnte jedoch aus den Bildern von Bildfolgen mit Kreuzungsszenen die Kreuzungsstruktur unter Berücksichtigung der tatsächlichen Fahrspurbegrenzungen bestimmen. Fahrspuren in Bildfolgen mit Kreuzungsszenen, die mit einer statisch positionierten Kamera aufgenommen wurden, lassen sich mit Verfahren zur Detektion von Fahrspuren aus einem fahrenden Fahrzeug heraus aufgrund der speziellen Lage von Fahrspuren nur bedingt berechnen. Darüberhinaus gestaltet sich das Fahrspurmodell, das für Kreuzungsszenen bereitgestellt werden muss, komplexer als das Fahrspurmodell, das bei der autonomen Fahrzeugführung/Fahrerassistenzsystemen verwendet wird. In [Dickmanns et al. 93, Goldbeck et al. 00] wurde zwar die Konstruktion von Fahrspuren aus den Richtlinien abgeleitet, jedoch keine Kreuzungsstruktur und auch keine Kopplung mit einer begrifflichen Beschreibung. Systeme, die eine Kopplung der Kreuzungsstruktur mit einer begrifflichen Beschreibung vornehmen, geben entweder eine spezialisierte geometrische Kreuzungsbeschreibung vor (vgl. [Gengenbach et al. 95]), oder die aus den Bewegungen geschätzten geometrischen Beschreibungen werden nicht anhand der vorgegebenen Fahrspurbegrenzungen im Bild verifiziert (vgl. [Fernyhough et al. 96]). Ein durchgängiges System, das anhand der Richtlinien zur Anlage von Straßenkreuzungen aus Bildern einer Bildfolge mit Kreuzungsszenen automatisch Strukturen einer Kreuzung erkennt und beschreibt, war bisher noch nicht verfügbar.

²Wobei beachtet werden muss, dass die Straßenführung sich nur im Rahmen der zugelassenen Geschwindigkeiten ändert, d. h. Autobahnen und Landstraßen mit der Zulassung von höheren Geschwindigkeiten weisen nicht so starke Krümmungen auf wie beispielsweise Stadtstraßen, bei denen nur deutlich geringere Geschwindigkeiten zulässig sind.

Kapitel 3

Begriffliche Beschreibung

Will man einem anderen Menschen beschreiben, was auf einem Bild zu sehen ist, so ordnet man geometrischen Strukturen des Bildes für alle Beteiligten verständliche – nach Möglichkeit eindeutig gewählte – *Begriffe* zu. Diese Begriffe sind dabei so gewählt, dass sie mit geometrischen Strukturen im Bild assoziiert werden, die im Falle von Abbildern einer 3D-Szene mit den korrespondierenden Objekten in der Szene in Verbindung gebracht werden können. In den meisten Fällen reicht die Zuordnung von Begriffen zu geometrischen Strukturen für eine hinreichend genaue Beschreibung jedoch nicht aus. Viele der abgebildeten Objekte stehen üblicherweise zueinander in *Beziehung*. Mit einer solchen Beziehung kann beispielsweise eine Zugehörigkeit oder auch eine räumliche Verknüpfung ausgedrückt werden.

Die *begriffliche Beschreibung* eines gewählten Diskursbereiches soll dabei sowohl für einen Menschen verständlich als auch für ein technisches System zugänglich sein. *Terminologische Systeme* wie sie beispielsweise in [Bibel et al. 93] beschrieben sind, eignen sich hierfür, da sie zum einen auf der Beschreibung von Begriffen und deren Beziehungen basieren, und zum anderen in ein Logiksystem eingebettet sind, sodass eine Auswertung beispielsweise mit dem “Unschärfe Metrisch Temporale Logiksystem” von [Schäfer 96] möglich ist.

3.1 Terminologien

Die nachfolgenden Definitionen basieren auf [Bibel et al. 93]. Es wird die Syntax und Semantik einer Terminologie beschrieben, die die Grundlage für die begriffliche Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen in dieser Arbeit darstellt.

Begriffsbeschreibung

$\lambda x.[\text{Fahrspur}(x)]$
$\lambda x.[\text{Pfeilmarkierung}(x)]$
$\lambda x.[\text{Richtungsweisung}(x)=\text{geradeaus}]$
$\lambda x.[\text{Pfeilmarkierung}(x) \wedge \text{Richtungsweisung}(x)=\text{geradeaus}]$
$\lambda x.\exists y[x \text{ hat_aufgebracht } y \wedge [\text{Pfeilmarkierung}(y) \wedge \text{Richtungsweisung}(y)=\text{geradeaus}]]$
$\lambda x.[\text{Fahrspur}(x) \wedge \exists y[x \text{ hat_aufgebracht } y \wedge [\text{Pfeilmarkierung}(y) \wedge \text{Richtungsweisung}(y)=\text{geradeaus}]]]$

Tabelle 3.1a: Begriffsbeschreibungen in ausführlicher λ -Notation.

Begriffsbeschreibung

Fahrspur
Pfeilmarkierung
Richtungsweisung:geradeaus
(Pfeilmarkierung \cap Richtungsweisung:geradeaus)
$\exists \text{hat_aufgebracht}.$ (Pfeilmarkierung \cap Richtungsweisung:geradeaus)
Fahrspur \cap $\exists \text{hat_aufgebracht}.$ (Pfeilmarkierung \cap Richtungsweisung:geradeaus)

Tabelle 3.1b: Begriffsbeschreibungen in verkürzter Schreibweise.

Tabelle 3.1: Beide Tabellen zeigen Beispiele für Begriffsbeschreibungen. Bei Tabelle 3.1a wird die ausführliche λ -Notation verwendet, während dieselben Ausdrücke in Tabelle 3.1b mit der verkürzten Schreibweise nach Definition 3.2 dargestellt sind. Als elementare Begriffe werden *Fahrspur* sowie *Pfeilmarkierung*, als Rolle *hat_aufgebracht*, als Eigenschaft *Richtungsweisung* und als Wert *geradeaus* verwendet. Die Verknüpfung der Begriffsbeschreibungen erfolgen nach den Regeln der Definition 3.2.

3.1.1 Syntax einer Terminologie

Definition 3.1 Ein *Wert* ist eine Konstante, wobei Konstanten als nullstellige Funktionszeichen angesehen werden.

Eine *Eigenschaft* E ist ein einstelliges Funktionszeichen.

Ein *Begriff* B ist ein einstelliges Prädikatzeichen.

Eine *Rolle* R ist ein Bezeichner für eine Relation.

Definition 3.2 Eine *Begriffsbeschreibung* ist eine Vorschrift zur Verknüpfung von Begriffen, bei der auch Rollen und Eigenschaften verwendet werden können.

Seien N_B eine Menge von *Begriffen*, N_R eine Menge von *Rollen*, N_E eine Menge von *Eigenschaften* und N_W eine Menge von *Werten*. Die Menge aller *Begriffsbeschreibungen* ist definiert als die kleinste Menge, für die gilt:

- Jeder Begriff $B \in N_B$ ist eine *Begriffsbeschreibung*.

- Ist $E \in N_E$ und $c \in N_W$, dann ist auch $\lambda x.[E(x) = c]$ (kurz $E : c$) eine Begriffsbeschreibung.
- Wenn $\lambda x.KB_1(x)$ (kurz KB_1) und $\lambda x.KB_2(x)$ (kurz KB_2) Begriffsbeschreibungen sind, dann sind auch $\lambda x.[KB_1(x) \wedge KB_2(x)]$ (kurz $KB_1 \cap KB_2$), $\lambda x.[KB_1(x) \vee KB_2(x)]$ (kurz $KB_1 \cup KB_2$) und $\lambda x.[\neg KB_1(x)]$ (kurz $\neg KB_1$) Begriffsbeschreibungen.
- Wenn $\lambda y.[KB(y)]$ (kurz KB) eine Begriffsbeschreibung und R eine Rolle ist, also $R \in N_R$, dann sind $\lambda x.\exists y[xRy \wedge KB(y)]$ und $\lambda x.\forall y[xRy \rightarrow KB(y)]$ (kurz $\exists R.KB$ und $\forall R.KB$) Begriffsbeschreibungen.

3.1.2 Semantik einer Terminologie

Definition 3.3 Eine *Interpretation* \mathcal{I} besteht aus einem *Interpretationsbereich* Δ und einer *Interpretationsfunktion* $\cdot^{\mathcal{I}}$. Die Elemente des Interpretationsbereiches sind Individuen, die im Falle eines Bildauswertungssystems von Erkennungsroutinen bereitgestellt werden. Beim Vorgang der *Ausprägung* wird einem Begriff ein Individuum des Interpretationsbereiches zugeordnet.

Definition 3.4 Die Elemente der Menge $\{wahr, falsch\}$ heißen *Wahrheitswerte*.

Definition 3.5 Für die *Interpretation von Begriffsbeschreibungen* unter der Interpretation $\mathcal{I} = (\Delta, \cdot^{\mathcal{I}})$ gelten die folgenden Regeln:

1. Für einen Wert c gilt $c^{\mathcal{I}} \in \Delta$.
2. Eine Eigenschaft E mit dem Definitionsbereich $D \subseteq \Delta$ wird als partielle Funktion über Δ interpretiert: $E^{\mathcal{I}} : D \rightarrow \Delta$.
3. Sei E eine Eigenschaft und c ein Wert, dann gilt für die Interpretation von $[E : c]$: $[E : c]^{\mathcal{I}} = \{d \in D \mid E^{\mathcal{I}}(d) = c^{\mathcal{I}}\}$.
4. Die Interpretation $B^{\mathcal{I}}$ eines Begriffs B ist definiert durch: $B^{\mathcal{I}} = \{d \in \Delta \mid B^{\mathcal{I}}(d) = wahr\}$.
5. Eine Rolle R wird als Relation über $\Delta \times \Delta$ interpretiert: $R^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta \times \Delta$.
6. Sei R eine Rolle. Für die Interpretation $[xRy]^{\mathcal{I}}$ gilt: $[xRy]^{\mathcal{I}} = \{\langle x^{\mathcal{I}}, y^{\mathcal{I}} \rangle \in \Delta \times \Delta \mid \langle x^{\mathcal{I}}, y^{\mathcal{I}} \rangle \in R^{\mathcal{I}}\}$.

Für die Interpretation der *Verknüpfungen* von Begriffsbeschreibungen KB , KB_1 und KB_2 unter der Interpretation $\mathcal{I} = (\Delta, \cdot^{\mathcal{I}})$ folgt damit:

$$[KB_1 \cap KB_2]^{\mathcal{I}} = KB_1^{\mathcal{I}} \cap KB_2^{\mathcal{I}},$$

$$\begin{aligned}
[KB_1 \cup KB_2]^{\mathcal{I}} &= KB_1^{\mathcal{I}} \cup KB_2^{\mathcal{I}}, \\
[\neg KB]^{\mathcal{I}} &= \Delta \setminus KB^{\mathcal{I}}, \\
[\exists R.KB]^{\mathcal{I}} &= \{d \in \Delta \mid (\{e \in \Delta \mid \langle d, e \rangle \in R^{\mathcal{I}}\} \cap KB^{\mathcal{I}}) \neq \emptyset\}, \\
[\forall R.KB]^{\mathcal{I}} &= \{d \in \Delta \mid \{e \in \Delta \mid \langle d, e \rangle \in R^{\mathcal{I}}\} \subseteq KB^{\mathcal{I}}\}.
\end{aligned}$$

Definition 3.6 Ein *terminologisches Axiom* hat die Form $B = KB$ oder $B \subseteq KB$, wobei B ein Begriff und KB eine Begriffsbeschreibung ist.

Beispiel. Mit den Begriffsbeschreibungen der Tabelle 3.1 lässt sich der Begriff *Geradeausspur* durch folgendes terminologisches Axiom definieren:

Geradeausspur = Fahrspur \cap \exists hat_aufgebracht. (Pfeilmarkierung \cap Richtungsweisung:geradeaus)

Definition 3.7 Eine *Terminologie* ist eine Konjunktion von terminologischen Axiomen, wobei jeder Begriff höchstens einmal auf der linken Seite eines terminologischen Axioms auftritt.

Definition 3.8 Ein *Weltaxiom* hat die Form $B(a)$, $b R a$ oder $E(a) = b$ wobei B ein Begriff, R eine Rolle, E eine Eigenschaft und a, b Bezeichner für Konstanten sind. Unter einer Interpretation \mathcal{I} werden $a^{\mathcal{I}}, b^{\mathcal{I}}$ als *Individuenkonstanten* bezeichnet.

Definition 3.9 Eine *Weltbeschreibung* ist eine Menge von Weltaxiomen. Sie dient der Beschreibung einer bestimmten Welt unter Verwendung einer Terminologie.

Zusammenhänge zwischen Terminologie, Weltbeschreibung, Interpretation. Eine Terminologie stellt eine generische Beschreibung dar, mit deren Hilfe Begriffe durch Begriffsbeschreibungen und terminologische Axiome definiert und strukturiert werden. Eine Weltbeschreibung nutzt eine Terminologie, um den konkreten Ausschnitt einer bestimmten Welt zu beschreiben. Dabei werden – repräsentiert durch Konstanten – zum einen Bezeichner für Objekte zu Begriffen und Rollen zugeordnet und zum anderen Bezeichner zur Beschreibung von Eigenschaften verwendet¹. Eine Interpretation bestimmt dabei einen *Aspekt* der Weltbeschreibung. Beispielsweise können zur Auswertung derselben Szene, die mit zwei unterschiedlichen Kameraperspektiven aufgenommen wurde, zwei unterschiedliche Interpretationen derselben Weltbeschreibung herangezogen werden.

Erkennungsroutinen. Es wurde definiert, dass Erkennungsroutinen die Individuen des Interpretationsbereiches bereitstellen. Damit müssen Erkennungsroutinen in der Lage sein, von Teilen einer Bildfolge zu abstrahieren und das Ergebnis der Abstraktion Individuenkonstanten zuzuordnen. Darüberhinaus machen es Aufnahmen einer Bildfolge aus unterschiedlichen Richtungen notwendig, dass Erkennungsroutinen aspektspezifische Charakteristiken der Objektabbildung auswerten.

¹Es wird hier von *Objekten* und nicht von *Individuen* gesprochen, weil nur im Zusammenhang mit einer Interpretation eine Menge von Individuen definiert ist.

3.2 Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen

Für die nachfolgenden Begriffe werden Erkennungsroutinen bereitgestellt. Im vorliegenden Falle werden Bildfolgen zugrundegelegt, die mit einer stationär angebrachten Kamera aufgenommen wurden, und einen hinreichend langen Zeitraum einer innerstädtischen Straßenkreuzung zeigen, wobei Verdeckungen durch statische Komponenten hinsichtlich der repräsentierten Kreuzungsstruktur nicht in beeinträchtigender Weise auftreten:

1. Fahrspur

Fahrspuren gliedern eine Kreuzung. Auf ihnen fahren die Fahrzeuge, für die eine Kreuzungsstruktur aufgebaut wurde. Eine weitere Aufgliederung der Beschreibung einer Fahrspur ist im vorliegenden Falle nicht sinnvoll, da sie keine weitere für die Bildauswertung bei Kreuzungsszenen wichtige Erkenntnis über die Kreuzungsstruktur liefern würde.

2. Markierung

Neben den Fahrspuren geben Fahrbahnmarkierungen Aufschluss über die Struktur einer Kreuzung. Während Fahrstreifenbegrenzungslinien Fahrstreifen/Fahrspuren begrenzen, geben die anderen Markierungen weitere Hinweise auf die Kreuzungsstruktur: Beispielsweise geben Pfeilmarkierungen an, welche Fahrrichtungen bei den betroffenen Fahrspuren erwartet werden. Fußgängerüberwege zeigen an, dass Fußgängerwege an die Fahrspuren angrenzen. Fußgängerfurte geben darüberhinaus den Hinweis, dass die Regelung der Überquerung durch Signalanlagen erfolgt.

Auch die Interpretation von Rollen und Eigenschaften muss bereitgestellt werden. Es werden, im Hinblick auf die Implementierung der oben genannten Erkennungsroutinen, die Interpretation der nachfolgenden Rollen und Eigenschaften realisiert:

1. a ist_Teil_von b

Diese Rolle ist erfüllt, wenn ein Individuum b aus mehreren Teilen zusammengesetzt ist und a ein Individuum bezeichnet, das zur Menge der Teile von b gehört.

2. a hat_Teil b

Diese Rolle ist erfüllt, wenn ein Individuum a aus mehreren Teilen zusammengesetzt ist und b ein Individuum bezeichnet, das zur Menge der Teile von a gehört. Damit gilt:

a hat_Teil $b \equiv b$ ist_Teil_von a .

3. a hat_aufgebracht b

Diese Rolle ist eine Spezialisierung der hat_Teil-Relation und bringt zum Ausdruck, dass Markierungen b auf die Fahrbahn a aufgebracht werden. Es gilt also:

a hat_aufgebracht $b \Rightarrow a$ hat_Teil b .

Bei der Interpretation ist zu beachten, dass die Transitivität erfüllt wird. So ist

durchaus denkbar, dass auf Markierungen weitere Zeichen/Symbole aufgebracht werden.

4. *a kreuzt b*

Zwei Individuen *a*, *b* vom Typ² Fahrspur erfüllen die Rolle “kreuzt”, wenn sie sich unter einem Mindestwinkel schneiden. Ein solcher Mindestwinkel ist notwendig, da beispielsweise Einfädelspuren ebenfalls im Einmündungsbereich Fahrspuren schneiden, jedoch in einem sehr flachen Winkel, der bei sich schneidenden Fahrspuren im Kreuzungsbereich deutlich überschritten wird.

5. *a fuehrt_hin_zu b*

Diese Rolle ist erfüllt, wenn ein Individuum *a* vom Typ Fahrspur an ein Individuum *b* vom Typ Fahrspur angrenzt. Dabei liegt in Fahrtrichtung *a* vor *b*.

6. *a folgt_nach b*

Diese Rolle ist erfüllt, wenn ein Individuum *a* vom Typ Fahrspur an ein Individuum *b* vom Typ Fahrspur angrenzt. Dabei liegt in Fahrtrichtung *b* vor *a*.

7. Richtungsweisung

Diese Eigenschaft ist nur für Individuen definiert, mit denen der Begriff Pfeilmarkierung ausgeprägt werden kann.

Zusammenhang von Weltbeschreibung und Erkennungsroutinen. Erkennungsroutinen stellen Individuen bereit, für die im einzelnen überprüft werden muss, ob sie eine *gegebene* Weltbeschreibung erfüllen.

3.2.1 Taxonomie

In Tabelle 3.2 ist eine einfache Taxonomie von Begriffen zur Beschreibung von innerstädtischen Straßenkreuzungen aufgelistet. Der allgemeinste Begriff ist dabei der Begriff *Gegenstand*. Auch wenn diese Taxonomie deutlich erweitert werden kann, sind die wesentlichen Elemente zur Beschreibung einer innerstädtischen Straßenkreuzung bereits enthalten. Dazu zählen in erster Linie die Begriffe *Fahrspur*, *Strichmarkierung* und *Pfeilmarkierung*.

3.2.2 Teil-von-Hierarchie

Eine *Kreuzung* kann aus mehreren Teilen zusammengesetzt werden. So sind beispielsweise die *Kreuzungsarme* und der *Kreuzungsbereich* Teil einer *Kreuzung*. *Kreuzungsarme* ihrerseits bestehen wiederum aus *Fahrspuren*. In der Tabelle 3.3 sind Teil-von-Beziehungen der Komponenten innerstädtischer Straßenkreuzungen aufgelistet.

²Einem Individuum wird ein *Typ* mit der Bezeichnung eines definierten Begriffs zugeordnet, wenn der zugehörige Begriff mit dem benannten Individuum ausgeprägt werden kann.

Begriff	zugeordneter Oberbegriff
Gegenstand	
Fahrspur	Gegenstand
Markierung	Gegenstand
Strichmarkierung	Markierung
Pfeilmarkierung	Markierung
Fahrstreifenbegrenzungslinie	Strichmarkierung
Geradeauspfeil	Pfeilmarkierung
Linkspfeil	Pfeilmarkierung
Rechtspfeil	Pfeilmarkierung
Linksabbiegespur	Fahrspur
Geradeausspur	Fahrspur
Rechtsabbiegespur	Fahrspur
Kreuzungsweg	Fahrspur
Kreuzungszufahrt	Gegenstand
Kreuzungsabfahrt	Gegenstand
Kreuzungsarm	Gegenstand
Kreuzungsbereich	Gegenstand
Kreuzung	Gegenstand

Tabelle 3.2: In dieser Tabelle ist eine einfache Taxonomie zur Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen aufgelistet. Der allgemeinste Begriff ist dabei der Begriff *Gegenstand*.

Begriff	ist Teil von
Kreuzungsarm	Kreuzung
Kreuzungsbereich	Kreuzung
Kreuzungsweg	Kreuzungsbereich
Fahrspur	Kreuzungsarm
Fahrspur	Kreuzungszufahrt
Fahrspur	Kreuzungsabfahrt
Linkspfeil	Linksabbiegespur
Rechtspfeil	Rechtsabbiegespur
Geradeauspfeil	Geradeausspur

Tabelle 3.3: In dieser Tabelle ist eine Teil-von-Hierarchie zur Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen aufgelistet. Für die Pfeilmarkierungen *Links-*, *Rechts-*, *Geradeauspfeil* und den zugeordneten Fahrspuren *Linksabbiegespur*, *Rechtsabbiegespur*, *Geradeausspur* gilt dabei sowohl die *hat_aufgebracht* als auch die *ist_Teil_von*-Beziehung.

Begriff	Begriffsbeschreibung
Gegenstand	
Fahrspur	\subseteq Gegenstand
Markierung	\subseteq Gegenstand
Strichmarkierung	\subseteq Markierung
Pfeilmarkierung	$=$ Markierung \cap Richtungsweisung: (links \cup geradeaus \cup rechts)
Fahrstreifenbegrenzungslinie	\subseteq Strichmarkierung
Geradeauspfeil	$=$ Pfeilmarkierung \cap Richtungsweisung:geradeaus
Linkspfeil	$=$ Pfeilmarkierung \cap Richtungsweisung:links
Rechtspfeil	$=$ Pfeilmarkierung \cap Richtungsweisung:rechts
Linksabbiegespur	$=$ Fahrspur \cap \exists hat_aufgebracht.Linkspfeil
Geradeausspur	$=$ Fahrspur \cap \exists hat_aufgebracht.Geradeauspfeil
Rechtsabbiegespur	$=$ Fahrspur \cap \exists hat_aufgebracht.Rechtspfeil
Kreuzungsweg	$=$ Fahrspur \cap \exists kreuzt.Fahrspur
Kreuzungszufahrt	$=$ Fahrspur \cap \exists fuehrt_hin_zu.Kreuzungsweg
Kreuzungsabfahrt	$=$ Fahrspur \cap \exists folgt_nach.Kreuzungsweg
Kreuzungsarm	$=$ Gegenstand \cap \forall hatTeil.Fahrspur
Kreuzungsbereich	$=$ Gegenstand \cap \forall hatTeil.Kreuzungsweg
Kreuzung	$=$ Gegenstand \cap \forall hatTeil.(Kreuzungsbereich \cup Kreuzungsarm)

Tabelle 3.4: Diese Terminologie beschreibt in einfacher Form die grundlegende Struktur innerstädtischer Straßenkreuzungen.

3.2.3 Terminologie

Aus der in Tabelle 3.2 beschriebenen Taxonomie und der in Tabelle 3.3 dargestellten Teilvon-Hierarchie lässt sich eine einfache Terminologie zur Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen ableiten, wie sie beispielsweise in der Tabelle 3.4 formuliert ist.

Kapitel 4

Geometrische Beschreibung - Erkennungsroutinen

4.1 Fahrspur

Die Struktur innerstädtischer Straßenkreuzungen ist durch die Kombination von Fahrspuren und deren Verlauf gekennzeichnet. Wir unterscheiden zwischen *gekrümmten* und *geradlinigen* Fahrspuren. Gekrümmte Fahrspuren, insbesondere aber Abbiegespuren, werden nach den Richtlinien zur Anlage von Stadtstraßen in Form von Klothoiden konstruiert. Klothoiden werden im Straßenbau so eingesetzt, dass die Geschwindigkeit der Fahrzeuge aufgrund der stetigen Verengung des Kurvenradius zur Verringerung der Fliehkräfte gedrosselt werden muss. Der im Stadtbereich zur Verfügung stehende Platz ist jedoch begrenzt und die auftretenden Geschwindigkeiten der Fahrzeuge sind so gering, dass sich die Klothoiden von Kreisbögen nur geringfügig unterscheiden. Fahrspuren werden meist geradlinig an Kreuzungen heran- und wieder weggeführt, sodass deren Verlauf näherungsweise durch *Hyperbeln* beschrieben werden kann. Sie besitzen im Gegensatz zu elliptischen und parabolischen Kegelschnitten Asymptoten, die mit den zu- und wegführenden Armen einer gekrümmten Fahrspur assoziiert werden können. Es wird sich zeigen, dass die Näherung der Fahrspuren durch Hyperbeln für die Zwecke dieser Arbeit hinreichend gut ist. Die gleiche Beobachtung gilt für die Fahrspurbegrenzung, sodass hier der Ansatz verfolgt wird, eine Fahrspur durch ein *Hyperbelband* zu repräsentieren.

4.1.1 Beschreibung gekrümmter Fahrspuren

In den nachfolgenden Abschnitten wird die Beschreibung von Fahrspuren mittels Hyperbelbändern entwickelt. Deshalb soll zunächst kurz auf den Kegelschnitt *Hyperbel* eingegangen werden. Ausführlichere Beschreibungen und Eigenschaften von *Quadriken* erfolgen im Anhang A, insbesondere werden im Abschnitt A.2 Hyperbeln diskutiert.

Nach Gleichung A.8 kann eine Hyperbel H durch die Matrix

$$\mathcal{H} = \begin{bmatrix} A & B/2 & D/2 \\ B/2 & C & E/2 \\ D/2 & E/2 & F \end{bmatrix}$$

festgelegt werden (s. a. Definition A.1). Für die Elemente $\mathbf{x} \in H$ mit $\mathbf{x} = (x, y)^T$ erhält man die ausgeschriebene Form:

$$(\mathbf{x}^T, 1) \mathcal{H} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ 1 \end{pmatrix} = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0.$$

Ist \mathbf{m}_H der Mittelpunkt und θ_H die Orientierung von H , so liegt H in ihrem Eigensystem

$$\mathcal{K}_H = \left\{ \mathbf{m}_H, \left[\begin{pmatrix} \cos(\theta_H) \\ \sin(\theta_H) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\sin(\theta_H) \\ \cos(\theta_H) \end{pmatrix} \right] \right\}$$

in *Normalform* vor, sodass die Hyperbel H mit den *Form-* oder *Halbachsenparametern* a_H , b_H durch

$$\frac{x_H^2}{a_H^2} - \frac{y_H^2}{b_H^2} = 1 \quad (4.1)$$

beschrieben werden kann (s. a. Abbildung 4.1). Zur vollständigen Beschreibung von H reichen also die Parameter $a_H, b_H, \mathbf{m}_H, \theta_H$ aus. Im Koordinatensystem \mathcal{K}_H hat die Matrix \mathcal{H} Diagonalform:

$$\mathcal{H} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_H^2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{b_H^2} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}_{\mathcal{K}_H}. \quad (4.2)$$

Eine Hyperbel H mit den Parametern $a_H, b_H, \mathbf{m}_H, \theta_H$ nähert sich zwei Asymptoten T_1 und T_2 , die den *Öffnungswinkel* η_H mit $\tan(\eta_H) = b_H/a_H$ besitzen und sich im Mittelpunkt \mathbf{m}_H schneiden. Die Hyperbel H schneidet die x -Achse des Eigensystems in den Scheitelpunkten.

Eine Hyperbel besitzt zwei zum Mittelpunkt punktsymmetrische Hyperbeläste. Für die Beschreibung von Fahrspurberandungen wird jedoch nur einer der beiden Hyperbeläste einer Hyperbel H benötigt (s. a. Abbildung 4.2). Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit o. B. d. A. nur der Hyperbelast einer Hyperbel H verwendet, der die x -Achse des Eigensystems \mathcal{K}_H im positiven Bereich schneidet (s. a. Abbildung 4.1). Dieser Hyperbelast wird des Weiteren in einen positiven und einen negativen Halbast untergliedert, wobei der positive Halbast positive und der negative Halbast negative y -Koordinaten im Eigensystem \mathcal{K}_H besitzt. Werden diese Halbbäste in Bezug zur Fahrtrichtung einer Fahrspur gesetzt, wird nachfolgend von *einlaufenden* bzw. *auslaufenden* Ästen gesprochen. Einlaufende Äste führen den Verkehr zur Kreuzung hin und auslaufende Äste von der Kreuzung weg.

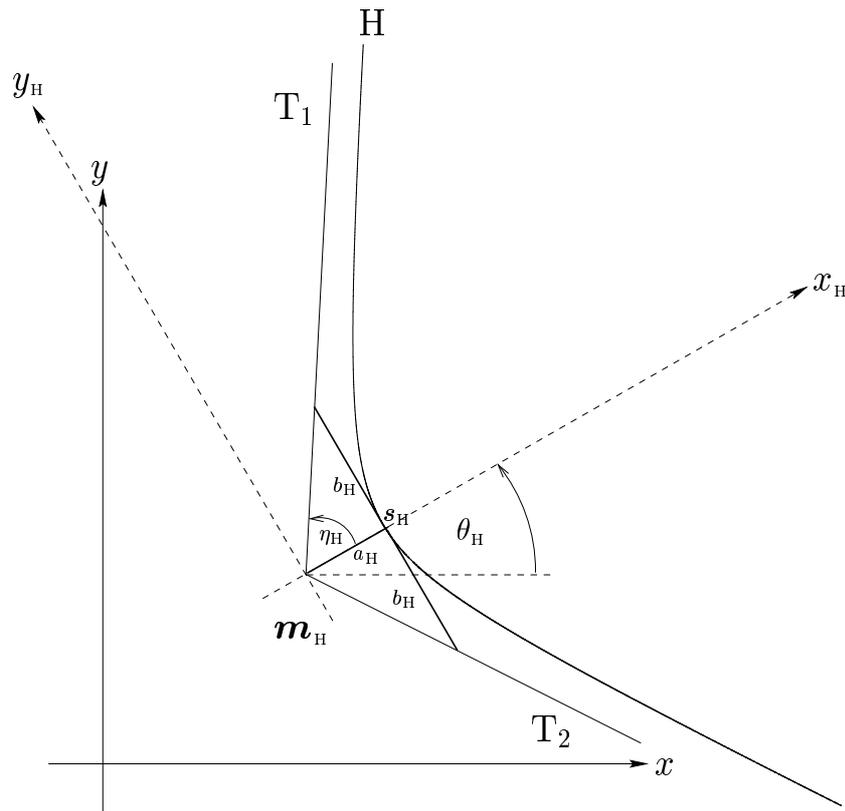


Abbildung 4.1: Dargestellt ist nur der Hyperbelast von H , der die x_H -Achse des Eigensystems \mathcal{K}_H im positiven Bereich schneidet. Die Hyperbel H besitzt den Mittelpunkt \mathbf{m}_H , den Scheitelpunkt \mathbf{s}_H und die Orientierung θ_H . Die Achse x_H ist die erste, die Achse y_H die zweite Halbachse von H . Die Asymptoten T_1 und T_2 bestimmen sich durch die Formparameter a_H , b_H . Für den Öffnungswinkel η_H gilt: $\tan(\eta_H) = b_H/a_H$.

Definition 4.1 Die Hyperbel mit dem Parametersatz $(a_H, b_H, \mathbf{m}_H, \theta_H)$ wird mit $H(a, b, \mathbf{m}, \theta)$ bezeichnet, wobei a , b die Form, $\mathbf{m} = (m_x, m_y)^T$ den Mittelpunkt und θ die Orientierung der Hyperbel H bestimmen. Das Eigensystem von H wird mit \mathcal{K}_H , die zu H gehörende Matrix mit \mathcal{H} , der auf der positiven Halbachse liegende Scheitelpunkt mit \mathbf{s}_H und der Öffnungswinkel mit η_H bezeichnet.

4.1.1.1 Hyperbelband im Szenenbereich

Eine Fahrspur wird seitlich durch *Fahrspurberandungen* begrenzt. Diese Fahrspurberandungen verlaufen parallel zueinander. Nach den einführenden Überlegungen zu diesem Abschnitt sollen nun die Fahrspurberandungen durch ein Paar Hyperbeln beschrieben werden, deren Asymptoten parallel verlaufen. Dabei soll berücksichtigt werden, dass die ein- bzw. auslaufenden Arme einer Fahrspur unterschiedliche Breiten aufweisen können. Ein solches Paar von Hyperbeln wird nachfolgend in Definition 4.2 als *Hyperbelband* be-

zeichnet. Zur Konstruktion eines Hyperbelbandes wird eine Hyperbel herangezogen, die in der Mitte des Hyperbelbandes verläuft und *Rückgrathyperbel* genannt wird (s. a. Abbildung 4.2). Weitere Hinweise zur Bestimmung eines Hyperbelbandes findet man im Anhang B.1.

Definition 4.2 Ein *Hyperbelband* $H_1|_G H_2$ besteht aus der *Rückgrathyperbel* $G:=H(a, b, \mathbf{m}, \theta)$ und den Hyperbeln $H_1(p_1 \cdot a_G, p_1 \cdot b_G, \mathbf{m}_1, \theta_G)$, $H_2(p_2 \cdot a_G, p_2 \cdot b_G, \mathbf{m}_2, \theta_G)$. Dabei beträgt der Abstand der Asymptoten von H_1 und G sowie der Asymptoten von G und H_2 bei den jeweils negativen Halbästen d_1 und bei den jeweils positiven Halbästen d_2 . Zusätzlich besitzen die Scheitelpunktabstände von H_1 und G sowie die Scheitelpunktabstände von G und H_2 den Betrag $\tau \cdot \frac{d_1+d_2}{2}$. Die Hyperbeln H_1 und H_2 werden *Begrenzungshyperbeln* und der Parameter τ wird *Dehnungsparameter* genannt. Für $H_1|_G H_2$ kann auch kurz $H_1|H_2$ geschrieben werden, wenn der Bezug zur Rückgrathyperbel nicht notwendig ist.

Nach dieser Definition sind die Begrenzungshyperbeln H_1 und H_2 des Hyperbelbandes $H_1|_G H_2$ keine Translate der Rückgrathyperbel G : Vergrößert man den Dehnungsparameter τ , wächst der Scheitelpunktabstand von H_1 und G sowie von G und H_2 . Der Scheitelpunkt von H_1 nähert sich dabei dem Mittelpunkt \mathbf{m}_1 , während sich der Scheitelpunkt von H_2 vom Mittelpunkt \mathbf{m}_2 entfernt. Der Öffnungswinkel und die Lage der Hyperbeln H_1 und H_2 ändern sich dabei im Gegensatz zur ihrer Form nicht. Mit dieser Eigenschaft lässt sich die in den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen vorgesehene Verbreiterung von Fahrspuren im Kurvenbereich für ausschwenkende Fahrzeuge berücksichtigen.

Nach Definition 4.1 ist eine Hyperbel mit fünf Parametern festgelegt. Für ein Hyperbelband $H_1|_G H_2$ müssen für die Hyperbeln H_1 , H_2 und G insgesamt 15 Parameter angenommen werden, wenn diese Hyperbeln als voneinander unabhängig angesehen werden. Die Hyperbeln H_1 und H_2 können jedoch mit den in Definition 4.2 getroffenen Festlegungen von der Rückgrathyperbel G abgeleitet werden, sodass die Anzahl der Parameter reduziert werden kann. Die nachfolgenden Festlegungen beziehen sich dabei auf das Eigensystem \mathcal{K}_G :

- *Orientierung*: Alle Hyperbeln haben dieselbe Orientierung θ_G . Dadurch verringert sich die Anzahl der Parameter von 15 auf 13.
- *Form*: Jede Hyperbel besitzt ein Asymptotenpaar. Diese Asymptoten beschreiben den geradlinigen Teil der Fahrspuren. Aufgrund der Definition 4.2 haben alle Hyperbeln denselben Öffnungswinkel η . Dadurch reduziert sich die Anzahl der Parameter um zwei auf 11 Parameter.
- *Position*: Die Fahrspurbreiten des ein- und des auslaufenden Armes einer Fahrspur können unterschiedlich sein. Dies wird mit den Parametern d_1 und d_2 berücksichtigt. In Abbildung 4.2 ist skizziert, wie sich die Mittelpunkte \mathbf{m}_1 und \mathbf{m}_2 konstruieren

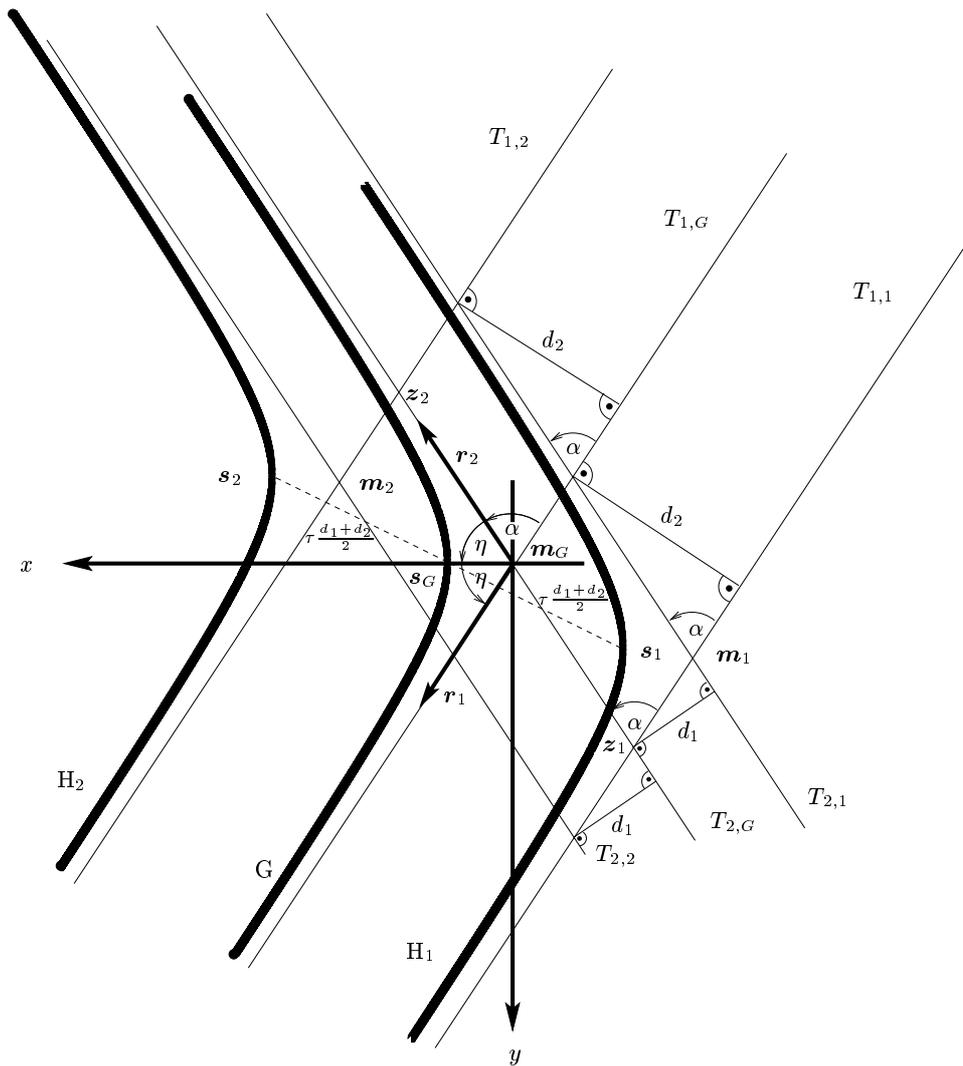


Abbildung 4.2: Das Hyperbelband $H_1|_G H_2$ kann ausgehend von der Rückgrathyperbel G konstruiert werden. Das Koordinatensystem ist so festgelegt, dass G in Normalform vorliegt. $T_{1,1}$, $T_{1,2}$, $T_{1,G}$ mit Richtung r_1 und $T_{2,1}$, $T_{2,2}$, $T_{2,G}$ mit Richtung r_2 sind die Asymptoten, m_1 , m_2 , m_G die Mittelpunkte und s_1 , s_2 , s_G die Scheitelpunkte der Hyperbeln H_1 , H_2 und G . Das Symbol d_2 bezeichnet den Abstand zwischen den Asymptoten $T_{1,1}$, $T_{1,G}$ sowie $T_{1,2}$, $T_{1,G}$ und das Symbol d_1 den Abstand zwischen den Asymptoten $T_{2,1}$, $T_{2,G}$ sowie $T_{2,2}$, $T_{2,G}$. Der Öffnungswinkel η ist durch den Richtungskoeffizienten der Asymptoten $\tan(\eta) = b/a$ festgelegt. Mit dem Winkel $\alpha = \pi - 2\eta$, den Abständen d_1 , d_2 und den normierten Richtungsvektoren der Asymptoten lassen sich die Vektoren $m_G \vec{z}_1$, $z_1 \vec{m}_1$ und damit der Mittelpunkt m_1 eindeutig bestimmen. Gleiches gilt für die Vektoren $m_G \vec{z}_2$, $z_2 \vec{m}_2$ und den Mittelpunkt m_2 . Der Abstand zwischen den Scheitelpunkten s_1 , s_G und s_2 (gestrichelte Linie) hat den Betrag $\tau \frac{d_1+d_2}{2}$.

lassen. Nach Satz B.1 haben die Mittelpunkte die Werte:

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_1 &= - \begin{pmatrix} (d_1 + d_2)/(2 \sin(\eta)) \\ (d_1 - d_2)/(2 \cos(\eta)) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}_G}, \\ \mathbf{m}_2 &= \begin{pmatrix} (d_1 + d_2)/(2 \sin(\eta)) \\ (d_1 - d_2)/(2 \cos(\eta)) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}_G}. \end{aligned}$$

Mit dieser Konstruktion verringert sich die Parameterzahl auf 9 Parameter.

- *Scheitelpunkt:* Der letzte freie Parameter definiert die Position des Scheitelpunktes. Mit dieser Position wird zusätzlich bestimmt, wie spitz eine Hyperbel ausfällt, da der Mittelpunkt, die Orientierung und der Öffnungswinkel festgelegt sind. Eine Hyperbel G in Normalform (s. Gleichung 4.1) hat den Scheitelpunkt $(a_G, 0)_{\mathcal{K}_G}^T$. Multipliziert man diesen Ortsvektor mit dem Faktor p , so bewegt sich der Scheitelpunkt entlang der x -Achse: $(p \cdot a_G, 0)_{\mathcal{K}_G}^T$. Die Form der Hyperbel bleibt erhalten, wenn der Parameter b_G mit demselben Faktor p multipliziert wird. Der Öffnungswinkel η bleibt dabei ebenfalls erhalten, da $\tan(\eta) = (p \cdot b_G)/(p \cdot a_G) = b_G/a_G$ gilt. Der Abstand zwischen den Scheitelpunkten \mathbf{s}_1 und \mathbf{s}_G sowie \mathbf{s}_2 und \mathbf{s}_G ist nach Definition 4.2 festgelegt durch

$$\|\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_G\| = \|\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_G\| = \tau \cdot \frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (4.3)$$

Mit dem Dehnungsparameter τ kann die Fahrspurbreite im Bereich der Scheitelpunkte durch Werte $\tau \geq 1$ vergrößert werden. Für die Formparameter $p_1 \cdot a_G$ und $p_2 \cdot a_G$ der Hyperbeln H_1 und H_2 erhält man nach Gleichung 4.3 und Satz B.1:

$$\begin{aligned} p_1 \cdot a_G &= a_G + \frac{d_1 + d_2}{2 \sin(\eta)} - \sqrt{\left(\tau \frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_2 - d_1}{2 \cos(\eta)}\right)^2}, \\ p_2 \cdot a_G &= a_G - \left(\frac{d_1 + d_2}{2 \sin(\eta)} - \sqrt{\left(\tau \frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_2 - d_1}{2 \cos(\eta)}\right)^2}\right). \end{aligned}$$

Für die Scheitelpunkte der Hyperbeln H_1 und H_2 erhält man damit:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_1 &= \mathbf{m}_1 + (p_1 \cdot a_G, 0)_{\mathcal{K}_G}^T, \\ \mathbf{s}_2 &= \mathbf{m}_2 + (p_2 \cdot a_G, 0)_{\mathcal{K}_G}^T. \end{aligned}$$

Mit diesen Annahmen lassen sich die ursprünglichen 15 Parameter auf 8 reduzieren. Ein Hyperbelband $H_1|_G H_2$ mit den Asymptotenabständen d_1 , d_2 und dem Dehnungsparameter τ kann mit dem Parametersatz

$$(a_G, b_G, \mathbf{m}_G, \theta_G, d_1, d_2, \tau)$$

eindeutig beschrieben werden. In Tabelle 4.1 sind die Bindungen der Parameter im einzelnen aufgeführt.

Art der Bindung	Hyperbel G		Hyperbel H ₁		Hyperbel H ₂		Anzahl
	Form	Lage	Form	Lage	Form	Lage	
Keine Bindung	a_G	$m_{G,x}$	a_1	$m_{1,x}$	a_2	$m_{2,x}$	15
Orientierung	b_G	$m_{G,y}$	b_1	$m_{1,y}$	b_2	$m_{2,y}$	13
Form	a_G	$m_{G,x}$	a_1	$m_{1,x}$	a_2	$m_{2,x}$	11
Lage	b_G	$m_{G,y}$	$p_1 \cdot a_G$	$m_{1,y}$	$p_2 \cdot a_G$	$m_{2,y}$	9
Scheitel	a_G	$m_{G,x}$	$p_1 \cdot b_G$	m_{G,d_1,d_2}, θ_G	$p_2 \cdot b_G$	m_{G,d_1,d_2}, θ_G	8

Tabelle 4.1: In dieser Tabelle sind die Bindungen aller Parameter der bei einem Hyperbelband verwendeten drei Hyperbeln aufgeführt. Dabei wächst die Bindung der verwendeten Parameter von oben nach unten. In den Spalten stehen jeweils die Parameter, die zur Bestimmung der Form, Lage und Orientierung herangezogen werden müssen. Durch die wachsende Bindung reduziert sich in jedem Schritt die Anzahl der verwendeten Parameter, die in der ganz rechten Spalte angegeben ist. Aufgrund der zugrundeliegenden Symmetrie müssen dabei die Hyperbeln H₁ und H₂ aus denselben Parametern hervorgehen.

4.1.2 Beschreibung geradliniger Fahrspuren

Zur Beschreibung geradliniger Fahrspuren wurden in dieser Arbeit keine eigenen Datenstrukturen in Form zweier paralleler Geraden, sondern als Näherung spezielle Rückgrathyperbeln mit zugehörigen Hyperbelbändern verwendet. Eine solche Rückgrathyperbel muss einen Öffnungswinkel η von annähernd 90° besitzen. Aus numerischen Gründen darf der Scheitelpunkt nicht zu nahe am Mittelpunkt liegen. In dieser Arbeit wurde $a = 100$ und $b = 10000$ gewählt, sodass $\eta = \arctan(b/a) = 89.43^\circ$ gilt. Das Zentrum einer solchen Hyperbel kann durch Wahl der Richtung der Geraden, eines Punktes der Geraden (dieser dient als Scheitelpunkt) und des Parameters a festgelegt werden.

4.1.3 Modellierung von Fahrspurberandungen

Eine Fahrspur wird entweder durch Markierungen oder durch bauliche Maßnahmen wie Bordsteinkanten oder ähnliches begrenzt. Die Abbildungen solcher *Fahrspurberandungen* weisen eine räumliche Ausdehnung auf, sodass für das Modell der Fahrspurberandung ebenfalls ein Hyperbelband definiert wird. Für ein solches Hyperbelband wird ein einheitlicher Asymptotenabstand dw festgelegt und der Dehnungsparameter wird auf $\tau = 1$ gesetzt, sodass die Breite des Fahrspurberandungsmodells einheitlich dw beträgt.

Zur Beschreibung einer Fahrspur mit Fahrspurberandung wird ein Hyperbelband $G_l|_G G_r$ verwendet. Die Hyperbeln G_l und G_r dienen als Rückgrathyperbeln für die Hyperbelbänder des Fahrspurberandungsmodells $G_{l_1}|_{G_l} G_{l_2}$ und $G_{r_1}|_{G_r} G_{r_2}$. Für die Breiten werden die Parameter dw_l und dw_r festgelegt.

Die Abbildung 4.3 skizziert die Konstruktion einer Fahrspurbeschreibung in der Szene mit drei zueinander in Beziehung stehenden Hyperbelbändern unter Berücksichtigung von Fahrspurberandungen mit einer nicht zu vernachlässigenden räumlichen Ausdehnung.

Eine Fahrspur mit Fahrspurberandungen der Breiten dw_l und dw_r kann unter Berücksichtigung des Parametersatzes zur Beschreibung einer Fahrspur durch den Vektor \mathbf{x}

$$\mathbf{x} = (a, b, \mathbf{m}^T, \theta, d_1, d_2, \tau, dw_l, dw_r)^T \quad (4.4)$$

beschrieben werden.

4.1.4 Projektion von Hyperbelbändern

Die Beschreibung einer Fahrspur durch Hyperbelbänder erfolgt im Szenenbereich. Die Anpassung von Hyperbelbändern an Kantenelemente erfolgt jedoch im Bildbereich. Aus diesem Grund wird es notwendig, Hyperbelbänder vom Szenen- in den Bildbereich und umgekehrt zu projizieren. Bei diesen Transformationen werden Hyperbeln wieder in Hyperbeln abgebildet. In den nachfolgenden Abschnitten wird davon ausgegangen, dass die internen und externen Kameraparameter hinreichend genau bekannt sind, um eine Projektion durchführen zu können. Ebenso wird davon ausgegangen, dass die Hyperbelbänder

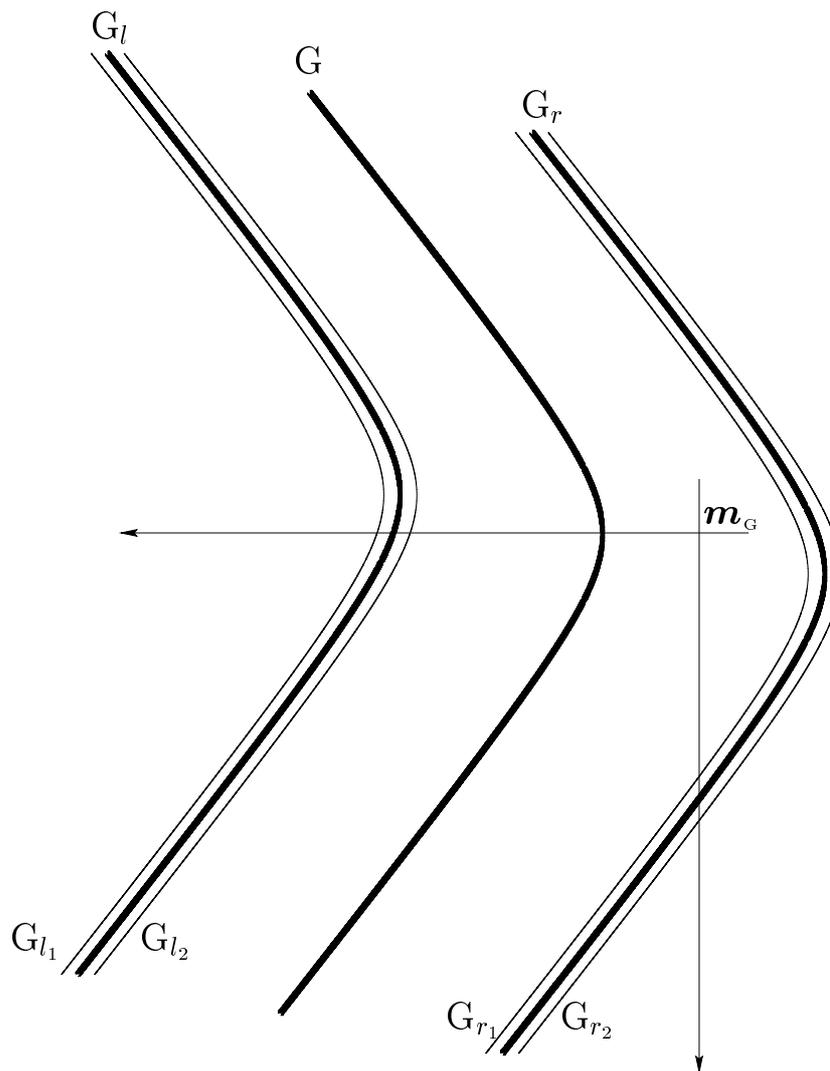


Abbildung 4.3: In dieser Abbildung ist das Modell einer Fahrspur mit rechter und linker Fahrspurberandung skizziert. Es besteht aus den drei Hyperbelbändern $G_{l_1}|_{G_l} G_{l_2}$, $G_{r_1}|_{G_r} G_{r_2}$ und $G_l|_G G_r$, zu denen die dick eingezeichneten Rückgrathyperbeln G_l , G_r und G gehören. Die Konstruktion dieser Hyperbelbänder geht von der Rückgrathyperbel G mit Mittelpunkt m_G aus, zu der die beiden Hyperbeln G_l und G_r bestimmt werden. Zur Beschreibung von Fahrspurberandungen mit einer räumlichen Ausdehnung ungleich Null werden, ausgehend von den Hyperbeln G_l und G_r , die zwei Hyperbelbänder $G_{l_1}|_{G_l} G_{l_2}$ und $G_{r_1}|_{G_r} G_{r_2}$ konstruiert (s. a. Abschnitt 4.1.3).

in der Szene in der Fahrbahnebene liegen, die im Szenenkoordinatensystem durch $z_0 = 0$ definiert wird.

Die nachfolgend verwendeten Indizes M , S , K , B stehen für das *Modell*-, *Szenen*-, *Kamera*- und *Bild*koordinatensystem. Das Modellkoordinatensystem entspricht dem Ei-

gensystem einer Hyperbel. Die Darstellung einer Hyperbel H wird im Modellkoordinatensystem mit \mathcal{H}_M , im Szenenkoordinatensystem mit \mathcal{H}_S , im Kamerakoordinatensystem mit \mathcal{H}_K und im Bildkoordinatensystem mit \mathcal{H}_B bezeichnet. Die internen und die externen Kameraparameter, die für die Projektion vom Szenen- in das Bildkoordinatensystem benötigt werden, werden mit \mathcal{T}_{BK} und $\mathcal{T}_{KS} = (\mathcal{R}_{KS}, \mathbf{t}_K)$ (\mathcal{R}_{KS} ist der Rotations- und \mathbf{t}_K der Translationsanteil) bezeichnet. Sie werden in der 3×4 Matrix $\mathcal{P} = \mathcal{T}_{BK}\mathcal{T}_{KS}$ zusammengefasst. Mit O wird die Kameraposition bezeichnet, aus der eine Szene betrachtet wird.

4.1.4.1 Rückprojektion vom Bild- in den Szenenbereich

Ausgangspunkt für die Projektion eines Hyperbelbandes vom Bild- in den Szenenbereich ist die Rückgrathyperbel eines Hyperbelbandes. Aus der nachfolgend beschriebenen Rückprojektion einer Rückgrathyperbel in den Szenenbereich und den Parametern für die Asymptoten- und Scheitelpunktabstände wird schließlich ein Hyperbelband im Szenenbereich berechnet. Die Bestimmung eines Hyperbelbandes mit Hilfe der Rückgrathyperbel wurde in Abschnitt 4.1.1.1 beschrieben. Für eine Hyperbel H gilt im Bildbereich:

$$(x, y, 1)_B \mathcal{H}_B \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}_B = 0. \quad (4.5)$$

Für die Projektion von Punkten in homogenen Koordinaten gilt die Beziehung:

$$\begin{pmatrix} p \cdot x \\ p \cdot y \\ p \end{pmatrix}_B = \mathcal{P} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix}_S. \quad (4.6)$$

Mit dem homogenen Anteil p des Vektors $(p \cdot x, p \cdot y, p)_B^T$ lassen sich die Bildkoordinaten eines projizierten Szenenpunktes bestimmen. Durch Substitution der Beziehung 4.6 in Gleichung 4.5 erhält man schließlich:

$$\left(\mathcal{P} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix}_S \right)^T \mathcal{H}_B \begin{pmatrix} x \\ y \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix}_S = 0, \quad (4.7)$$

$$(x, y, z_0, 1)_S (\mathcal{P}^T \mathcal{H}_B \mathcal{P}) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix}_S = 0. \quad (4.8)$$

Berücksichtigt man, dass $z_0 = 0$ gilt, erhält man für die Darstellung der Hyperbel H in der Fahrbahnebene die Matrix \mathcal{H}_S , wenn man die dritte Zeile und dritte Spalte der

Matrix $\mathcal{P}^T \mathcal{H}_B \mathcal{P}$ streicht. Mit Hilfe der Matrix \mathcal{H}_S und den Abständen der Asymptoten und Scheitelpunkte lässt sich das zu H gehörende Hyperbelband im Szenenbereich, wie in Abschnitt 4.1.1.1 beschrieben, bestimmen.

4.1.4.2 Projektion von Hyperbeln in den Bildbereich

Zur Projektion eines Hyperbelbandes vom Szenenbereich in den Bildbereich reicht es aufgrund der perspektivischen Verzerrung nicht aus, nur die Rückgrathyperbel zu projizieren. Die beiden außen liegenden Hyperbeln müssen ebenfalls projiziert werden. Die Projektion einer Hyperbel H von ihrem Eigensystem in die Bildebene einer Kamera mit Kameraposition O gestaltet sich wie folgt (vgl. [Kanatani 93]):

Die Matrix \mathcal{H}_M von H sei in Normalform gegeben:

$$\mathcal{H}_M = \begin{pmatrix} 1/a^2 & 0 & 0 \\ 0 & -1/b^2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Um die Hyperbel H in der Bildebene der Kamera darzustellen, wird zunächst die Kameraposition im Mittelpunkt von H angenommen, wobei die Bildebene in der Fahrbahnebene liegen und wie das Eigensystem von H ausgerichtet sein soll. Mit einer Translation und Rotation in der Bildebene lässt sich das Koordinatensystem der Bildebene am Szenenkoordinatensystem ausrichten. Die Hyperbel H lässt sich durch die Matrix \mathcal{C}^{-1} mit

$$\mathcal{C}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathcal{R}_{MS} & \mathbf{m}_M \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathcal{R}_{MS}^T & -\mathcal{R}_{MS}^T \mathbf{m}_M \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}$$

vom Modell- in das Szenenkoordinatensystem abbilden (der Ortsvektor \mathbf{m}_M ist dabei der Ursprung des Szenenkoordinatensystems in Modellkoordinaten, \mathcal{R}_{MS}^T die 2×2 Rotationsmatrix¹, die die Bildebene an den x - und y -Achsen des Szenenkoordinatensystems ausrichtet, und $-\mathcal{R}_{MS}^T \mathbf{m}_M$ der Vektor, der den Ursprung des Bildkoordinatensystems in den Ursprung des Szenenkoordinatensystems verschiebt, was dem Ortsvektor des Mittelpunktes von H im Szenenkoordinatensystem entspricht). Die entsprechende Rücktransformation mit der Matrix \mathcal{C} ist im Anhang A.1 (Gleichung A.3) bei der Bestimmung der Normalform von Quadriken beschrieben. Die Matrix \mathcal{H}_S der Hyperbel H im Szenenkoordinatensystem bestimmt sich durch²

$$\mathcal{H}_S = \mathcal{C}^{-T} \mathcal{H}_M \mathcal{C}^{-1}.$$

Die Verschiebung der Kamera vom Ursprung des Szenenkoordinatensystems in die gewünschte Kameraposition O erfolgt um den Vektor $\mathbf{t}_S = (t_{Sx}, t_{Sy}, t_{Sz})^T$. Dieser Vektor wird so zerlegt, dass eine Verschiebung um den Vektor $-(m_x, m_y)^T$ in der Fahrbahnebene

¹Für orthogonale Matrizen gilt $A^{-1} = A^T$; also $\mathcal{R}_{SM} = \mathcal{R}_{MS}^{-1} = \mathcal{R}_{MS}^T$.

²Der Ausdruck \mathcal{C}^{-T} steht für $(\mathcal{C}^{-1})^T$.

erfolgt, und die Verschiebung mit einem Vektor \mathbf{v} der Länge d senkrecht zur Fahrbahnebene in die Kameraposition O möglich ist. Die Größe d bestimmt somit den Abstand der Kamera zur Fahrbahnebene. Da für die Fahrbahnebene $z_0 = 0$ gilt, erhält man für die Vektorzerlegung:

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{Sx} \\ t_{Sy} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{pmatrix} \quad \text{mit } d = t_{Sz}.$$

Die Matrix \mathcal{V} mit

$$\mathcal{V} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -m_x \\ 0 & 1 & -m_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

verschiebt die Kameraposition aus dem Ursprung des Szenenkoordinatensystems in den Punkt O', der senkrecht unter O auf der Fahrbahnebene liegt. Die Darstellung von H bei der Kameraposition O' bestimmt sich zu:

$$\mathcal{H}'_S = \mathcal{V}^T \mathcal{H}_S \mathcal{V}.$$

Die bisherigen Transformationen erfolgten ausschließlich in der Fahrbahnebene. Die Verschiebung der Kamera um den Vektor \mathbf{v} in die Position O entspricht einer senkrechten Projektion entlang der z -Achse mit dem Projektionsfaktor $1/d$. Mit der Matrix

$$\mathcal{P}_d = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/d \end{pmatrix},$$

lässt sich die Hyperbel H durch

$$\mathcal{H}''_S = \mathcal{P}_d^T \mathcal{H}'_S \mathcal{P}_d$$

bei einer Kamera in Position O mit einer zur Fahrbahnebene senkrecht stehenden optischen Achse beschreiben. Durch die Rotation $\mathcal{R}_{SK} = \mathcal{R}_{KS}^{-1}$ wird die Kamera aus dem Szenenkoordinatensystem schließlich in die gewünschte Lage im Kamerakoordinatensystem versetzt³, sodass die Darstellung von H im Kamerakoordinatensystem mit

$$\mathcal{H}_K = \mathcal{R}_{SK}^T \mathcal{H}''_S \mathcal{R}_{SK}$$

festgelegt ist. Mit der Transformation $\mathcal{T}_{KB} = \mathcal{T}_{BK}^{-1}$ erfolgt schließlich die Transformation in den Bildbereich:

$$\mathcal{H}_B = \mathcal{T}_{KB}^T \mathcal{H}_K \mathcal{T}_{KB}.$$

³Aufgrund der Orthogonalität von \mathcal{R}_{SK} gilt: $\mathcal{R}_{SK} = \mathcal{R}_{KS}^T$.

In einem Schritt lässt sich mit den obenstehenden Matrizen aus der in Normalform vorliegenden Hyperbel H die zugehörige Darstellung \mathcal{H}_B in der Bildebene mit

$$(x, y, 1) \underbrace{\mathcal{T}_{KB}^T \mathcal{R}_{SK}^T \mathcal{P}_d^T \mathcal{V}^T \mathcal{C}^{-T} \mathcal{H}_M \mathcal{C}^{-1} \mathcal{V} \mathcal{P}_d \mathcal{R}_{SK} \mathcal{T}_{KB}}_{\mathcal{H}_B} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

bestimmen.

4.1.5 Kantenelementanpassung

Die in dieser Arbeit verwendete Anpassung von Hyperbelbändern an Kantenelemente von Fahrspurberandungsabbildern geht auf die in [Heimes et al. 98] vorgestellte *Kantenelementanpassung* zurück. Bei diesem Anpassungsverfahren handelt es sich um einen *nichtlinearen Schätzprozess*, bei dem ausgehend von einer Initialisierung des Schätzprozesses der Schätzfehler iterativ minimiert wird. In dieser Arbeit wird die Kantenelementanpassung dazu verwendet, um zum Zeitpunkt t_k den Zustand

$$\mathbf{x}_k = (a_k, b_k, \mathbf{m}_k^T, \theta_k, d_{1k}, d_{2k}, \tau_k, dw_{lk}, dw_{rk})^T$$

optimal zu schätzen. Der Zustand \mathbf{x}_k beschreibt dabei eine Ausprägung des Fahrspurberandungsmodells zum Zeitpunkt t_k (s. a. Gleichung 4.4). Ziel dabei ist es, für dieses Fahrspurberandungsmodell im Szenenbereich eine Zustandsschätzung vorzunehmen, sodass unter Vorgabe eines Abstandsmaßes der Schätzfehler minimal wird. Als Messung des Schätzprozesses wird dabei eine Menge von Kantenelementen aus dem Bildbereich zugrundegelegt.

Innerstädtische Straßenkreuzungen liegen selten vollständig unverdeckt vor. Mit Hilfe von adaptiven Masken lassen sich Kantenelemente *bewegten* oder *unbewegten* Objekten zuordnen (s. a. [Nagel & Gehrke 98a, Nagel & Gehrke 98b]). Kantenelemente lassen sich zusätzlich noch durch Lage und Orientierung unterscheiden. Da nicht alle Fahrzeuge zum selben Zeitpunkt fahren und nicht immer alle Bereiche einer Kreuzung unverdeckt sind, erscheint es sinnvoll, eine Kreuzung über einen längeren Zeitraum zu beobachten, auch wenn sich eine Kreuzung in einem solchen Zeitraum nicht bewegt und die Kamera-Anordnung stationär ist. Die Implementierung adaptiver Masken wurde jedoch noch nicht durchgeführt. Damit eine verdeckungsfreie Kreuzung garantiert werden kann, wurde deshalb *interaktiv* ein Zeitpunkt herausgesucht, zu dem die Kreuzung für die vorliegende Untersuchung bzgl. bewegter Objekte hinreichend unverdeckt vorliegt. Dadurch besteht der Beobachtungszeitraum lediglich aus einem einzelnen Zeitpunkt t_0 .

Wie schon bei [Haag 98] wird auch in dieser Arbeit zur optimalen Schätzung des Zustandes \mathbf{x}_k zum Zeitpunkt t_k ein Kalman-Filter auf Basis aller Messungen \mathcal{Z}_k bis zum Zeitpunkt t_k angewandt. Dafür werden die folgenden Voraussetzungen benötigt:

- Mit der *Messfunktion* $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ wird die Messeinrichtung modelliert. Die Messfunktion liefert für einen gegebenen Systemzustand \mathbf{x} den erwarteten Messwert.

- Die beim Systemzustand \mathbf{x} tatsächlich beobachtete Messung \mathbf{z} ist normalverteilt mit Mittelwert $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ und Kovarianz Σ . Die Kovarianz Σ bezeichnet das *Messrauschen*, welches die Messunsicherheit repräsentiert.
- Der geschätzte Zustand $\hat{\mathbf{x}}$ ist normalverteilt mit dem tatsächlichen Systemzustand \mathbf{x} als Erwartungswert und der Kovarianz P , der *Zustandsunsicherheit*.

4.1.5.1 Initialisierung

Im Gegensatz zu den oben zitierten Arbeiten kann bei der Anpassung von Hyperbelbändern an Fahrspurberandungsabbilder in dieser Arbeit eine zeitliche Veränderung der Lage des beobachteten Objektes ausgeschlossen werden, da zum einen die Kamera-Anordnung stationär angebracht ist und zum anderen die zu einer Kreuzung gehörenden Teile unbewegt sind. Als Initialisierung des Systemzustandes wird das Abbild der Trajektorie eines auf der zu untersuchenden Fahrspur fahrenden Fahrzeuges sowie Daten aus den Richtlinien zur Anlage von Stadtstraßen herangezogen [RAST-E 71, RAST-K 73, RAST-L 73, RAST-Q 68, RMS 80]. Die mit einem datengetriebenen Verfahren ermittelte Trajektorie eines Fahrzeugabbildes in der Bildebene (s. [Nagel & Gehrke 98b, Middendorf 99] und Anhang C) wird durch eine Hyperbel approximiert (s. a. Anhang D) und in die Szene – mit Hilfe der aus einer Kamerakalibrierung bekannten Transformation zwischen Szenen- und Bildkoordinatensystem – rückprojiziert. Zusammen mit den Daten aus den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen kann dadurch der Zustandsvektor \mathbf{x} geeignet initialisiert werden.

4.1.5.2 Prädiktion

Der (aktualisierte) Zustand $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+$ zum Zeitpunkt $k-1$ wird als initiale Hypothese für den Zustand $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ zum Zeitpunkt k übernommen, also $\hat{\mathbf{x}}_k^- := \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+$.

4.1.5.3 Zuordnung

Die Zuordnung von Kantenelementen zu ins Bild projizierten Hyperbeln des Fahrspurberandungsmodells erfolgt in zwei Schritten:

1. Bestimmung von Kantenelementen innerhalb eines *Toleranzbandes* um beide Fahrspurberandungen⁴.

⁴Dieser Schritt wird notwendig, um weit entfernte Kantenelemente frühzeitig rechenzeitsparend auszusortieren. Da sich die Hyperbelbänder des Fahrspurberandungsmodells nicht überschneiden, erlaubt die Klassifizierung der Richtung von Kantenelementen eine eindeutige Zuordnung zur linken oder rechten Hyperbel des Fahrspurberandungsmodells, sofern vorausgesetzt wird, dass Markierungen und Bordsteinkanten im Bild heller abgebildet sind als der Fahrbahnbelag. Das Toleranzband ist überdies im Szenenbereich definiert, sodass bei der Auswahl von Kantenelementen, nicht jedoch bei der Anpassung, die perspektivische Verzerrung so berücksichtigt wird, dass beispielsweise – bei guter Wahl der Startparameter – keine Kantenelemente aus der Fahrspurmitte der Fahrspurberandung zugeordnet werden.

2. Zuordnung der Kantenelemente zu den Hyperbeln des Fahrspurberandungsmodells.
3. Bestimmung der Mahalanobis-Distanz jedes Kantenelementes zu den Hyperbeln des Fahrspurberandungsmodells nach [Haag 98, Tonko 97].

Sowohl für die linke als auch für die rechte Fahrspurberandung wird ein Toleranzband bestimmt. Kantenelemente innerhalb des linken Toleranzbandes sind Kandidaten für die Zuordnung zur linken Fahrspurberandung. Entsprechendes gilt für die rechte Fahrspurberandung. Das Modell der Fahrspurberandung besitzt zwei Hyperbeln, die die räumliche Ausdehnung einer Fahrspurberandung beschreiben. Im Bild sind diese Begrenzungen der Fahrspurberandung durch Grauwertverläufe auf der einen Seite von dunkel nach hell und auf der anderen Seite von hell nach dunkel gekennzeichnet.

Ein *Kantenelement* $\mathbf{e} = (u, v, \phi)^T$ ist als Bildpunkt $(u, v)^T$ definiert, an dessen Stelle der Gradientenbetrag $\|\nabla g(\mathbf{e})\|$ der Grauwertfunktion g ein lokales Maximum in Gradientenrichtung annimmt. Zusätzlich wird verlangt, dass der Gradientenbetrag eine Schwelle überschreitet.

Die Gradientenrichtung ϕ eines Kantenelementes zeigt immer einen Wechsel des Grauwertverlaufes von dunkel nach hell an, sodass anhand der Gradientenrichtung eines Kantenelementes \mathbf{e} entschieden werden kann, welcher Hyperbel der Fahrspurberandung das Kantenelement \mathbf{e} zugeordnet werden muss, um den Grauwertverlauf im Bild geeignet zu beschreiben. Für den im Abschnitt 4.1.5.4 beschriebenen Aktualisierungsschritt wird ein Abstandsmaß benötigt, mit dessen Hilfe bewertet werden kann, wie gut ein Kantenelement zu einer Hyperbel des Fahrspurberandungsmodells passt. Die Zuordnung und die Bestimmung des Abstandes eines Kantenelementes zu einer Hyperbel des Fahrspurberandungsmodells erfolgen in einem Schritt.

Durch ein Kantenelement \mathbf{e} ist die Gerade e mit

$$e : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

eindeutig festgelegt. Ein Schnitt der Geraden e mit einer Hyperbel H ,

$$H : Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (4.10)$$

ergibt keine, eine oder zwei Lösungen. Der Schnitt $e \cap H$ erfolgt durch Einsetzen der Gleichung 4.9 in die Hyperbelgleichung 4.10. Die resultierende quadratische Gleichung für die Variable λ ergibt schließlich keine, eine oder zwei Lösungen. Gibt es keine Lösung, ist die Abweichung der Gradientenrichtung des Kantenelements von der Richtung der Modellkante so groß, dass eine Zuordnung nicht sinnvoll ist und der Kantenelementkandidat verworfen wird. Existieren zwei Lösungen, so wird diejenige verwendet, deren zugehöriger euklidischer Abstand geringer ist. Dies ist sinnvoll, da der Kantenelementkandidat innerhalb eines Toleranzbandes um einen einzelnen Hyperbelast liegt. Der euklidische Abstand von \mathbf{e} zu diesem Hyperbelast ist jedoch geringer als zum zweiten Hyperbelast der Hyperbel H .

Definition 4.3 Der Abstand $d_{\mathbb{H}}(\mathbf{e}, \mathbf{x})$ eines Kantenelementes \mathbf{e} von der Hyperbel \mathbb{H} unter dem Zustandsvektor \mathbf{x} wird definiert als:

$$d_{\mathbb{H}}(\mathbf{e}, \mathbf{x}) = \begin{cases} \lambda_1 & |\lambda_1| < |\lambda_2| \\ \lambda_2 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.11)$$

mit

$$\lambda_1 = \frac{-p/2 + \sqrt{p^2/4 - q r}}{r},$$

$$\lambda_2 = \frac{-p/2 - \sqrt{p^2/4 - q r}}{r},$$

$$r = A \cos^2(\phi) + B \cos(\phi) \sin(\phi) + C \sin^2(\phi)$$

$$p = 2A \cos(\phi)u + B(\cos(\phi)v + \sin(\phi)u) + 2C \sin(\phi)v + D \cos(\phi) + E \sin(\phi)$$

$$q = Au^2 + Buv + Cv^2 + Du + Ev + F$$

Die Zuordnung von Kantenelementen zu den beiden Hyperbeln einer Fahrspurberandung erfolgt unter zwei Annahmen:

1. Alle betrachteten Kantenelemente liegen innerhalb des Toleranzbandes.
2. Die Grauwerte innerhalb eines ins Bild projizierten Hyperbelbandes zur Beschreibung einer Fahrspurberandung sind im Mittel heller als die Grauwerte in der Umgebung des Hyperbelbandes, da die Fahrspurberandung im allgemeinen heller als die Fahrbahndecke ist.

Seien $\lambda_l = d_{\mathbb{B}_l}(\mathbf{e}, \mathbf{x})$ und $\lambda_r = d_{\mathbb{B}_r}(\mathbf{e}, \mathbf{x})$ die (vorzeichenbehafteten) Abstände eines Kantenelements \mathbf{e} von der linken (\mathbb{B}_l) und der rechten (\mathbb{B}_r) Hyperbel des Toleranzbandes $\mathbb{B}_l|\mathbb{B}_r$ um das Hyperbelband $\mathbb{H}_1|\mathbb{H}_2$ (s. a. Abbildung 4.4).

Für $\lambda_l < 0 < \lambda_r$ wird ein Kantenelement \mathbf{e} der linken Hyperbel (\mathbb{H}_1) des Hyperbelbandes $\mathbb{H}_1|\mathbb{H}_2$ und für $\lambda_l > 0 > \lambda_r$ der rechten Hyperbel (\mathbb{H}_2) des Hyperbelbandes $\mathbb{H}_1|\mathbb{H}_2$ zugeordnet. Dieses Zuordnungskriterium entspricht der Forderung, dass die Gradientenrichtungen der detektierten Kantenelemente innerhalb des Toleranzbandes dem an den Hyperbeln \mathbb{H}_1 und \mathbb{H}_2 erwarteten Grauwertverlauf entsprechen.

4.1.5.4 Aktualisierung

Die Aktualisierung einer Zustandsschätzung $\hat{\mathbf{x}}^-$ unter Einbeziehung von Messungen einer Bildfolge basiert auf dem Vergleich von *erwarteten* und *gemessenen* Bildbereichshinweisen. Beim Kalman-Filter wird die Summe der Fehlerquadrate zwischen den tatsächlichen Systemzuständen \mathbf{x}_i und den geschätzten Systemzuständen $\hat{\mathbf{x}}_i$ bis zum Abtastzeitpunkt k minimiert:

$$\sum_{i=0}^k [(\hat{\mathbf{x}}_i - \mathbf{x})^T (\hat{\mathbf{x}}_i - \mathbf{x})] \longrightarrow \text{minimal.}$$

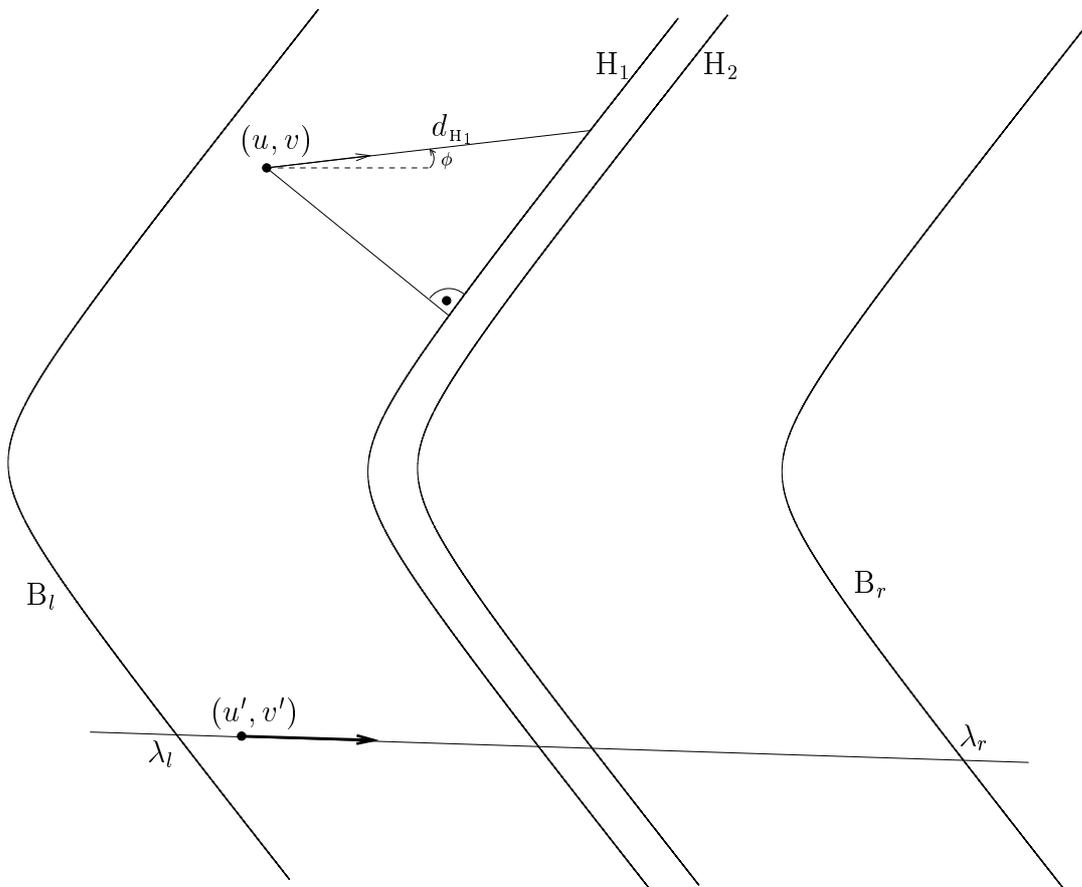


Abbildung 4.4: Die Hyperbeln H_1 und H_2 sind die Begrenzungshyperbeln einer einzelnen Fahrspurberandung. Alle Kantenelemente innerhalb des Toleranzbandes $B_l|B_r$ sind Kandidaten für den Anpassungsschritt. Das Kantenelement $\mathbf{e}' = (u', v', \phi)^T$ legt eine Gerade g fest, die mit $B_l|B_r$ bei den Parametern λ_l und λ_r Schnittpunkte besitzt. Das Kantenelement \mathbf{e}' wird der Hyperbel H_1 zugeordnet, falls $\lambda_l < 0 < \lambda_r$ gilt. Im Falle $\lambda_r > 0 > \lambda_l$ wird \mathbf{e} der Hyperbel H_2 zugeordnet. Das Kantenelement an der Stelle $(u, v)^T$ im oberen Teil des Bildes hat den (vorzeichenbehafteten) Abstand d_{H_1} von der Hyperbel H_1 . Bei diesem Abstandsmaß wird die Gradientenrichtung des Kantenelements berücksichtigt.

Dies entspricht einer Maximum-A-Posteriori (MAP) Schätzung, bei der derjenige Zustandsvektor \mathbf{x} mit der höchsten A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit gewählt wird.

Sei die beobachtete Messung \mathbf{z} bei einem Systemzustand \mathbf{x} um den Erwartungswert $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ mit Kovarianz Σ , sowie der geschätzte Systemzustand $\hat{\mathbf{x}}$ um den Erwartungswert \mathbf{x} mit Kovarianz P normalverteilt. Für die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass sich das System bei Beobachtung der Messung \mathcal{Z}_k tatsächlich im Zustand \mathbf{x}_k befindet, gilt [Jazwinski 70]:

$$p(\mathbf{x}_k | \mathcal{Z}_k) = \frac{1}{p(\mathbf{x}_k | \mathcal{Z}_{k-1})} e^{-\Gamma(\mathbf{x}_k)}$$

mit

$$\Gamma(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \underbrace{(\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}))^T \Sigma^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}))}_{=: \Gamma_{\text{Mess}}} + \frac{1}{2} \underbrace{(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}_k^-)^T P^{-1} (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}_k^-)}_{=: \Gamma_{\text{Zust}}}. \quad (4.12)$$

Ersetzt man das Messresiduum $\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})$ durch das Abstandsmaß $d_{\text{H}}(\mathbf{e}, \mathbf{x})$, erhält der Messanteil Γ_{Mess} der Kostenfunktion $\Gamma(\mathbf{x})$ (Gleichung 4.12) dabei die nachfolgende Gestalt, wobei über alle Kantenelemente \mathbf{e} die Mahalanobis-Distanz abhängig vom Abstandsmaß $d_{\text{H}}(\mathbf{e}, \mathbf{x})$ (vgl. Gleichung 4.11) summiert wird:

$$\Gamma_{\text{Mess}} = \sum_{\mathbf{e}} d_{\text{H}}(\mathbf{e}, \mathbf{x})^T \frac{1}{\sigma_{\text{Mess}}'^2} d_{\text{H}}(\mathbf{e}, \mathbf{x}).$$

Wie schon bei [Haag 98] wird

$$\sigma_{\text{Mess}}'^2 = \frac{\partial d_{\text{H}}(\mathbf{e}, \hat{\mathbf{x}}^-)}{\partial \mathbf{e}} \cdot \Sigma'_e(\mathbf{e}) \cdot \left(\frac{\partial d_{\text{H}}(\mathbf{e}, \hat{\mathbf{x}}^-)}{\partial \mathbf{e}} \right)^T$$

definiert, wobei mit $\Sigma'_e(\mathbf{e})$ das kantenelement-abhängige Messrauschen bezeichnet wird. Bei der Aktualisierung wird das für alle Kantenelemente als konstant angenommene Messrauschen Σ_e mit dem Gradientenbetrag des jeweiligen Kantenelementes gewichtet. Dadurch wird der Rauscheinfluss für Kantenelemente mit einem höheren Gradientenbetrag geringer, sie werden also als zuverlässiger eingestuft als Kantenelemente mit einem geringeren Gradientenbetrag:

$$\Sigma'_e(\mathbf{e}) = \left(\frac{\|\nabla g(\mathbf{e})\|}{\sum_{\mathbf{e}'} \|\nabla g(\mathbf{e}')\|} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \Sigma_e \cdot \left(\frac{\|\nabla g(\mathbf{e})\|}{\sum_{\mathbf{e}'} \|\nabla g(\mathbf{e}')\|} \right)^{-\frac{1}{2}}.$$

4.2 Kreuzungsarm

Bei parallel verlaufenden Fahrspuren sind auch die Asymptoten der zugehörigen Rückgrathyperbeln parallel. Die Öffnungswinkel η_i aller zum selben Kreuzungsarm zugehörigen Rückgrathyperbeln G_i besitzen deshalb in der Szene im Idealfall denselben Wert η und die Koordinatensysteme der normalisierten Hyperbeln haben dieselbe Orientierung.

Die *Hyperbelbänder* parallel verlaufender Fahrspuren lassen sich zu *Hyperbelbandscharen* verknüpfen, die als Modell von *Kreuzungsarmen* dienen.

4.2.1 Kombination ähnlicher Hyperbelbänder - Hyperbelbandschar

Die Bildung der Hyperbelbänder einer Hyperbelbandschar basiert dabei auf einer allen Hyperbelbändern gemeinsamen Rückgrathyperbel und den Beziehungen benachbarter Hyperbelbänder (s. a. Abbildung 4.5).

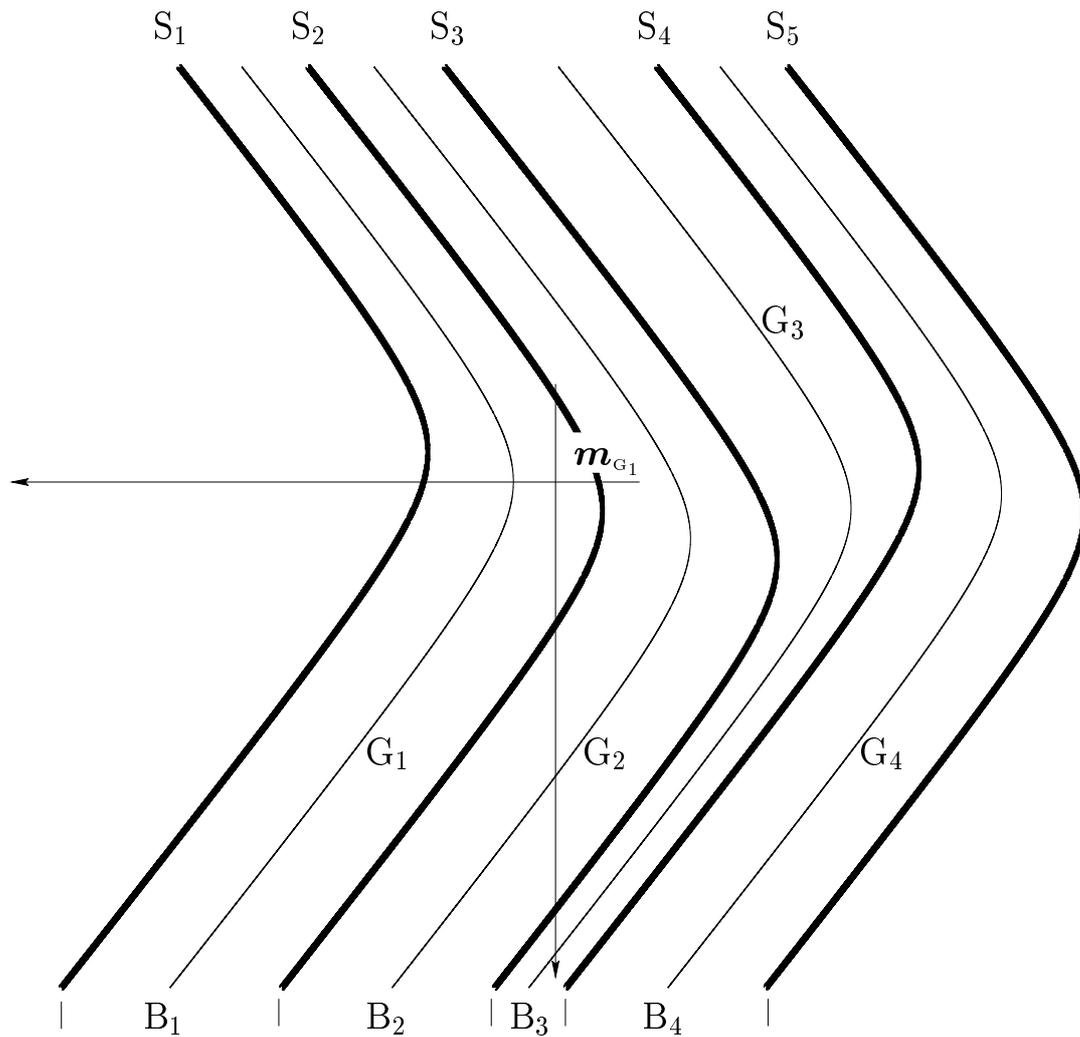


Abbildung 4.5: Die Abbildung skizziert eine Hyperbelbandschar \mathcal{S} mit fünf Begrenzungshyperbeln S_1 - S_5 . \mathcal{S} geht aus vier Hyperbelbändern B_1 - B_4 mit den Rückgrathyperbeln G_1 - G_4 hervor. Bei realen Daten fallen die Begrenzungshyperbeln der Hyperbelbänder üblicherweise nicht zusammen. Das Hyperbelband B_3 kann als Beispiel eines zusätzlich bestimmten Hyperbelbandes dienen, das eingefügt wurde, um eine lückenlose Hyperbelbandschar zu erhalten. Aus der Ausgangsmenge $\mathcal{M} = \{B_1, B_2, B_4\}$ wurde damit die im Text beschriebene Menge $\mathcal{M}' = \{B_1, B_2, B_3, B_4\}$ gebildet, deren direkt nebeneinanderliegenden Hyperbelbänder benachbart sind.

Definition 4.4 Zwei Hyperbeln H_1 und H_2 mit den Orientierungen $\theta_{H_1}, \theta_{H_2}$ und den Öffnungswinkeln η_{H_1}, η_{H_2} heißen ϵ -ähnlich, wenn $|\theta_{H_1} - \theta_{H_2}| < \epsilon_{Winkel}$ und $|\eta_{H_1} - \eta_{H_2}| < \epsilon_{Winkel}$ gilt.

Zwei Hyperbelbänder B_1, B_2 mit den Rückgrathyperbeln G_1, G_2 heißen ϵ -ähnlich, wenn G_1, G_2 ϵ -ähnlich bzgl. der Schwelle ϵ_{Winkel} sind.

Um entscheiden zu können, ob zwei Hyperbelbänder zwei aneinandergrenzende Fahrspuren beschreiben, muss ein Abstandsmaß zwischen zwei Hyperbelbändern definiert werden. Die folgende Definition des Abstandes zweier ϵ -ähnlicher Hyperbelbänder basiert auf der Definition eines Abstandes zweier ϵ -ähnlicher Hyperbeln.

Definition 4.5 Zwei ϵ -ähnliche Hyperbeln $H_k(a_k, b_k, \mathbf{m}_k, \theta_k)$, $k=1,2$, haben den Abstand d mit

$$d(H_1, H_2) = \sqrt{h(H_1, H_2) \cdot h(H_2, H_1)},$$

$$h(H_1, H_2) = \sqrt{\int_0^{m_{2y}} (g_1(y) - g_2(y)) dy + (m_{2x} + a_2 - a_1)^2},$$

mit

$$g_k(y) = a_k \cosh\left(\operatorname{asinh}\left(\frac{y - m_{ky}}{b_k}\right)\right) + m_{kx},$$

im Koordinatensystem \mathcal{K} ,

$$\mathcal{K} = \left\{ \begin{pmatrix} m_{1x} \\ m_{1y} \end{pmatrix}, \left[\begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix} \right] \right\}.$$

Die Bestimmung einer Stammfunktion von $\int g_k(y) dy$ und Eigenschaften des Abstandsmaßes $d(H_1, H_2)$ findet man im Anhang B.2.

Der Abstand d zweier ϵ -ähnlicher Hyperbelbänder $H_1|_{G_1}H'_1$ und $H_2|_{G_2}H'_2$ ist definiert als:

$$d(H_1|_{G_1}H'_1, H_2|_{G_2}H'_2) = d(G_1, G_2).$$

Definition 4.6 Zwei mit Schwelle ϵ_{Winkel} ähnliche Hyperbeln H_1 und H_2 heißen *benachbart* mit der Schwelle ϵ , wenn für den Abstand $d(H_1, H_2) < \epsilon$ gilt.

Zwei mit Schwelle ϵ_{Winkel} ähnliche Hyperbelbänder $H_1|_{G_1}H'_1$ und $H_2|_{G_2}H'_2$ heißen *benachbart* mit der Schwelle ϵ , wenn die Hyperbeln G_1 und G_2 mit der Schwelle ϵ benachbart sind.

Definition 4.7 Eine *Hyperbelbandschar* \mathcal{S} besteht aus einer Menge von $n > 1$ Hyperbeln H_i mit der Orientierung θ_s , dem Öffnungswinkel η_s sowie der zusätzlichen Eigenschaft, dass jedes Hyperbelpaar $H_i|H_{i+1}$ ein Hyperbelband darstellt. Mit S_i ($1 \leq i \leq n$) werden die n Hyperbeln von \mathcal{S} bezeichnet.

Definition 4.8 Eine Menge \mathcal{M} von m Hyperbelbändern $H_i|H'_i$ ($1 \leq i \leq m$) heißt *paarweise geordnet*, wenn gilt:

$$\forall i, j = 1, \dots, m \quad d(H_i, H'_i) < d(H_i, H'_j) \Leftrightarrow i < j \quad \text{mit } H_i|H'_i, H_j|H'_j \in \mathcal{M}.$$

Sei \mathcal{M} eine Menge von $m > 0$ Hyperbelbändern $B_i = H_i |_{G_i} H'_i$, die bzgl. ihres Abstandes paarweise geordnet sind. Die Parameter von B_i sind im Parametervektor $\mathbf{x}_{B_i} = (a_{B_i}, b_{B_i}, \mathbf{m}_{B_i}^T, \theta_{B_i}, d_{1,B_i}, d_{2,B_i}, \tau_{B_i})^T$ zusammengefasst. Nachfolgend wird ein Algorithmus beschrieben, wie aus der Menge \mathcal{M} eine Hyperbelbandschar \mathcal{S} konstruiert werden kann.

1. Bestimmung der Orientierung θ_s und des Öffnungswinkels η_s der Asymptoten aller Hyperbeln der Hyperbelbandschar \mathcal{S} durch den Mittelwert aller Orientierungen θ_{G_i} und Öffnungswinkel $\eta_{G_i} = \arctan(b_{G_i}/a_{G_i})$:

$$\theta_s = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \theta_{H_i}, \quad \eta_s = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \arctan\left(\frac{b_{H_i}}{a_{H_i}}\right).$$

Als Ursprung des Koordinatensystems \mathcal{K} wird das Zentrum von G_1 und als Orientierung θ_s verwendet:

$$\mathcal{K} = \left\{ \mathbf{m}_{G_1}, \left[\begin{pmatrix} \cos(\theta_s) \\ \sin(\theta_s) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\sin(\theta_s) \\ \cos(\theta_s) \end{pmatrix} \right] \right\}.$$

2. Aus der Menge \mathcal{M} wird eine Menge \mathcal{M}' von Hyperbelbändern erzeugt, die bzgl. ihres Abstandes paarweise geordnet und bei der alle Hyperbelbänder $B'_j, B'_{j+1} \in \mathcal{M}'$ benachbart sind:

Für alle k mit der Eigenschaft, dass $B_k = H_k |_{H'_k}$, $B_{k+1} = H_{k+1} |_{H'_{k+1}} \in \mathcal{M}$ nicht benachbart sind, wird aus den Hyperbeln H'_k und H_{k+1} ein Hyperbelband B gebildet, dessen Begrenzungshyperbeln die Hyperbeln H'_k und H_{k+1} näherungsweise beschreiben und die Orientierung θ_s sowie den Öffnungswinkel η_s besitzen. Das Hyperbelband B wird in \mathcal{M}' so eingefügt, dass schließlich alle Hyperbelbänder paarweise geordnet und Hyperbelbänder mit direkt aufeinanderfolgenden Indizes benachbart sind.

3. In Anlehnung an den Abschnitt 4.1.1.1 lässt sich die erste Hyperbel der Menge \mathcal{S} aus B'_1 mit den Gleichungen B.4 und B.10 ableiten. Sei $\mathcal{S} = \{H(a_{s_1}, a_{s_1} \cdot \tan(\eta_s), \mathbf{m}_{s_1}, \theta_s)\}$ mit

$$\mathbf{m}_{s_1} = \begin{pmatrix} (d_{1,B_1} + d_{2,B_1}) / (2 \sin(\eta_s)) \\ (d_{1,B_1} - d_{2,B_1}) / (2 \cos(\eta_s)) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}},$$

$$a_{s_1} = a_{G_1} - \left(\frac{d_{1,B_1} + d_{2,B_1}}{2 \sin(\eta_s)} - \sqrt{\left(\tau_{B_1} \frac{d_{1,B_1} + d_{2,B_1}}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_{2,B_1} - d_{1,B_1}}{2 \cos(\eta_s)} \right)^2} \right).$$

4. Sei i der Index für Elemente aus der Menge \mathcal{S} und entsprechend j der Index für Elemente aus der Menge \mathcal{M}' .

5. Seien die Startwerte der Indizes für die nachfolgende Iteration: $i = 1, j = 1$.
6. Um von der Begrenzungshyperbel S_i zu S_{i+1} zu gelangen, müssen zur Bestimmung der Scheitelpunkte die nachfolgenden Schritte berücksichtigt werden.
 Sei G_i die Rückgrathyperbel des Hyperbelbandes $S_i|S_{i+1}$ mit den beiden Breiten d_{1,B_j} und d_{2,B_j} des Hyperbelbandes $B_j \in \mathcal{M}'$ und dem Öffnungswinkel η_s . Nach Gleichung B.10 gilt für die Beziehung der Formparameter a_{S_i} und a_{G_i} von S_i und G_i :

$$a_{S_i} = a_{G_i} - s, \quad (4.13)$$

mit

$$s = \left(\frac{d_{1,B_j} + d_{2,B_j}}{2 \sin(\eta_s)} - \sqrt{\left(\tau_{B_j} \frac{d_{1,B_j} + d_{2,B_j}}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_{2,B_j} - d_{1,B_j}}{2 \cos(\eta_s)} \right)^2} \right).$$

Nach Gleichung B.9 gilt für die Beziehung der Formparameter $a_{S_{i+1}}$ und a_{G_i} von S_{i+1} und G_i :

$$a_{S_{i+1}} = a_{G_i} + s. \quad (4.14)$$

Setzt man Gleichung 4.13 umgeformt nach a_{G_i} in Gleichung 4.14 ein, erhält man eine Vorschrift zur Bestimmung von $a_{S_{i+1}}$:

$$a_{S_{i+1}} = a_{S_i} + 2 \cdot s. \quad (4.15)$$

Ähnliche Überlegungen führen zur Bestimmung des Mittelpunktes $\mathbf{m}_{S_{i+1}}$.

$$\mathbf{m}_{S_{i+1}} = \mathbf{m}_{S_i} - 2 \begin{pmatrix} (d_{1,B_j} + d_{2,B_j}) / (2 \sin(\eta_s)) \\ (d_{1,B_j} - d_{2,B_j}) / (2 \cos(\eta_s)) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}}.$$

Sei $\mathcal{S} := \mathcal{S} \cup \{H(a_{S_{i+1}}, a_{S_{i+1}} \cdot \tan(\eta_s), \mathbf{m}_{S_{i+1}}, \theta_s)\}$.

7. Gilt $j < |\mathcal{M}'|$, dann erhöhe die Indizes $i := i + 1, j := j + 1$ und gehe zu Schritt 6.
8. Für $j \geq |\mathcal{M}'|$ ist die Menge \mathcal{S} bestimmt.

Um zu zeigen, dass die im letzten Schritt erhaltene Menge \mathcal{S} tatsächlich eine Hyperbelbandschar ist, müssen die folgenden Punkte bewiesen werden:

1. \mathcal{S} besteht aus einer Menge von $n > 1$ Hyperbeln:
 Da die Menge \mathcal{M} mindestens ein Hyperbelband enthält, wird mindestens ein Iterationsschritt durchlaufen. Im Initialisierungsschritt wird eine Hyperbel in \mathcal{S} eingefügt. Je Iterationsschritt wird ebenfalls eine Hyperbel in \mathcal{S} eingefügt, sodass \mathcal{S} eine Kardinalität größer 1 besitzt.

2. Jede Hyperbel aus \mathcal{S} hat die Orientierung θ_s und die Asymptoten weisen den Öffnungswinkel η_s auf:
 Alle in \mathcal{S} eingefügten Hyperbeln haben die Form:
 $H(a_{s_k}, a_{s_k} \cdot \tan(\eta_s), \mathbf{m}_{s_k}, \theta_s)$.
 Damit besitzen alle Hyperbeln aus \mathcal{S} die Orientierung θ_s und den Öffnungswinkel $\arctan(a_{s_k} \cdot \tan(\eta_s)/a_{s_k}) = \eta_s$.
3. Zwei Hyperbeln aus \mathcal{S} mit aufeinanderfolgenden Indizes erfüllen die Eigenschaften von Hyperbelbändern:
 Diese Eigenschaft folgt direkt aus der Konstruktion der Hyperbeln im Initialisierungs- und Iterationsschritt (s. a. Abschnitt 4.1.1.1).

Die Parametrisierung der Menge \mathcal{S} lässt sich aus diesem Verfahren ableiten. Bei der Initialisierung werden die Parameter a_{G_1} , η_s , \mathbf{m}_{G_1} und θ_s benötigt. Mit diesen Parametern ist auch die Rückgrathyperbel der Hyperbelbandschar \mathcal{S} festgelegt. Im Iterationsschritt werden als zusätzliche Parameter nur noch die Breiten der ein- und auslaufenden Äste und die Parameter zur Bestimmung des Scheitelpunktabstandes der Hyperbelbänder verwendet. Bei einer Anzahl von $m' = |\mathcal{M}'|$ Hyperbelbändern ergibt sich also eine Gesamtzahl von $5 + 3 \cdot m'$ Parametern zur vollständigen Beschreibung von \mathcal{S} .

Werden die Hyperbeln aus \mathcal{S} bei der Anpassung an Kreuzungsarme innerstädtischer Straßenkreuzungen als Rückgrathyperbeln für Hyperbelbänder zur Beschreibung von Fahrspurbegrenzungen verwendet, so muss für jede Hyperbel aus \mathcal{S} noch eine Breite parametrisiert werden. Damit ergibt sich eine Gesamtzahl von $5 + 3 \cdot m' + m' + 1 = 6 + 4 \cdot m'$ Parametern.

4.2.2 Kantenelementanpassung

Die Kantenelementanpassung einer Hyperbelbandschar unterscheidet sich von der Kantenelementanpassung einzelner Hyperbelbänder nur durch die erhöhte Anzahl an zu schätzenden Parametern im Zustandsvektor.

Im letzten Abschnitt wurde die Menge \mathcal{S} aller n Begrenzungshyperbeln aus m' Hyperbelbändern der Menge \mathcal{M}' gebildet. Dazu wurden $5 + 3 \cdot m' + n$ Parameter verwendet. Entsprechend besteht der bei der Kantenelementanpassung verwendete Zustandsvektor aus drei Abschnitten:

1. 5 Parameter der Rückgrathyperbel: a_{G_1} , η_s , \mathbf{m}_{G_1} , θ_s .
2. Für jedes der m' Hyperbelbänder der Hyperbelbandschar gibt es drei Parameter:
 d_{1G_i} , d_{2G_i} , τ_{G_i} .
3. Für jede der n Begrenzungshyperbeln wird eine Breite der Fahrspurberandung benötigt: dw_{G_i} .

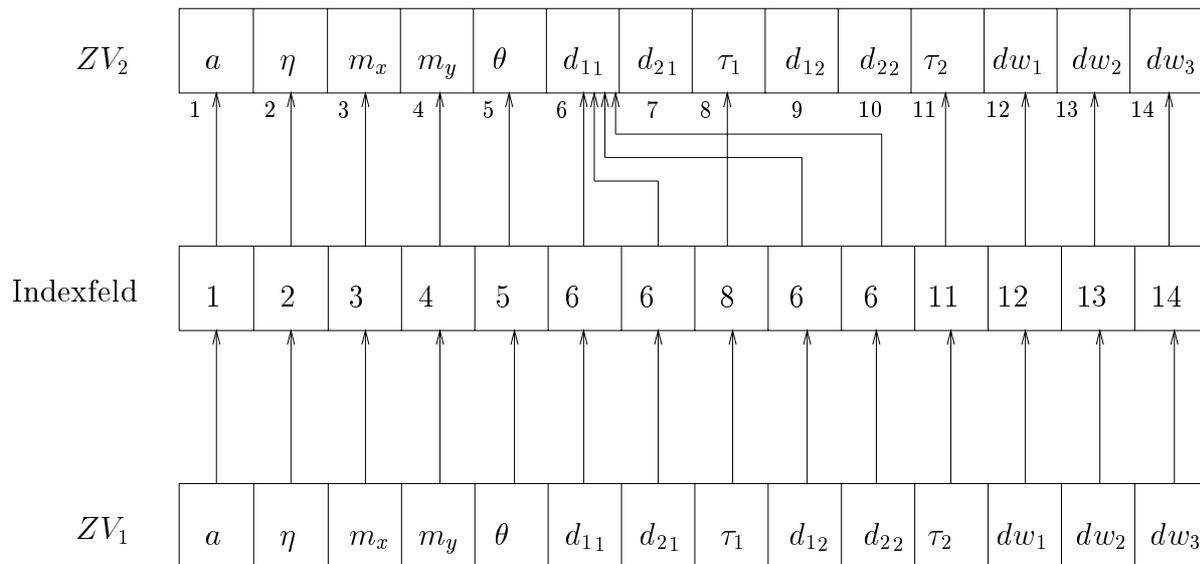


Abbildung 4.6: Die Zustandsvektoren ZV_1 und ZV_2 beschreiben eine Hyperbelbandschar mit zwei Hyperbelbändern. Mit diesen Zustandsvektoren können zwei benachbarte Fahrspuren beschrieben werden. In der vorliegenden Darstellung werden alle Fahrspurbreiten des Zustandsvektors ZV_1 auf eine gemeinsame Fahrspurbreite abgebildet. Das Indexfeld stellt die entsprechende Transformation bereit. Beim Anpassprozess wird auf den Zustandsvektor ZV_1 zurückgegriffen. Beim Zugriff auf die Variablen $d_{11}, d_{21}, d_{12}, d_{22}$ des Zustandsvektors ZV_1 wird bei den oben dargestellten Abhängigkeiten einheitlich die Variable d_{11} des Zustandsvektors ZV_2 verwendet.

4.2.3 Berücksichtigung von Abhängigkeiten bei der Anpassung

Fahrspuren können, wie das Beispiel der Straßenbahnen am Bernhardus-Platz in Karlsruhe zeigt, sich teilweise überlappen und damit zwei Hyperbelbandscharen angehören (s. Kapitel 5). Wie im Falle der Durlacher-Tor-Szene kann es sinnvoll sein, zusätzliche Beschränkungen bei der Anpassung von Hyperbelbandscharen einzuführen, beispielsweise durch die Forderung, dass die Fahrspurbreiten der auslaufenden Arme zweier parallel verlaufender Fahrspuren gleich sind (s. drittes Experiment in Abschnitt 5.2.2).

Die daraus entstehenden Abhängigkeiten können berücksichtigt werden, wenn Parameter, die denselben Zusammenhang beschreiben, zusammengeführt werden. Die algorithmische Umsetzung eines solchen Zusammenhangs kann man durch Einführung eines Indexfeldes erreichen, das als Einträge Indizes auf den Zustandsvektor kombinierter Hyperbelbandscharen besitzt. Hyperbelbandscharen besitzen ein Indexfeld mit der Größe des Zustandsvektors. Enthalten mindestens zwei Einträge denselben Index, sind Abhängigkeiten von Parametern vorhanden. Beim Anpassungsschritt wird über das Indexfeld auf den indizierten Parameter zugegriffen, sodass auch entsprechende Abhängigkeiten berücksichtigt werden können (s.a. Abbildung 4.6).

4.3 Kreuzung

In den letzten Abschnitten wurde die Konstruktion einer Hyperbelbandschar vorgestellt, die zur Anpassung an einzelne Kreuzungsarme herangezogen wird. Eine Hyperbelbandschar lässt sich durch $6 + 4 \cdot m$ Parameter beschreiben, wobei m die Anzahl der zur Beschreibung der Hyperbelbandschar notwendigen Hyperbelbänder darstellt. Die *gleichzeitige* Anpassung mehrerer Hyperbelbandscharen lässt sich durch Zusammenfügen der Parametervektoren und gleichzeitige Anpassung aller in den Hyperbelbandscharen definierten Hyperbelbänder erreichen. Ein Parametervektor von kombinierten Hyperbelbandscharen enthält $6n + 4 \cdot \sum_{i=1}^n m_i$ Einträge, wobei n die Anzahl der Hyperbelbandscharen und m_i die Anzahl Hyperbelbänder je Hyperbelbandschar bezeichnet.

Mit einer solchen Kombination von Hyperbelbandscharen lassen sich gleichzeitig mehrere Kreuzungsarme erfassen. In den vorliegenden Versuchen wurden mit einer einzigen Hyperbelbandschar gleich zwei sich gegenüberliegende Kreuzungsarme beschrieben. Weitere Abbiegespuren können ebenfalls durch Hyperbelbandscharen erfasst werden. Eine vollständig ausgebaute Kreuzung, wie sie in den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen beschrieben wird, besteht aus vier Kreuzungsarmen, von denen jeweils zwei Kreuzungsarme sich gegenüberliegen⁵. Durch die Kombination von Hyperbelbandscharen steht somit ein Ansatz zur geometrischen Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen zur Verfügung.

4.4 Pfeilmarkierung

Nach den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen werden Pfeilmarkierungen in der Mitte einer Fahrspur aufgebracht. Wurden bereits – wie in Abschnitt 4.1 beschrieben – eine oder mehrere Fahrspuren detektiert, so kann die Suche nach Pfeilmarkierungen auf eine Umgebung der zur Verfügung stehenden Rückgrathyperbeln beschränkt werden. Diese Umgebung lässt sich in das vorgestellte Modell von Fahrspuren durch ein Hyperbelband U im Szenenbereich einführen, dessen ein- und auslaufender Ast dieselbe Breite ub besitzt. Der Dehnungsparameter eines solchen Hyperbelbandes wird dabei auf $\tau = 1$ gesetzt, sodass der Scheitelpunktabstand ebenfalls den Betrag ub besitzt.

Pfeilmarkierungen sind mit weißer oder gelber Farbe auf der Fahrbahn aufgebracht und erscheinen in Grauwertbildfolgen heller als der dunklere Fahrbahnuntergrund. Eine Analyse des Grauwertverlaufs entlang der Rückgrathyperbel eines an eine Fahrspur angepassten Hyperbelbandes im Bild kann deshalb Hinweise auf Pfeilmarkierungen liefern, die auf eine Fahrspur aufgebracht wurden. Zur Analyse des Grauwertverlaufs wird zu jedem Punkt der Rückgrathyperbel im Bild ein Wert ermittelt, der den Grauwertverlauf in der Umgebung berücksichtigt. An Stellen, an denen der geglättete Grauwertverlauf in Richtung der Rückgrathyperbel signifikant von Null verschiedene Steigungen besitzt, deutet

⁵Der Fall einer Einmündung lässt sich als Spezialfall durch Weglassen von Hyperbelbandscharen formulieren.

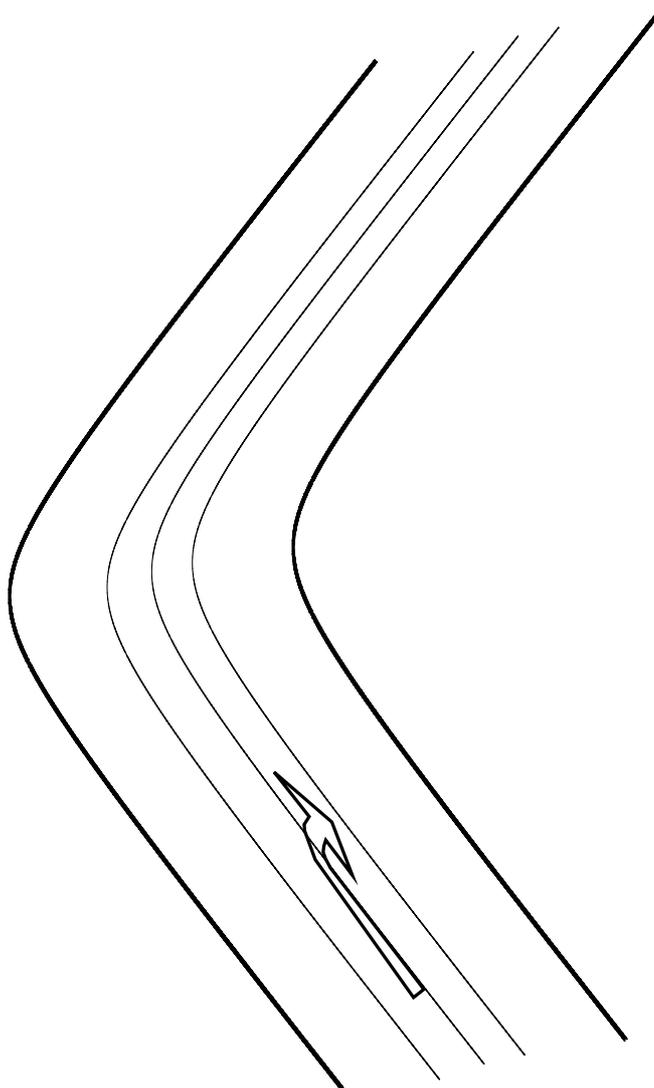


Abbildung 4.7: Pfeilmarkierungen werden in der Mitte von Fahrspuren aufgebracht. Wurde bereits ein Hyperbelband an das Abbild einer Fahrspur angepasst, so kann in einer Umgebung der Rückgrathyperbel eines angepassten Hyperbelbandes nach Pfeilmarkierungen gesucht werden. Eine solche Umgebung wird so gewählt, dass sie nur von der Breite der zu erwartenden Pfeilmarkierungen und einer Toleranz, die bauliche Abweichungen berücksichtigt, abhängig ist.

dies auf eine Veränderung des Grauwertverlaufs hin. Diese Stellen bilden die Grundlage zur Bildung von Bereichen, die Pfeilmarkierungskandidaten enthalten können. Solche Bereiche umfassen zwei benachbarte Stellen, an denen sich die Steigung des Grauwertverlaufs signifikant ändert, und berücksichtigen ebenfalls das umgebende Hyperbelband U .



Abbildung 4.8: Ganz links sind die Bildbereichshinweise eingefärbt, die sich aus dem Originalbild ergeben. Weiß dargestellt sind konvexe, schwarz konkave Grauwertverläufe, gelb Plateaus und grün Störungen (vgl. Text). Das mittlere Bild zeigt gefilterte Bildbereichshinweise, bei dem zu kleine Strukturen entfernt wurden. Ganz rechts sind die Ergebnisse der Analyse von Bildbereichshinweisen dem Originalbild überlagert, wobei die Konturen von vollständig abgebildeten Markierungskandidaten in Grün und die von teilweise abgebildeten Markierungskandidaten in Rot dargestellt sind. Die Kontur kann einfach durch „Umlaufen“ der im mittleren Bild weiß dargestellten Bereiche bestimmt werden, die vollständig von schwarzen Bereichen umgeben sind (Störungen werden hier dem konkaven Grauwertverlauf zugeordnet).

Zur Analyse des in einem detektierten Rechteck befindlichen Bildausschnittes wird der Grauwertverlauf in vier Arten von Bereichen unterteilt:

1. Mit *konkavem Grauwertverlauf* wird der Bereich bezeichnet, der in Richtung des maximalen Aufstieges der zugrundeliegenden Grauwertfunktion *vor einem Wendepunkt* liegt.
2. Mit *konvexem Grauwertverlauf* wird der Bereich bezeichnet, der in Richtung des maximalen Aufstieges der zugrundeliegenden Grauwertfunktion *nach einem Wendepunkt* liegt.
3. Mit *Plateau* wird der Bereich bezeichnet, der eine zu geringe Grauwertvariation aufweist, um dort zur Detektion von Markierungskandidaten Hinweise liefern zu können.
4. Mit *Störung* werden Stellen bezeichnet, die sich nicht eindeutig einem Plateau bzw. dem konvexen oder konkaven Grauwertverlauf zuordnen lassen.

Da Pfeilmarkierungen heller als der Fahrbahnbelag sind, eignen sich als Kandidaten für Pfeilmarkierungen alle konvexen Grauwertverläufe, die vollständig von konkaven Grauwertverläufen umschlossen sind. Dabei werden die Bereiche, die als Störung klassifiziert werden, dem konkaven Grauwertverlauf zugeschlagen. Dies reicht für den hier vorgestellten Ansatz aus. Verfeinerungen, bei denen Störungsfelder abhängig vom Kontext unterschiedlichen Bereichen zugeordnet werden, wurde ausführlich in [Mück 98] diskutiert. Die

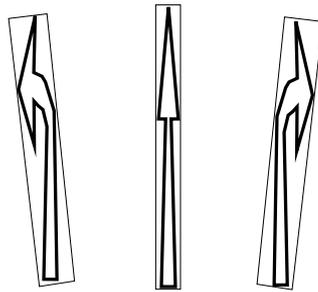


Abbildung 4.9: Eine einfache Klassifikation der Pfeilmarkierungen Linkspfeil, Geradeauspfeil und Rechtspfeil erhält man durch Untersuchung eines Rechtecks, das so um die Kontur von Markierungskandidaten gelegt wird, dass die Anzahl der nicht von der Kontur eingeschlossenen Punkte innerhalb des Rechtecks minimal wird. Die Orientierung der Rechtecke relativ zur Fahrspurmitte gibt schließlich Aufschluss um welche der drei Pfeilmarkierungen es sich handelt.

Kontur der Pfeilmarkierungskandidaten wird durch Umlaufen aller Bereiche mit konvexem Grauwertverlauf bestimmt (s. a. Abbildung 4.8).

Die Klassifikation der Pfeilmarkierungskandidaten erfolgt durch Hinzunahme von Wissen über Pfeilmarkierungen, das den Richtlinien für die Markierung von Stadtstraßen [RMS 80] entnommen wurde. Dabei müssen die Markierungskandidaten eine den Richtlinien entsprechende Länge und Breite erfüllen. Eine für die Ziele dieser Arbeit hinreichende Klassifikation der verbleibenden Pfeilmarkierungskandidaten gestaltet sich wie folgt: Um die Kontur des Pfeilmarkierungskandidaten wird ein Rechteck gelegt, sodass die Anzahl der nicht innerhalb der Kontur liegenden Bildpunkte minimal wird. Aufgrund der Orientierung des Rechtecks relativ zur Rückgrathyperbel der Fahrspur lassen sich die Pfeilmarkierungen Linkspfeil, Rechtspfeil und Geradeauspfeil unterscheiden (s. a. Abbildung 4.9).

Eine weiterführende Methode der Klassifikation ließe sich durch Messung der Überdeckung von Modellen einer Objektbibliothek mit dem Kandidaten entwickeln. Ebenso können Klassifikationsverfahren wie bei [Carlsson 96] beschrieben eingesetzt werden, um die Menge der Markierungsformen, die im Bild erkannt werden können, zu erhöhen.

Kapitel 5

Ergebnisse

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse basieren auf der Auswertung von Bildfolgen mit Aufnahmen von Verkehrsszenen des Bernhardus-Platzes und des Durlacher-Tors in Karlsruhe. Für die Aufnahmen von Verkehrsszenen am Bernhardus-Platz existieren zwei Bildfolgen mit unterschiedlichen Kameraeinstellungen. Alle drei Bildfolgen wurden mit einer stationär angebrachten Kamera-Anordnung und unveränderten Kameraeinstellungen über die Zeitdauer der Beobachtung aufgenommen. Für die Auswertung wurde die Transformation vom Bild- ins Szenenkoordinatensystem, die mit Hilfe einer Kamerakalibrierung gewonnen wurde, als bekannt vorausgesetzt.

5.1 Anpassung einzelner Fahrspuren

5.1.1 Verwendung von Hyperbelbändern mit einheitlicher Breite

Bild 5.1 zeigt ein Bild der Bildfolge mit Aufnahmen der Bernhardus-Platz-Szene. Diesem Bild ist eine Spezialisierung der geometrischen Beschreibung einer Fahrspur überlagert. Die bei dieser Fahrspurbeschreibung verwendeten Hyperbelbänder sind dabei verschieden eingefärbt. Mit Gelb wurde das Hyperbelband $G_l|_G G_r$ zur Beschreibung des Fahrspurverlaufs, mit Blau die Fahrspurberandungen $G_{l_1}|_{G_l} G_{l_2}$ sowie $G_{r_1}|_{G_r} G_{r_2}$ und mit Schwarz die Toleranzbänder $B_{l_1}|_{G_l} B_{l_2}$ sowie $B_{r_1}|_{G_r} B_{r_2}$ dargestellt. Um die Anzahl der anzupassenden Parameter möglichst gering zu halten, wurde bei den Versuchen in diesem Abschnitt für den ein- und auslaufenden Arm der Fahrspur dieselbe Breite angenommen. Ausgehend von einer Fahrzeugtrajektorie wird der Startwert für die Schätzung der Rückgrathyperbel einer Fahrspur im Szenenbereich bestimmt. Die Bestimmung einer solchen Fahrzeugtrajektorie erfolgt wie in Anhang C beschrieben. Die Rückprojektion der an die Fahrzeugtrajektorie angepassten Rückgrathyperbel G in den Szenenbereich wird nach Abschnitt 4.1.4 bestimmt. Von dieser Schätzung und den Angaben zur Breite der Fahrspur und der Fahrspurberandung hängen die Hyperbelbänder $G_{l_1}|_{G_l} G_{l_2}$ und $G_{r_1}|_{G_r} G_{r_2}$ ab. Um diese Hy-

perbelbänder werden die Toleranzbänder $B_{l_1|G_l}B_{l_2}$ und $B_{r_1|G_r}B_{r_2}$ bestimmt, die in den vorliegenden Experimenten eine konstante Breite über alle Iterationen hinweg besitzen. Nur Kantenelemente innerhalb dieser Toleranzbänder werden den Hyperbelbändern der Fahrspurberandung zugeordnet. Die Auswahl von Kantenelementen ist durch die Berücksichtigung der Mahalanobis-Distanz der Kantenelemente von der Zustands- und Messunsicherheit abhängig. Eine Veränderung der Breite des Toleranzbandes erscheint deshalb als nicht sinnvoll. Die rot eingefärbten Kantenelemente innerhalb des Toleranzbandes $B_{l_1|G_l}B_{l_2}$ werden dabei der Hyperbel G_{l_1} und innerhalb des Toleranzbandes $B_{r_1|G_r}B_{r_2}$ der Hyperbel G_{r_1} zugeordnet. Grün eingefärbte Kantenelemente werden entsprechend der Hyperbel G_{l_2} zugeordnet, wenn sie innerhalb des Toleranzbandes $B_{l_1|G_l}B_{l_2}$ liegen, und sie werden der Hyperbel G_{r_2} zugeordnet, wenn sie sich innerhalb des Toleranzbandes $B_{r_1|G_r}B_{r_2}$ befinden.

Für insgesamt drei Fahrspuren wurden jeweils zwei Experimente durchgeführt: Für jedes Experiment wurden zwei verschiedene Fahrspurbreiten beim Startzustand angenommen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.2-5.4 zusammengefasst.

Bei allen Experimenten wurde die empirisch eingestellte Abbruchschwelle nicht erreicht und die Anpassung nach einer voreingestellten maximalen Anzahl von 20 Iterationen abgebrochen. Die Anpassung konvergierte dabei in keinem Fall, sondern die Lage der Hyperbeln des Fahrspurberandungsmodells oszillierte zum Teil 5-6 mal um die gesuchte Position der abgebildeten Fahrspurberandung. Im Fall der ganz rechts liegenden Fahrspur (s. Abbildung 5.4) divergierte die Anpassung bei einer Fahrspurbreite von 4.00m. Im Gegensatz zu den beiden anderen im Experiment verwendeten Fahrspuren besitzt diese Fahrspur im unteren Bereich in der Szene tatsächlich eine Breite von 5.00m. Die Wahl der Darstellung eines Iterationsschrittes erfolgte anhand des über den gesamten Zeitraum festgestellten niedrigsten Residuums. Bis auf die Anpassung der ganz rechten Fahrspur mit einem Startwert von 5.00m für die Fahrspurbreite korrelierte die vorgegebene Fahrspurbreite mit der Anpassung des Fahrspurmodells an den breiteren oder schmaleren Abschnitt der realen Fahrspur.

Diese letzte Beobachtung legt den Schluss nahe, dass die Oszillation auf eine wechselnde Anpassung des Fahrspurmodells an den schmaleren bzw. breiteren Fahrspurabschnitt erfolgt. Die Experimente 5.1.2 untersuchen deshalb die Anpassung eines Fahrspurmodells mit unterschiedlichen Fahrspurbreiten für den ein- bzw. auslaufenden Arm einer Fahrspur.

Die Erklärung der Divergenz und der schlechten Anpassung des Fahrspurmodells an die rechte Fahrspur (s. Abbildung 5.4) ist vermutlich auf die starke Verdeckung und die dadurch sehr stark auftretenden Fehlzuordnungen von Kantenelementen zurückzuführen, die dem Abbild der rechts neben der Fahrspur angepflanzten Bäume entspringen.

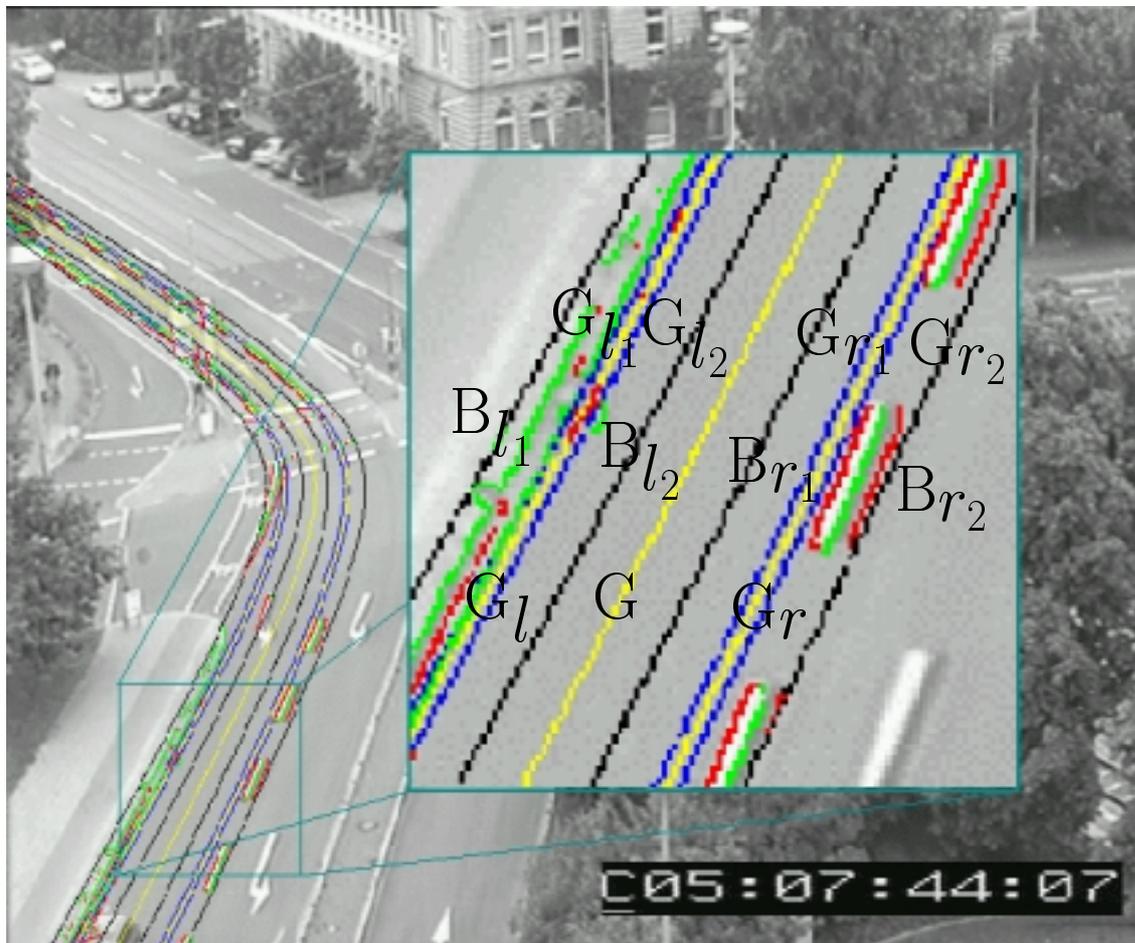


Abbildung 5.1: Ausgangspunkt für die Beschreibung einer gekrümmten Fahrspur ist die gelbe Rückgrathyperbel G in der Mitte der Fahrspur. Zur Beschreibung dieser Fahrspur wird das gelb gezeichnete Hyperbelband $G_l|_G|G_r$ herangezogen. Rechts und links davon sind in Blau die zwei Hyperbelbänder $G_{l1}|_{G_l}|G_{l2}$ und $G_{r1}|_{G_r}|G_{r2}$ eingezeichnet, die die Fahrspurberandung repräsentieren. Die in Schwarz eingezeichneten Hyperbelbänder $B_{l1}|_{G_l}|B_{l2}$ und $B_{r1}|_{G_r}|B_{r2}$ jeweils um die linke und rechte Fahrspurbegrenzung stellen Toleranzbänder dar, innerhalb derer den Hyperbeln der Fahrspurberandungen Kantenelemente zugeordnet werden. Die rot eingefärbten Kantenelemente innerhalb des Toleranzbandes $B_{l1}|_{G_l}|B_{l2}$ werden dabei der Hyperbel G_{l1} und innerhalb des Toleranzbandes $B_{r1}|_{G_r}|B_{r2}$ der Hyperbel G_{r1} zugeordnet. Grün eingefärbte Kantenelemente werden entsprechend der Hyperbel G_{l2} zugeordnet, wenn sie innerhalb des Toleranzbandes $B_{l1}|_{G_l}|B_{l2}$ liegen, und sie werden der Hyperbel G_{r2} zugeordnet, wenn sie sich innerhalb des Toleranzbandes $B_{r1}|_{G_r}|B_{r2}$ befinden.

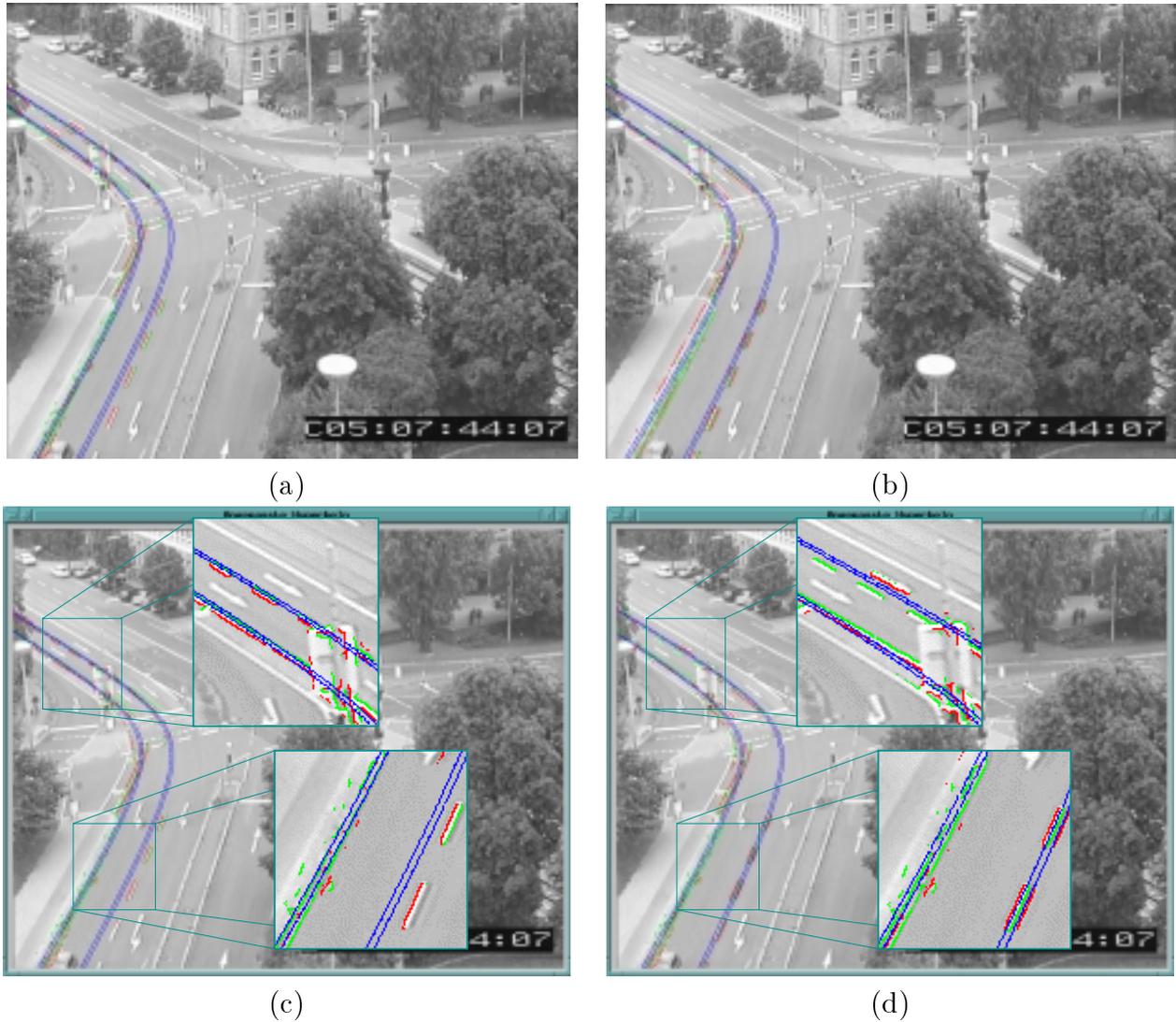


Abbildung 5.2: Die Bilder (a) und (b) zeigen den Startzustand der Hyperbelbandanpassung. Links wird eine Spurbreite von 3.00m und rechts eine Spurbreite von 4.00m angenommen. Die Bilder (c) und (d) zeigen die Anpassungsergebnisse mit dem kleinsten Residuum, das beim Durchlaufen von 20 Iterationen aufgetreten ist. Auch hier entsprechen die jeweils angenommenen Fahrspreibreiten den Anpassungsergebnissen. Die zugrundeliegende Trajektorie wurde *datengetrieben* nach [Middendorf 99] ermittelt.

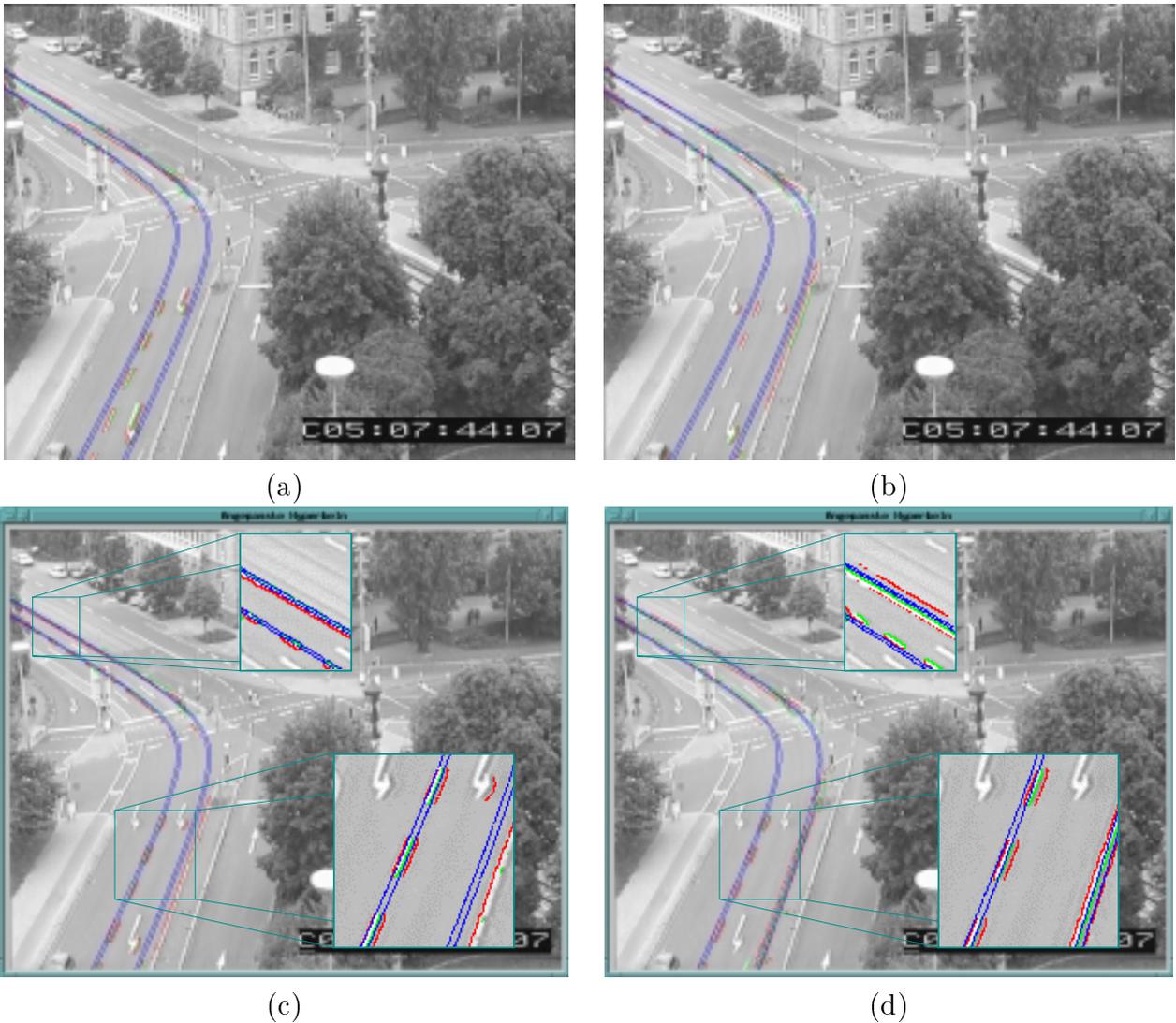


Abbildung 5.3: Die Bilder (a) und (b) zeigen den Startzustand der Hyperbelbandanpassung. Links wird eine Spurbreite von 3.00m und rechts eine Spurbreite von 4.00m angenommen. Die Bilder (c) und (d) zeigen die Anpassungsergebnisse mit dem kleinsten Residuum, das beim Durchlaufen von 20 Iterationen aufgetreten ist. Auch hier entsprechen die jeweils angenommenen Fahrschuldbreiten den Anpassungsergebnissen. Die zugrundeliegende Trajektorie wurde datengetrieben ermittelt.

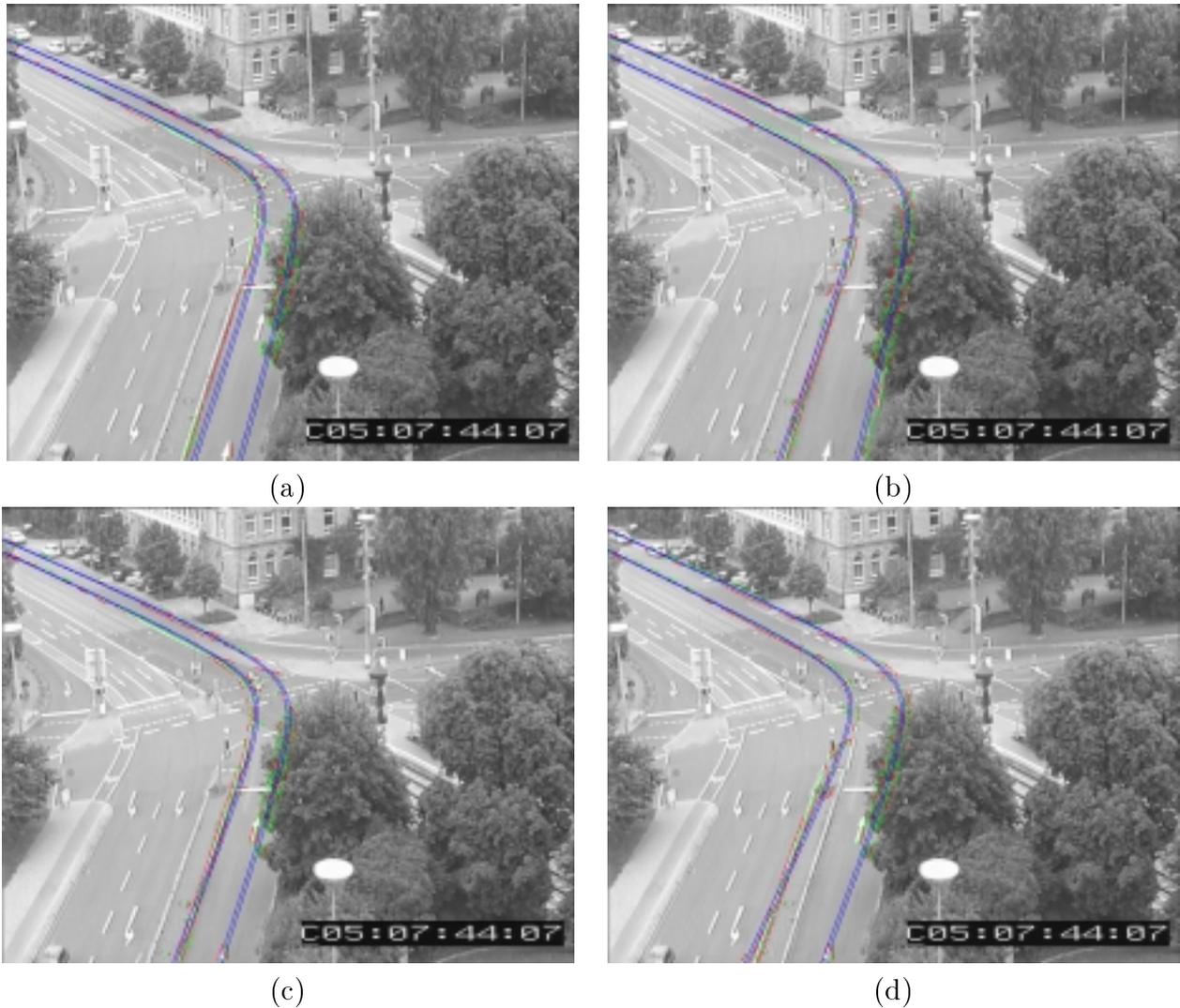


Abbildung 5.4: Die Bilder (a) und (b) zeigen den Startzustand der Hyperbelbandanpassung. Links wird eine Spurbreite von 3.00m und rechts eine Spurbreite von 5.00m angenommen. Die Bilder (c) und (d) zeigen die Anpassungsergebnisse mit dem kleinsten Residuum, das beim Durchlaufen von 20 Iterationen aufgetreten ist. Die zugrundeliegende Trajektorie wurde datengetrieben ermittelt. Im Bild (d) weicht die Anpassung deutlich von der realen Fahrspur ab. Dies ist auf die starke Verdeckung und eine große Anzahl Fehlzuordnungen von Kantenelementen an Hyperbeln im Bereich der Baumabbilder zurückzuführen.

5.1.2 Verwendung von Hyperbelbändern mit unterschiedlichen Breiten

Die in den Abbildungen 5.5 und 5.6 vorgestellten Ergebnisse basieren auf den gleichen Voraussetzungen und Daten, wie sie bereits im Abschnitt 5.1.1 vorgestellt wurden. Im Gegensatz zu den Experimenten dort wurde für die nachfolgend vorgestellten Experimente ein Hyperbelband mit unterschiedlichen Breiten der beiden Arme zur Anpassung verwendet, sodass für die zur Kreuzung hin- und für die von der Kreuzung wegführenden Arme von Fahrspuren auch unterschiedliche Fahrspurbreiten angesetzt werden konnten. Bei den Experimenten in Abbildung 5.5 konnte ein Hyperbelband an die beiden vom Betrachter links liegenden Fahrspuren angepasst werden. Für die vom Betrachter aus ganz rechts liegende Fahrspur war eine Anpassung eines Hyperbelbandes an Bilder einer Bildfolge der Bernhardus-Platz-Szene nicht erfolgreich. Um die Ursache des Misserfolgs herauszufinden, wurden drei verschiedene Experimente durchgeführt. Dabei wurden bei allen Experimenten Trajektorien verwendet, die einem *modellbasierten* Ansatz entspringen (s. [Haag 98]). Damit sollte ausgeschlossen werden, dass eine für die Anpassung dieser Fahrspur nicht geeignete Initialisierung des Schätzprozesses vorgenommen wird. Im ersten Experiment wurde die Anpassung wie bei den bisher vorgestellten Experimenten der Abbildung 5.5 durchgeführt. Dabei divergierte die Anpassung des auslaufenden Armes des Hyperbelbandes, das an die Geradeausspur angepasst werden sollte, sodass der Anpassungsvorgang abgebrochen wurde. Im zweiten Experiment wurde die rechte Fahrstreifenberandung im auslaufenden Arm interaktiv ergänzt. Dennoch divergierte auch hier die Anpassung eines Hyperbelbandes im auslaufenden Arm. Beim dritten Experiment wurden die Kantenelemente interaktiv extrahiert, die augenscheinlich der Fahrspurberandung zugeordnet werden konnten. In diesem Falle konnte ein Hyperbelband erfolgreich angepasst werden. Ein Grund für das Scheitern der Anpassungen im ersten und zweiten Experiment sind demnach störende Einflüsse von Kantenelementen, die nicht der Fahrspurberandung im auslaufenden Arm zugeordnet werden können. Bei allen Experimenten bis auf die Anpassung der im Bild ganz rechts gelegenen Fahrspur (Abbildung 5.6) wurde die vorgegebene Abbruchschwelle bei der im Aktualisierungsschritt durchgeführten Iteration erreicht. Für alle Experimente wurde derselbe Parametersatz verwendet. Beim Initialisierungsschritt wurde für die zur Kreuzung hinführende Fahrspur eine Breite von 2,50m, für die wegführende Fahrspur eine Breite von 3,50m und für die Breite der Fahrbahnmarkierung eine Breite von 0,12m gewählt. Die Breite des Toleranzbandes wurde auf 0,75m gesetzt und nicht geschätzt.

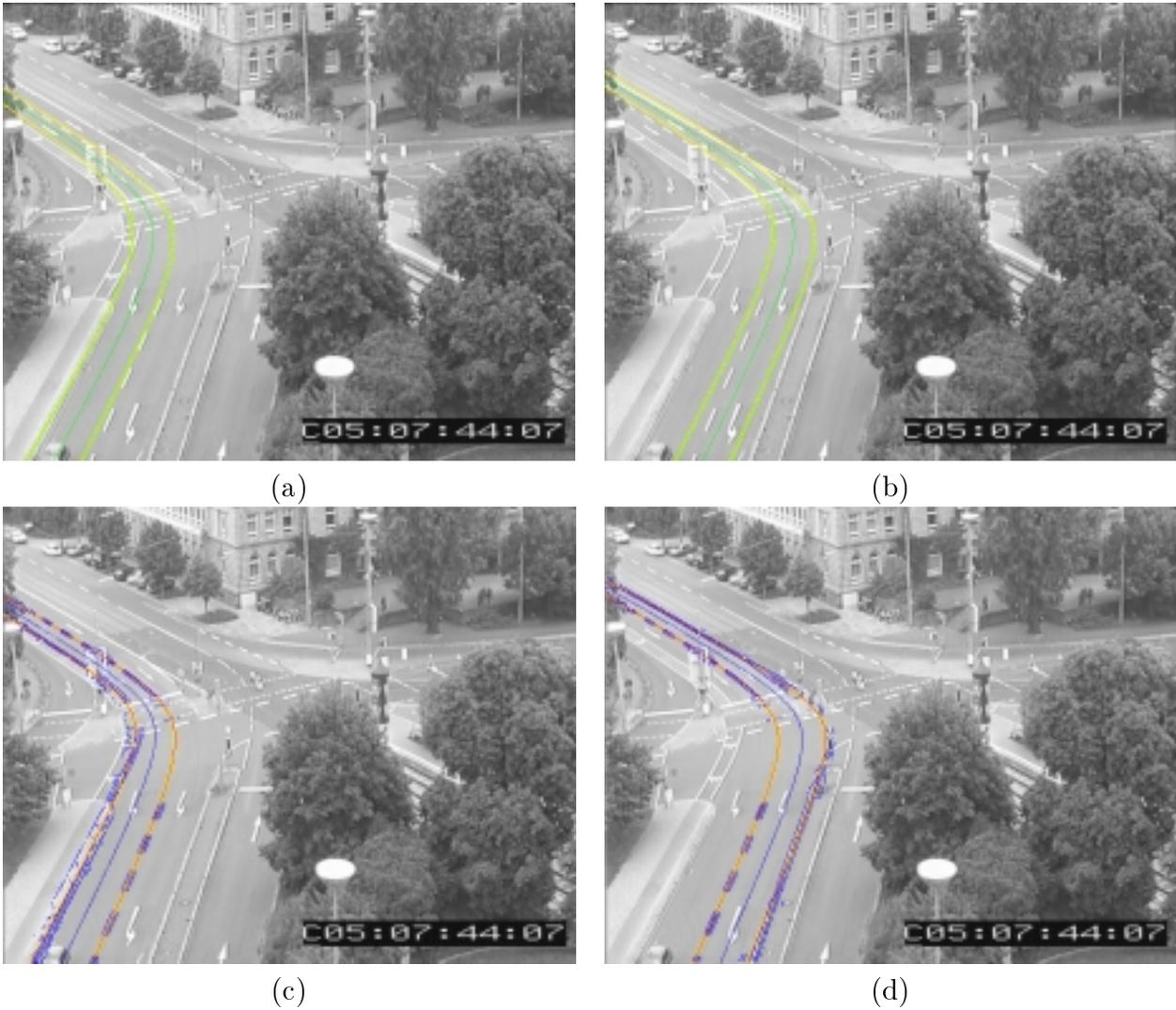


Abbildung 5.5: Die Bilder (a) und (b) zeigen den Startzustand der Hyperbelbandanpassung. Die Bilder (c) und (d) zeigen die Anpassungsergebnisse. In Gelb sind dabei die Hyperbelbänder der Fahrspurberandung eingezeichnet. In den beiden unteren Bildern wurden die zur Anpassung herangezogenen Kantenelemente blau eingefärbt.

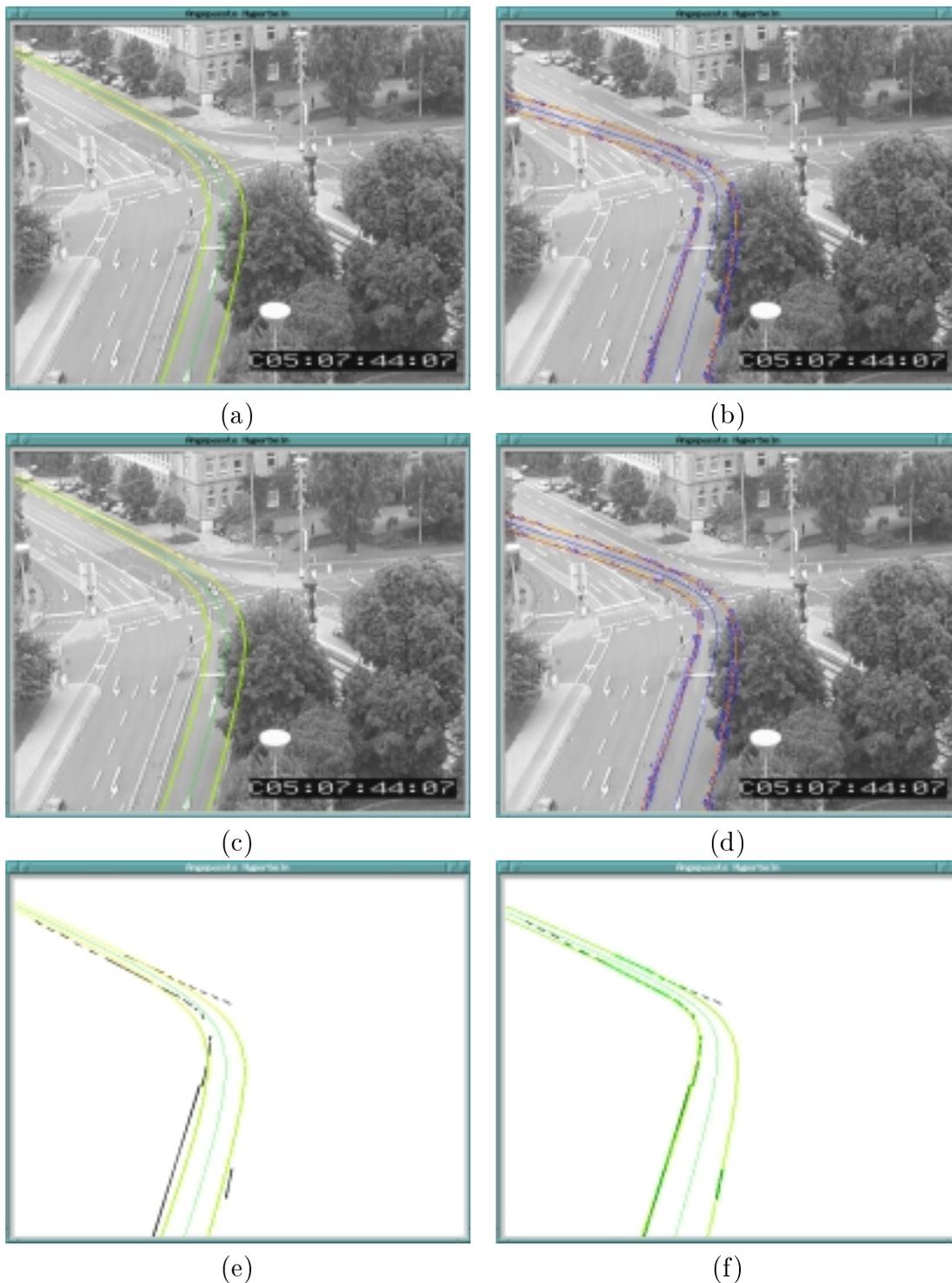


Abbildung 5.6: Die Bilder (a),(c) und (e) zeigen den Startzustand der Hyperbelbandanpassung, die Bilder (b), (d) und (f) deren Ergebnis. In allen Beispielen wurden Trajektorien verwendet, die einem modellbasierten Ansatz entspringen. Beim Experiment (c)/(d) wurde interaktiv die (fehlende) rechte Fahrspurberandung der von der Kreuzung wegführenden Fahrspur im Bild ergänzt. Trotzdem schlägt in den Experimenten (a)/(b) und (c)/(d) die Anpassung im oberen Bereich fehl. Beim Experiment in der untersten Zeile wurden die Kantenelemente der Fahrspur interaktiv extrahiert. Diesmal konnte die Anpassung erfolgreich durchgeführt werden.

5.2 Anpassung von Hyperbelbandscharen - Kreuzungsarm

5.2.1 Straßenverkehrsszene am Bernhardus-Platz

Das im Abschnitt 4.2.1 beschriebene Verfahren wurde für die Anpassung einer Hyperbelbandschar an die Abbildung eines Kreuzungsarms der Straßenverkehrsszene am Bernhardus-Platz verwendet. Zur Generierung einer Hyperbelbandmenge \mathcal{M} dienten Trajektorien, die durch datengetriebene Verfolgung von Fahrzeugen auf den Geradeausspuren des Kreuzungsarmes, der im Bild von oben nach unten verläuft, gewonnen wurden (s. a. [Middendorf 99]). Hyperbeln, die an diese Trajektorien angepasst wurden, dienten schließlich als Rückgrathyperbeln für drei Hyperbelbänder, die die drei abgebildeten Geradeausspuren beschreiben sollen. Sowohl für den ein- als auch für den auslaufenden Ast aller so gefundenen Hyperbelbänder wurde eine Breite von 3.50m als Startwert gewählt. Der Dehnungsparameter wurde einheitlich auf $\tau = 1.0$ gesetzt. Die Breiten für das zusätzliche Hyperbelband wurden auf einen Startwert von 3.50m und 6.50m festgelegt. Die Breiten der Randbegrenzungen wurden mit 0.12m initialisiert. Alle Startwerte und alle aus der Kantenelementanpassung resultierenden Werte für die Parameter der Hyperbelbandschar sind in der Tabelle 5.1 aufgelistet.

Bei der Anpassung der Hyperbelbandschar mittels Kantenelementanpassung wurden in Anlehnung an die im Abschnitt 4.2.1 angestellten Betrachtungen somit 22 Parameter geschätzt. Das obere Bild in Abbildung 5.7 zeigt die Trajektorien (rot), die durch datengetriebene Verfolgung ermittelt wurden. In Gelb wurden die dazu gehörigen Hyperbelbänder eingezeichnet. Im unteren Bild sieht man die aus diesen Hyperbelbändern resultierende Hyperbelbandschar. Das Ergebnis der Anpassung ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

Eine weitere Anpassung einer Hyperbelbandschar wurde an einer Bildfolge durchgeführt, die dieselbe Kreuzung von einer anderen Kameraposition aus zeigt. Abbildung 5.9 zeigt wiederum die Ausgangsposition der Anpassung und Abbildung 5.10 das Ergebnis.

Position $[m]$ m_x	Orient. $[^\circ]$ θ	Form a	Öffnung $[^\circ]$ η	Fahrspurbreiten $[m]$				τ		Fahrspurbegrenzung $[m]$						
				einl. Ast	ausl. Ast	einl. Ast	ausl. Ast	1.00	1.00	1.00	1.00	0.12	0.12	0.12	0.12	
29.66	-6.77	5.0024	71.2732	3.50	6.50	3.50	3.50	3.50	1.00	1.00	1.00	1.00	0.12	0.12	0.12	0.12
28.87	-7.27	4.9758	71.2714	2.81	6.72	4.90	3.60	3.28	1.09	1.36	0.78	1.07	0.12	0.12	0.14	0.13
23.19	-9.09	3.7014	72.8276	3.50	6.50	3.50	3.50	3.50	1.00	1.00	1.00	1.00	0.120	0.120	0.120	0.120
24.27	-8.82	3.6908	72.8276	3.42	8.24	4.76	3.63	3.59	1.02	0.98	0.80	1.07	0.115	0.118	0.071	0.077

Tabelle 5.1: Im oberen Teil der Tabelle sind die Werte der Anpassung aus der ersten Kameraposition und im unteren Teil die Werte der zweiten Anpassung dargestellt. Dabei entspricht die jeweils erste Zeile den Startwerten, die zweite Zeile den durch eine Kantenelementanpassung geschätzten Werten für die 22 Parameter, die zur Beschreibung eines Kreuzungsarms der Bernhardus-Platz-Szene mittels Hyperbelbandschar notwendig sind. Alle Werte sind im Szenenbereich angegeben. Zur Bestimmung aller Parameter waren bei der ersten Anpassung 10 und bei der zweiten Anpassung 9 Iterationsschritte notwendig.

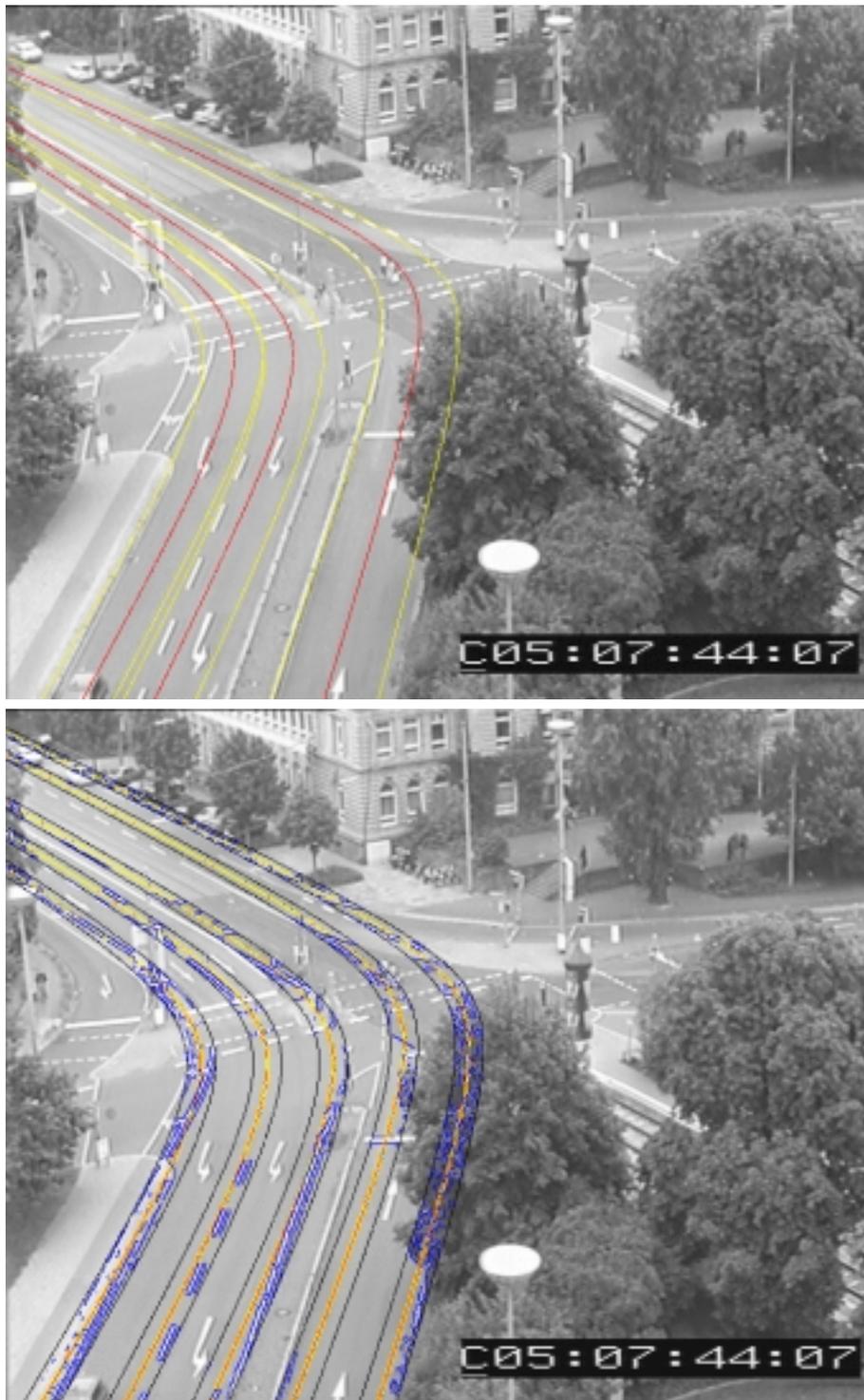


Abbildung 5.7: Im oberen Bild wurde ausgehend von den durch datengetriebene Verfolgung von Fahrzeugen (s. a. [Middendorf 99]) gewonnenen Trajektorien (rot) jeweils ein Hyperbelband (gelb) zur Beschreibung der Fahrspuren bestimmt. Die Fahrspurbreiten und der Trennstreifen am unteren Bildrand wurden mit 3.50m und der Parameter τ zur Bestimmung der Scheitelpunktabstände mit 1.0 festgelegt. Die Breite des Straßenbahnbereichs am oberen Bildrand wurde mit 6.50m angesetzt. Aus diesen Hyperbelbändern wurde im unteren Bild eine Hyperbelbandschar gebildet. Diese Hyperbelbandschar diente als Ausgangspunkt für die Anpassung an die Fahrspurbegrenzungen im Bild.



Abbildung 5.8: Dieses Bild zeigt das Ergebnis des Anpassprozesses, bei dem die in Abbildung 5.7 dargestellte Hyperbelbandschar an das Abbild eines Kreuzungsarmes der Bernhardus-Platz-Szene angepasst wurde. Beim Anpassprozess mittels Kantenelementanpassung wurden insgesamt 22 Parameter gleichzeitig geschätzt.

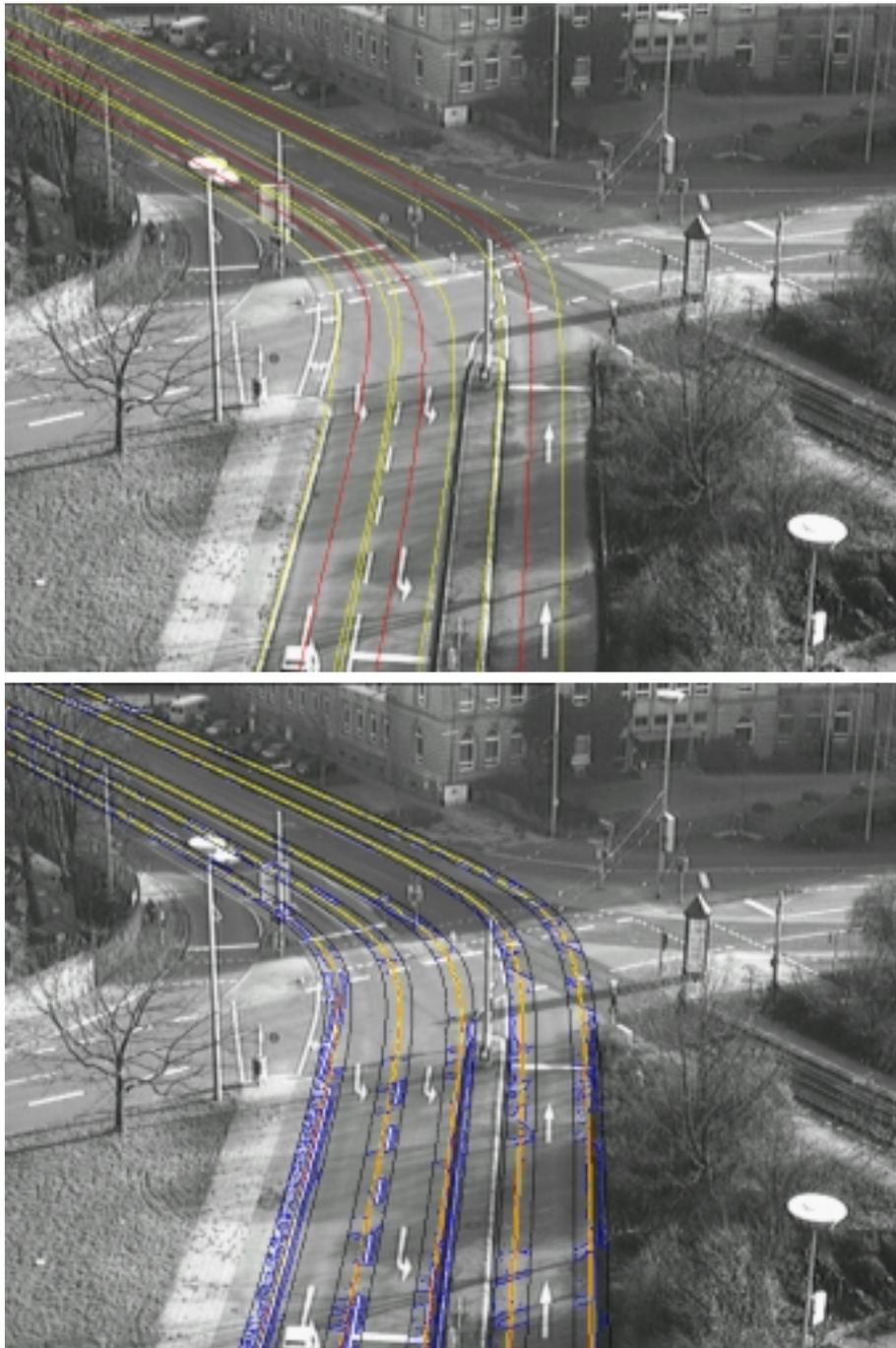


Abbildung 5.9: Im oberen Bild wurde ausgehend von den durch datengetriebene Verfolgung von Fahrzeugen (s. a. [Middendorf 99]) gewonnenen Trajektorien (rot) jeweils ein Hyperbelband (gelb) zur Beschreibung der Fahrspuren bestimmt. Die Fahrspurbreiten und der Trennstreifen am unteren Bildrand wurden mit 3.50m und der Parameter τ zur Bestimmung der Scheitelpunktabstände mit 1.0 festgelegt. Die Breite des Straßenbahnbereichs am oberen Bildrand wurde mit 6.50m angesetzt. Aus diesen Hyperbelbändern wurde im unteren Bild eine Hyperbelbandschar gebildet. Diese Hyperbelbandschar diente als Ausgangspunkt für die Anpassung an die Fahrspurbegrenzungen im Bild.

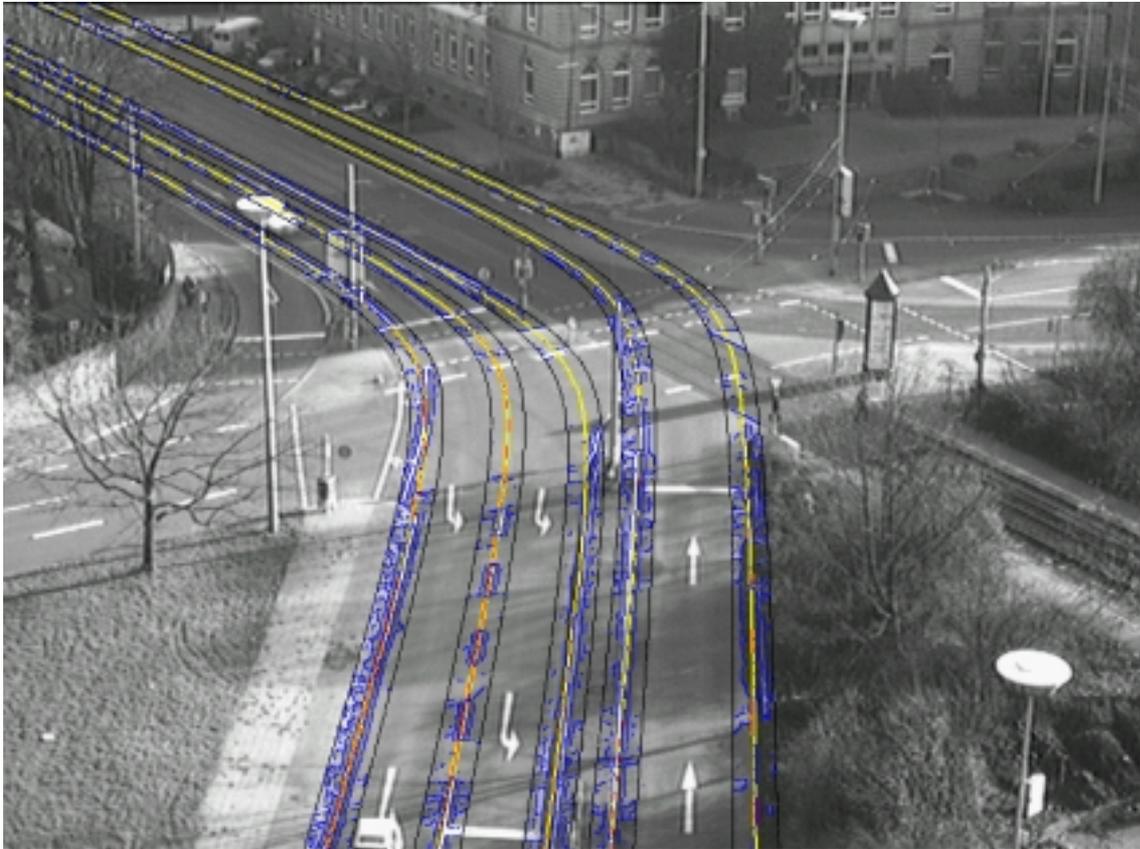


Abbildung 5.10: Dieses Bild zeigt das Ergebnis des Anpassprozesses, bei dem die in Abbildung 5.9 dargestellte Hyperbelbandschar an das Abbild eines Kreuzungsarmes der Bernhardus-Platz-Szene angepasst wurde. Beim Anpassprozess mittels Kantenelementanpassung wurden insgesamt 22 Parameter gleichzeitig geschätzt. Die Anpassung ist trotz außerordentlich kontrastreicher Schlagschatten und einer darauf beruhenden ungewöhnlich hohen Zahl von Kantenelementen im Fahrbahnbereich erfolgreich: Die in dem *datengetrieben* ermittelten Fahrzeugtrajektorien bereitgestellten Initialisierungshypothesen sowie die Auswertung der Gradientenrichtung ermöglichen eine effiziente und tragfähige Auswahl der bei der Anpassung zu berücksichtigenden Kantenelemente.

5.2.2 Straßenverkehrsszene am Durlacher–Tor–Platz

Die Bildfolge der Straßenverkehrsszene am Durlacher–Tor–Platz ist zeitlich sehr kurz und besteht lediglich aus 50 Vollbildern. Daraus ergeben sich verschiedene Probleme:

1. Die Verfolgung von Fahrzeugen ist nur über einen kurzen Zeitraum möglich und ergibt aufgrund der begrenzten Geschwindigkeit der Fahrzeuge auch nur kurze Trajektorien im Bild, die einzeln die Straßenführung für die rechnergestützte Erkennung der Kreuzung nicht geeignet repräsentieren.
2. Verdeckungen, hervorgerufen durch bewegte Fahrzeuge, lassen sich nicht in jedem Fall auflösen.
3. Keines der beobachteten Fahrzeuge befährt den auslaufenden Ast des Kreuzungsarms im linken oberen Bildrand hinreichend weit, um den weiteren Verlauf der Straßenführung aus den Fahrzeugtrajektorien zu schätzen. Außerdem ist in diesem Bereich der Kontrast durch Gebäudeschatten sehr niedrig, was eine zuverlässige Extraktion von Kantenelementen, die der Fahrspurberandung zugeordnet werden können, erschwert.

Unabhängig von der Kürze der Bildfolge ergaben sich Probleme bei der Schätzung von Kantenelementen im Bereich des auslaufenden Astes der beobachteten Abbiegespuren.

Um dennoch bei den nachfolgenden Versuchen eine Schätzung der Abbiegespuren zu erhalten, wurden die folgenden Heuristiken angewandt:

1. Die Trajektorien der einzelnen verfolgten Fahrzeuge wurden konkateniert. Die Zuordnung der Trajektorien zu den Abbiegespuren erfolgte interaktiv.
2. Verdeckungen, die durch bewegte Fahrzeuge entstanden, wurden durch die Erzeugung synthetischer Bilder berücksichtigt. Dabei wurde für jeden Bildpunkt ein zeitlicher Medianfilter angesetzt. Diese Heuristik führt dann zum Erfolg, wenn die Verdeckung jedes Szenenpunktes zeitlich kleiner als die halbe Dauer des Beobachtungszeitraumes ist. In diesem Falle sind mindestens 50% der Abbilder desselben Szenenpunktes zu einem unverdeckten Zeitpunkt aufgenommen worden. Der Medianfilter angewandt auf die zeitliche Veränderung eines Bildpunktes liefert somit einen Wert zu einem unverdeckten Zeitpunkt.
3. Im auslaufenden Ast des Kreuzungsarms wurden in einem der nachfolgenden Experimente die Trajektorien durch weitere Stützpunkte im Bild interaktiv erweitert, um die Straßenführung hinreichend gut repräsentieren zu können.
4. Im letzten Experiment wurde die einheitliche Fahrspurbreite im auslaufenden Ast beider beobachteten Abbiegespuren als zusätzliche Bedingung untersucht.

Für alle nachfolgenden Experimente wurden die beiden ersten Heuristiken zugrundegelegt. Ebenso wurde für alle Experimente eine Fahrspurbreite von 2.80m, eine Breite der Fahrspurbegrenzungen von 0.12m und für den Parameter τ der Wert 1.0 angenommen. Insgesamt mussten bei der Anpassung der Hyperbelbandschar mittels der Kantenelementanpassung 14 Parameter gleichzeitig geschätzt werden.

Im ersten Experiment wurden keine weiteren Heuristiken eingesetzt. Die Abbildung 5.11 zeigt im oberen Bild die beiden Rückgrathyperbeln (rot), die aus der Konkatenierung einzelner durch datengetriebene Verfolgung der im Bild beobachteten Fahrzeuge berechneter Trajektorien bestimmt wurden. In Gelb wurden die zu den berechneten Rückgrathyperbeln gehörenden Hyperbelbänder eingezeichnet. Man sieht deutlich, dass die Rückgrathyperbeln aufgrund der fehlenden Fahrzeugbewegung im auslaufenden Ast der Abbiegespuren die Straßenführung nicht geeignet repräsentieren. Im unteren Bild der Abbildung 5.11 wurde aus den beiden Hyperbelbändern eine Hyperbelbandschar bestimmt, die an die Fahrspurbegrenzungen angepasst wurden. Das Ergebnis dieser Anpassung ist in der Abbildung 5.12 dargestellt. Im einlaufenden Ast konnte die Anpassung erfolgreich durchgeführt werden. Im auslaufenden Ast war dies aufgrund der schlechten Initialisierung nicht möglich. Diese Beobachtung lässt sich durch die nachfolgenden Experimente stützen.

Im zweiten Experiment wurden gemäß der geschilderten Heuristiken Stützpunkte für die Rückgrathyperbel im Bild interaktiv beim auslaufenden Ast der Abbiegespuren so eingeführt, dass die resultierenden Hyperbelbänder als Initialisierung für den Anpassvorgang geeignet sind. Diese Hyperbelbänder wurden in der Abbildung 5.13 im oberen und die daraus bestimmte Hyperbelbandschar im unteren Bild dargestellt. In beiden Bildern ist der auslaufende Ast der Abbiegespuren hinreichend gut repräsentiert. Das Ergebnis der Anpassung ist in Abbildung 5.14 zu sehen. Hier fällt auf, dass das mittlere Hyperbelband zur Beschreibung der mittleren Fahrspurbegrenzung im auslaufenden Ast nicht korrekt geschätzt wurde, während die beiden äußeren Fahrspurbegrenzungen den tatsächlichen Verlauf hinreichend gut repräsentieren. Dieses Ergebnis lässt sich auf die schlechte Bestimmung von Kantenelementen, die der mittleren Fahrspurbegrenzung zugeordnet werden können, zurückführen. Eine Verbesserung der Anpassung könnte möglicherweise durch eine bessere Schätzung von zuverlässigen Kantenelementen erreicht werden.

Im dritten Experiment wurde aufbauend auf dem zweiten Experiment die zusätzliche Bedingung eingeführt, dass die Breiten der Fahrspuren im auslaufenden Ast der Abbiegespuren gleich sind. Damit wurden nicht wie bei den beiden anderen Experimenten 14, sondern nur 13 Parameter gleichzeitig geschätzt. Diese Zwangsbedingung wurde nach der in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Methode in der Implementierung berücksichtigt. Diese Zwangsbedingung bezieht sich nur auf den Schätzprozess, sodass für dieses Experiment dieselben Startbedingungen gelten, die bereits in Abbildung 5.13 zu sehen sind. Das Ergebnis des dritten Experimentes ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Die Anpassung im einlaufenden Ast ist nicht mehr so gut geschätzt worden wie bei den bisherigen Experimenten, jedoch gelang diesmal eine bessere Anpassung im Bereich des auslaufenden Astes.

In Tabelle 5.2 sind die Werte der Parameter aufgelistet, die beim Anpassprozess der vorgestellten Experimente geschätzt wurden. Die erste Zeile je Experiment gibt die Startwerte, die zweite Zeile die geschätzten Werte wieder.

Experiment/ Iterationen []	Position [m]		Orientierung [°] θ	Form a	Öffnung [°] η	Fahrspurbreiten [m]		τ	Fahrspurbegrenzung [m]		
	m_x	m_y				einl. Ast	ausl. Ast				
1 [21]	-19.54	-22.58	39.7150	21.5878	39.0494	2.80	2.80	1.00	1.00	0.12	0.12
	-23.41	-18.77	33.8589	21.5944	39.1739	2.64	2.41	0.88	0.99	0.35	0.42
2 [49]	-18.71	-24.77	42.9661	22.1420	36.7183	2.80	2.80	1.00	1.00	0.12	0.12
	-19.96	-19.97	42.0151	22.1248	36.9055	2.89	1.30	0.31	0.96	0.06	0.12
3 [7]	-18.71	-24.77	42.9661	22.1420	36.7183	2.80	2.80	1.00	1.00	0.12	0.12
	-19.90	-23.31	42.4082	22.1169	36.8227	1.61	2.71	0.68	1.03	0.05	0.17

Tabelle 5.2: Die angegebenen Werte repräsentieren je Experiment, das bei der Anpassung einer Hyperbelbandschar an Abbilder der Durlacher-Tor-Szene durchgeführt wurde, in der ersten Zeile die Startwerte und in der zweiten Zeile die geschätzten Werte je Parameter. Alle Werte sind im Szenenbereich angegeben.

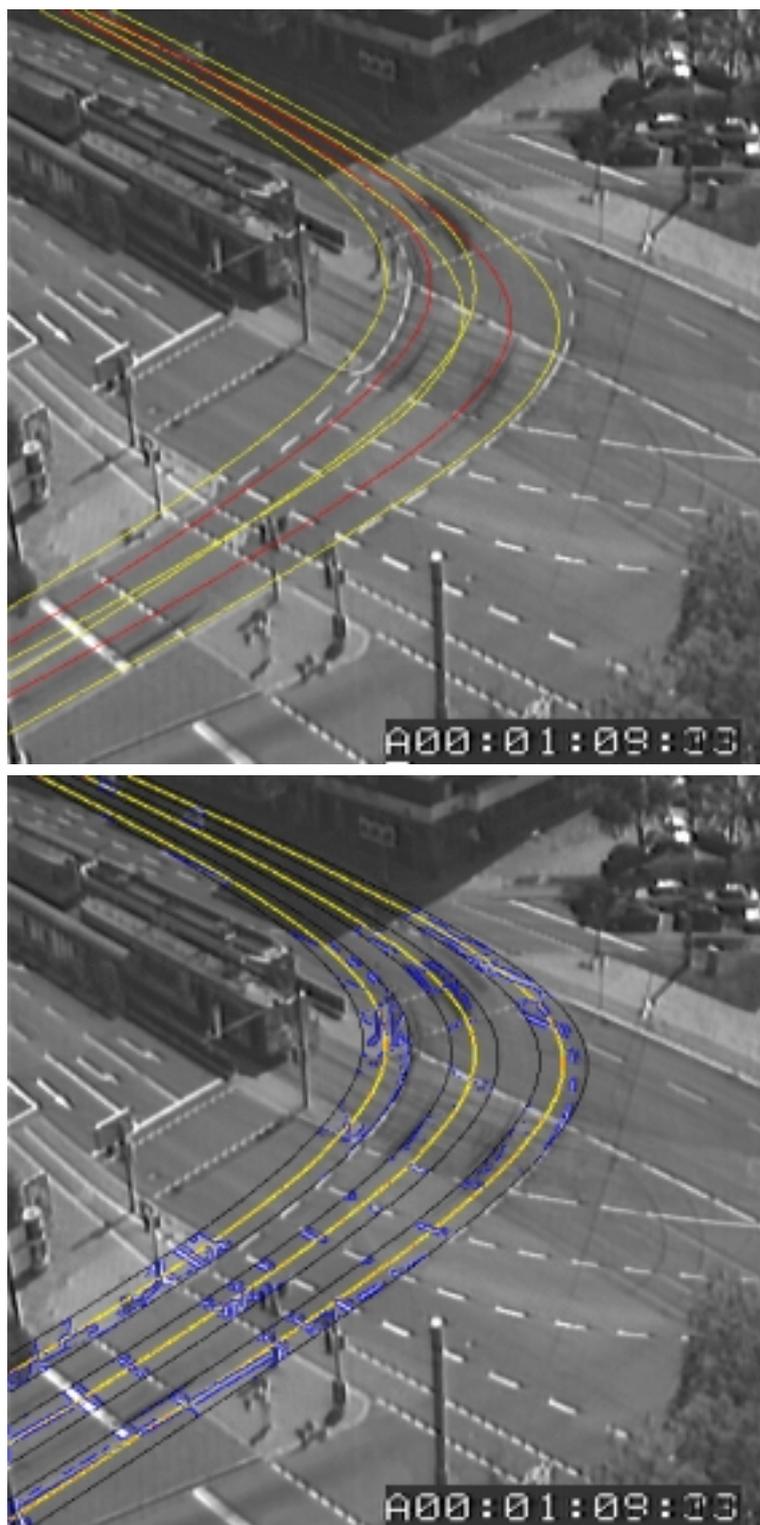


Abbildung 5.11: Die im oberen Bild rot dargestellten Rückgrathyperbeln wurden mittels datengetriebener Verfolgung von Fahrzeugen (s.a. [Middendorf 99]) und Konkatenation der daraus resultierenden Fahrzeugtrajektorien je Fahrspur ermittelt. Aufgrund fehlender Fahrzeugbewegungen konnte der auslaufende Ast der Abbiegespuren mit den Rückgrathyperbeln nicht geeignet beschrieben werden. Aus den Hyperbelbändern (gelb) wurde im unteren Bild eine Hyperbelbandschar gebildet. Diese Hyperbelbandschar diente als Ausgangspunkt für die Anpassung an die Fahrspurbegrenzungen im Bild.

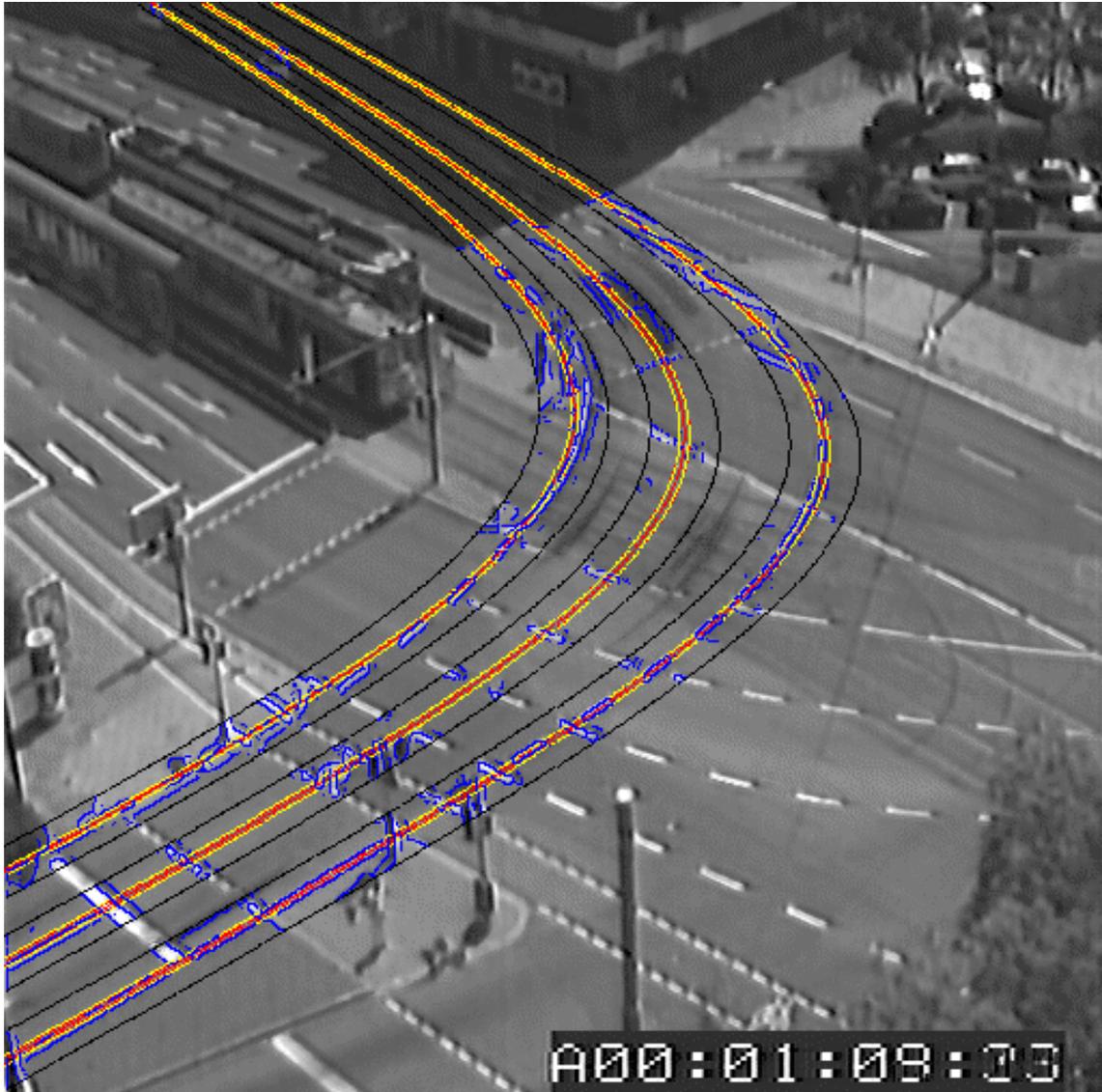


Abbildung 5.12: Die resultierende Anpassung der Hyperbelbandschar aus Abbildung 5.11 in diesem Bild zeigt im einlaufenden Ast der Abbiegespuren ein gutes Ergebnis. Im auslaufenden Ast konnte aufgrund der fehlenden Fahrzeugbewegung der weitere Verlauf der Straßenführung nicht korrekt geschätzt werden. Beim Anpassprozess mittels Kantenelementanpassung wurden insgesamt 14 Parameter gleichzeitig geschätzt.

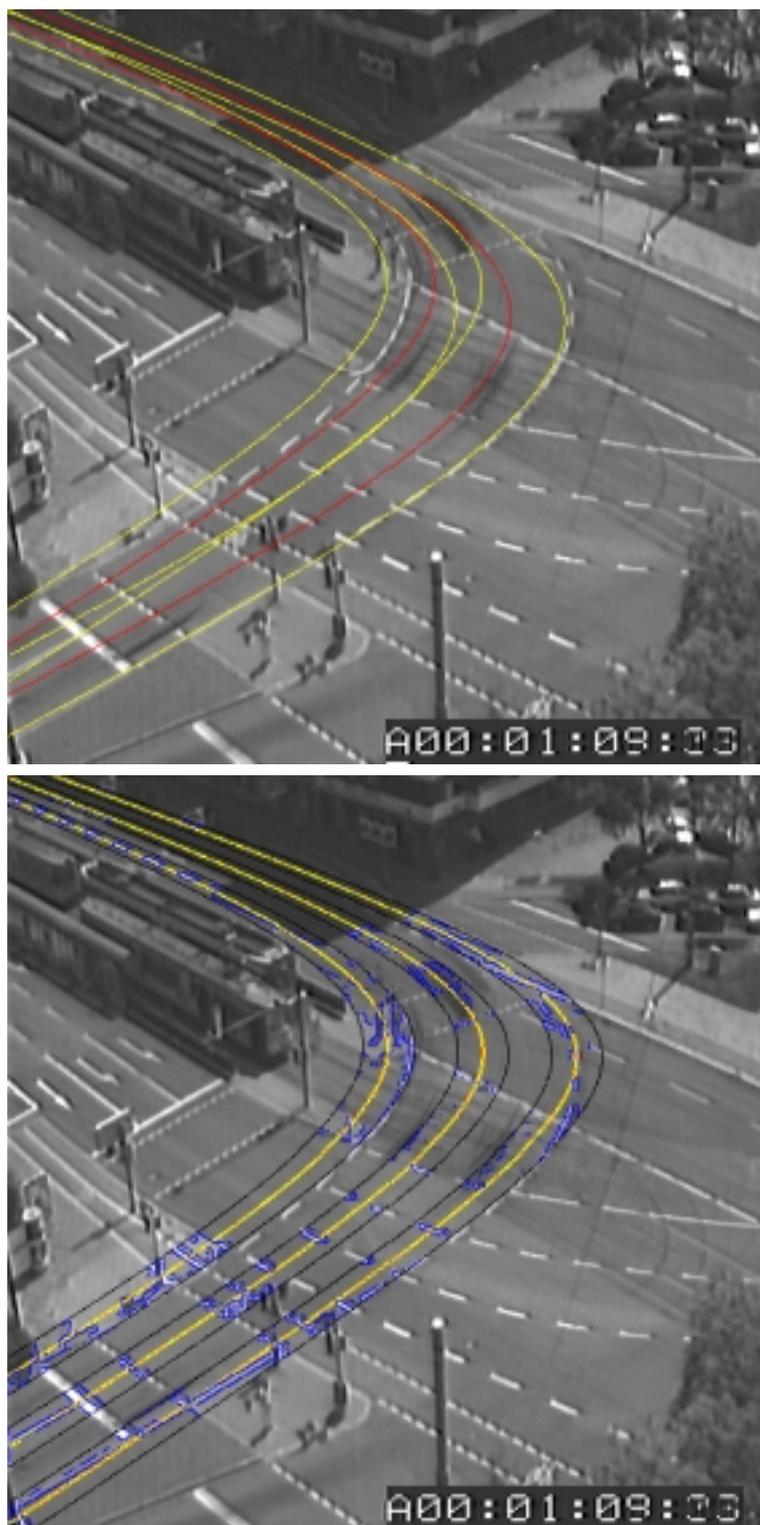


Abbildung 5.13: Die in Abbildung 5.11 erwähnten Trajektorien wurden interaktiv um Stützpunkte im auslaufenden Ast der Abbiegespuren ergänzt, sodass die resultierenden Hyperbelbänder den Verlauf der zugrundeliegenden Fahrspuren geeignet beschreiben. Im unteren Bild sieht man die daraus resultierende Hyperbelbandschar, die als Ausgangspunkt für die Anpassung an die Fahrspurbegrenzungen im Bild diente.

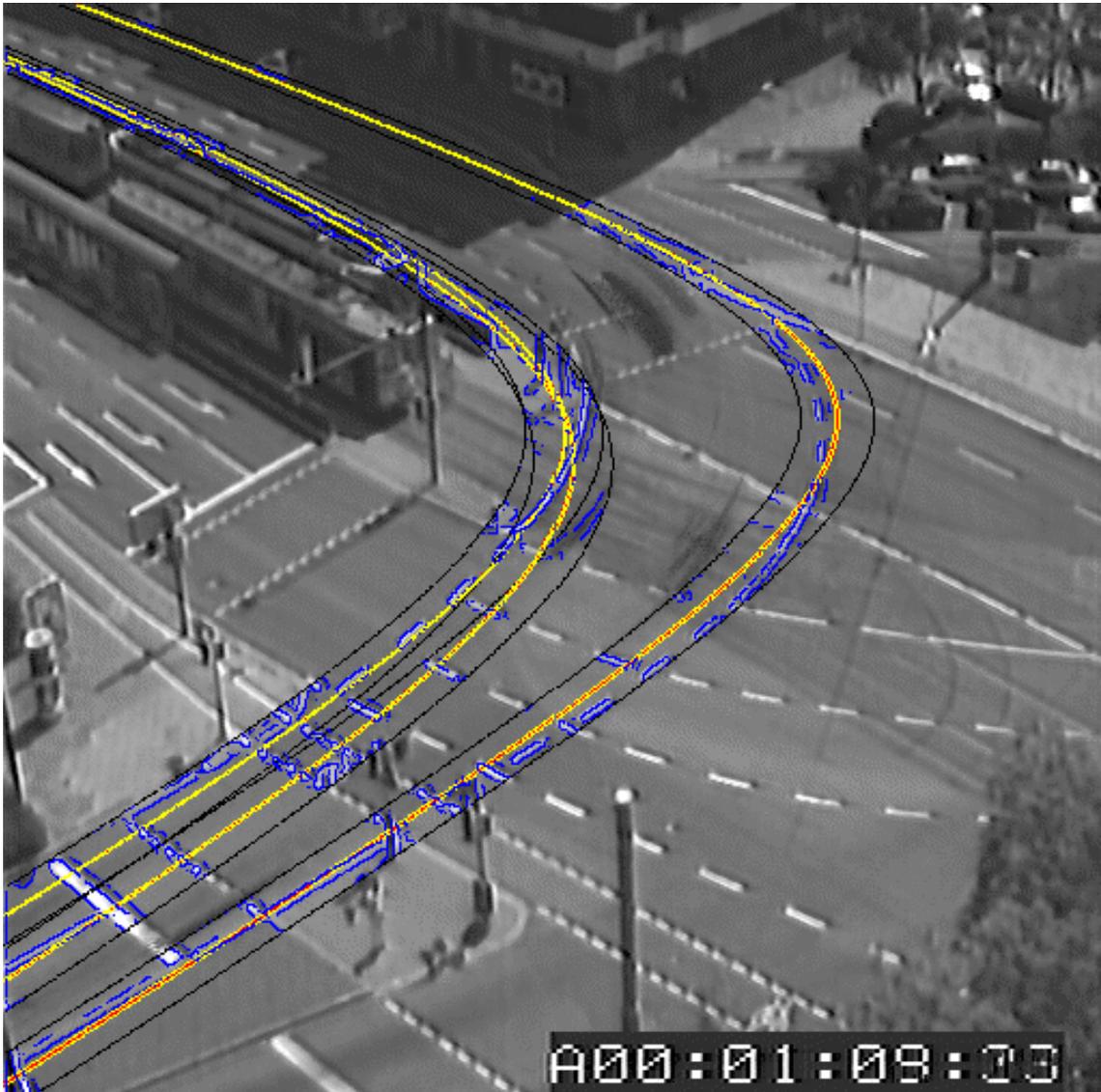


Abbildung 5.14: Die Anpassung der in Abbildung 5.13 gezeigten Hyperbelbandschar führt nur teilweise zum Erfolg, da das mittlere Hyperbelband zur Beschreibung der mittleren Fahrspurbegrenzung im auslaufenden Ast der Abbiegespuren an keine geeigneten Kantelemente angepasst werden konnte.

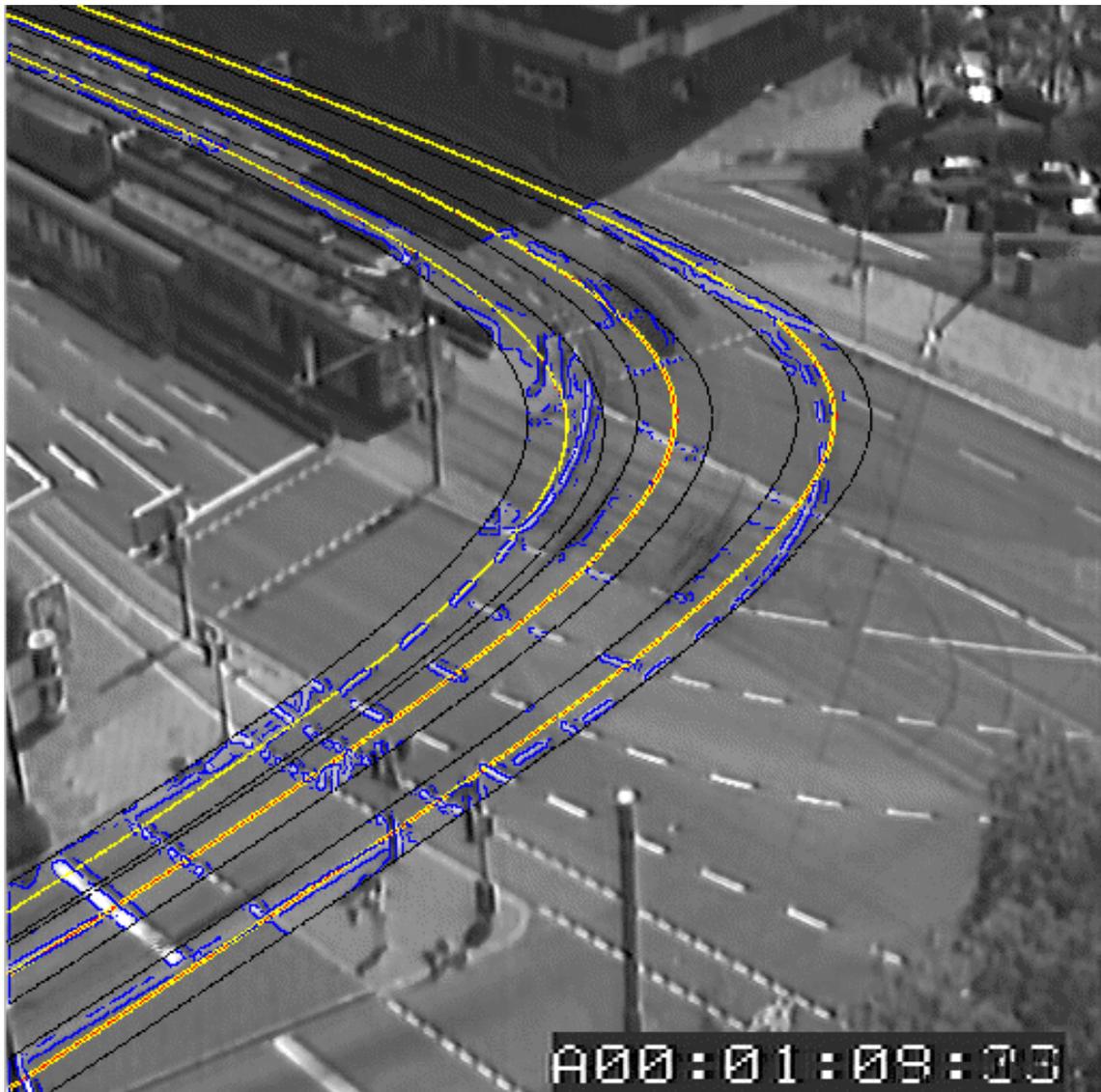


Abbildung 5.15: Durch Einführung der Bedingung, dass im auslaufenden Ast der Abbiegespuren die Fahrspurbreiten gleich sind, konnte verhindert werden, dass das mittlere Hyperbelband zur Beschreibung der mittleren Fahrspurbegrenzung außerhalb des zulässigen Bereiches angepasst wurde. Dennoch ist das Ergebnis der Anpassung nur bedingt zufriedenstellend, da die Fahrspurbegrenzungen nicht an allen Stellen korrekt beschrieben werden. Grundlage einer Verbesserung wäre die Bereitstellung von zuverlässigen Kanten-elementen vor allem im auslaufenden Ast der Abbiegespuren. Für die Beschreibung der Hyperbelbandschar waren 13 Parameter notwendig.

5.2.3 Anpassung nicht gekrümmter Fahrspuren

5.2.3.1 Bernhardus–Platz–Szene: erste Kameraeinstellung

In der Bernhardus–Platz–Szene ist eine nicht gekrümmte Geradeausspur zu sehen, an die das beschriebene Modell der nicht gekrümmten Fahrspur angepasst wurde (s. a. Abschnitt 4.1.2). Im Bild sind zwei parallel verlaufende Geradeausspuren zu sehen, für die eine in Fahrtrichtung rechts liegende Trajektorie aus der Verfolgung von Fahrzeugen (modellbasiert) nach [Haag 98] berechnet werden konnte. Diese Trajektorie wird durch eine Gerade genähert, die den Ausgangspunkt für die Bestimmung einer Rückgrathyperbel nach oben beschriebenen Muster bildet. Eine zweite Spur wurde interaktiv durch eine in der Szene senkrecht verlaufende Verschiebung der genäherten Geraden bestimmt. Aus diesen beiden parallel verlaufenden Geraden im Abstand von 4.50m wurden die in Abbildung 5.16 dargestellten Hyperbelbänder gebildet (oberes Bild), aus denen die Hyperbelbandschar im unteren Bild berechnet wurde. Die Fahrspurbreite wurde mit 3.50m und die Breite der Fahrspurbegrenzung mit 0.12m angesetzt.

In den bisher vorgestellten Versuchen wurden Trajektorien von Fahrzeugen zugrundegelegt, deren Abbilder im Bild vertikal verschoben wurden. Aufgrund dieser perspektivischen Anordnung hat die Objekthöhe der Fahrzeuge nur einen geringen Einfluss auf die Lage der Trajektorie und deren Bezug zur Fahrspurmitte, sodass die Objekthöhe von Fahrzeugen nicht berücksichtigt werden mussten. Bei Betrachtung der im Bildbereich nahezu geradlinig verlaufenden Geradeausspuren der in diesem Abschnitt untersuchten Bernhardus–Platz–Szene bewegen sich die Abbilder der verfolgten Fahrzeuge horizontal im Bildbereich. Im Gegensatz zu dem im nachfolgenden Abschnitt 5.2.3.2 beschriebenen Versuch war es nicht notwendig, die zur Verfügung gestellte Trajektorie durch Berücksichtigung einer mittleren Objekthöhe zu verändern. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die in diesem Abschnitt verwendeten Trajektorien modellbasiert bestimmt wurden und eine mittlere Objekthöhe bereits berücksichtigt wurde (s. a. [Haag 98]).

Das Ergebnis der Anpassung ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Die Tabelle 5.3 gibt im ersten Experiment in der oberen Zeile die Startwerte und in der darunter liegenden Zeile die geschätzten Werte des in diesem Abschnitt vorgestellten Versuches wieder.

5.2.3.2 Bernhardus–Platz–Szene: zweite Kameraeinstellung

Der in Abschnitt 5.2.3.1 beobachtete Kreuzungsausschnitt wurde in einer weiteren Bildfolge mit einer zweiten veränderten Kameraeinstellung beobachtet. Grundlage für die dabei bestimmten Hyperbelbänder bildeten Trajektorien zweier auf beiden Fahrspuren mit einem datengetriebenen Ansatz (s. a. [Middendorf 99]) verfolgter Fahrzeuge. Die bei dieser Verfolgung bestimmten Schwerpunkte von OIC-Masken (*Object Image Candidate*) wichen aufgrund der Perspektive so stark von der Fahrspurmittellinie im Bildbereich ab, dass die Objekthöhe der Fahrzeuge nicht vernachlässigt werden konnten. Für beide verfolgten Fahrzeuge wurde daher eine mittlere halbe Objekthöhe von 0.50m angenommen. In

Abbildung 5.18 sind im oberen Bild die aus den Fahrzeugtrajektorien bestimmten Hyperbelbänder und im unteren Bild die aus diesen beiden Hyperbelbändern bestimmte Hyperbelbandschar, in Abbildung 5.19 das Ergebnis der Kantenelementanpassung dargestellt. Insgesamt wurden 14 Parameter geschätzt. Die Werte der Ausgangsparameter und der geschätzten Parameter sind in der Tabelle 5.3 angegeben. Trotz des Vorhandenseins von Kantenelementen, die keiner Fahrspurberandung zugeordnet werden können, und trotz einer nur geringen Anzahl an Kantenelementen, die zur Beschreibung der mittleren Fahrspurbegrenzung dienen, wurde die Schätzung der 14 Parameter erfolgreich in drei Iterationsschritten durchgeführt. Entscheidend hierfür ist eine hinreichend gute Schätzung der Rückgrathyperbel, da schon eine geringe Veränderung des zugrundeliegenden Hyperbelbandes eine starke Änderung der vom Schätzprozess ausgewerteten Kantenelementmenge bedeuten kann.

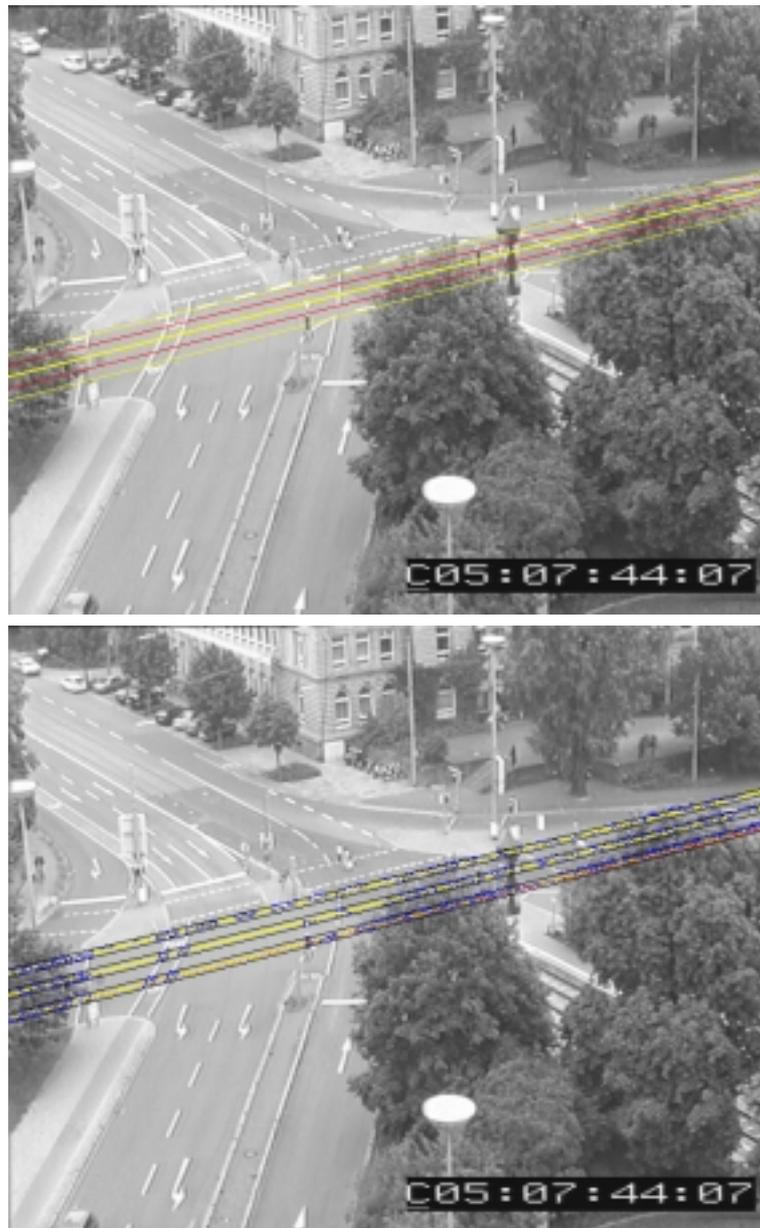


Abbildung 5.16: Auf der in Fahrtrichtung rechts liegenden Fahrspur wurde mittels modellgestützter Verfolgung (s. [Haag 98]) eine Trajektorie berechnet, welche die Grundlage für eine spezielle Rückgrathyperbel (rot) mit zugehörigem Hyperbelband (gelb) bildete, um eine geradlinig verlaufende Fahrspur zu beschreiben. Das dazu parallel verlaufende Hyperbelband wurde interaktiv bestimmt. Im unteren Bild sieht man die daraus resultierende Hyperbelbandschar, die als Ausgangspunkt für die Anpassung an die Fahrspurbegrenzungen im Bild dient.

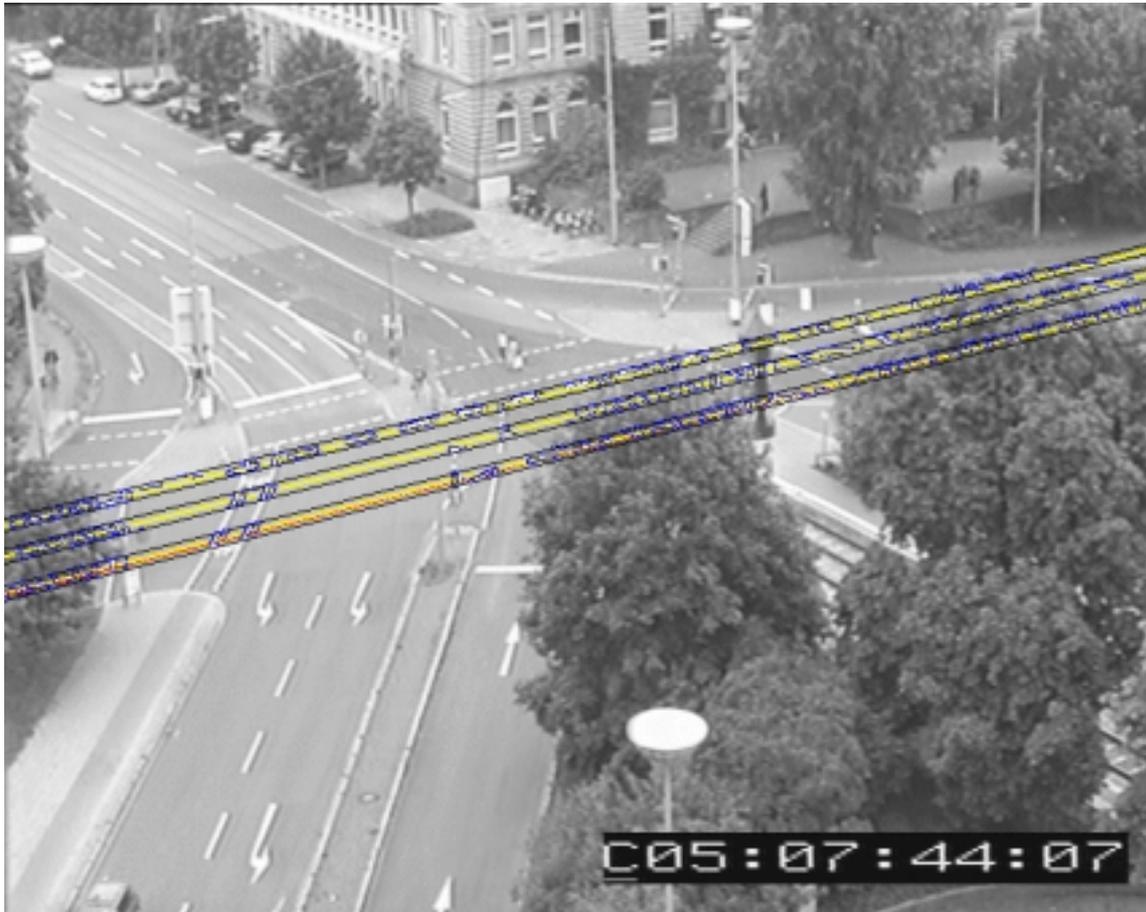


Abbildung 5.17: Die Anpassung der in Abbildung 5.16 dargestellten Hyperbelbandschar konnte trotz fehlender Kantenelemente zur Beschreibung der mittleren Fahrspurbegrenzung und trotz des Vorhandenseins von Kantenelementen, die keiner Fahrspurbegrenzung zugeordnet werden können, recht gut an die geradlinig verlaufenden Fahrspuren angepasst werden.

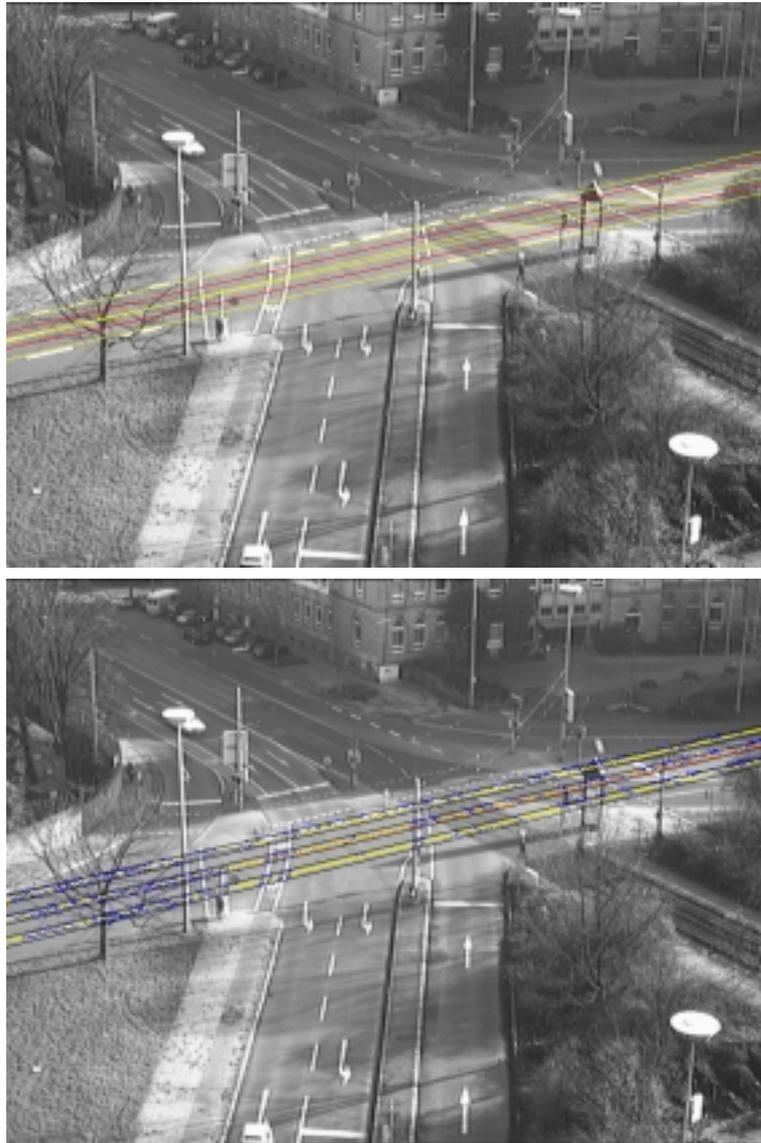


Abbildung 5.18: Auf beiden Fahrspuren wurden mittels datengetriebener Verfolgung (s. [Middendorf 99]) Fahrzeuge verfolgt, deren Trajektorien die Grundlage für die Rückgrathyperbeln (rot) der abgebildeten Hyperbelbänder (gelb) im oberen Bild bildeten. Aufgrund der Kameraabbildung verschob sich der bei der datengetriebenen Verfolgung bestimmte Schwerpunkt der OIC-Masken so weit vom Mittelpunkt der Fahrspur, dass die mittlere halbe Objekthöhe der Fahrzeuge nicht mehr vernachlässigt werden konnte. Für beide Trajektorien wurde eine mittlere Objekthöhe von 0.50m angenommen. Im unteren Bild sieht man die daraus resultierende Hyperbelbandschar, die als Ausgangspunkt für die Anpassung an die Fahrspurbegrenzungen im Bild dient.



Abbildung 5.19: Der mittleren Fahrspurberandung können nur wenige Kantenelemente im Bild zugeordnet werden. Zusätzlich wurden viele Kantenelemente bestimmt, die keiner Fahrspurberandung zugeordnet werden können. Die Anpassung der in Abbildung 5.18 dargestellten Hyperbelbandschar wurde trotzdem erfolgreich in vier Iterationsschritten an die geradlinig verlaufenden Fahrspuren durchgeführt. Im rechten oberen Bildausschnitt stimmt das Ergebnis der Anpassung nicht mit den abgebildeten Fahrspuren überein. An dieser Stelle sind die Geradeauspuren zunächst gekrümmt, bevor sie dann geradlinig über den Kreuzungsbereich geführt werden. Die zugrundeliegenden Trajektorien decken diesen Anfangsbereich nicht ab. Ursache hierfür sind Initialisierungsschritte im Algorithmus für die Verfolgung von Fahrzeugen(s. a. [Middendorf 99]).

Experiment/ Iterationen[]	Position [m]		Orientierung [°] θ	Form a	Öffnung [°] η	Fahrspurbreiten [m]		τ	Fahrspurbegrenzung [m]		
	m_x	m_y				einl. Ast	ausl. Ast				
1 [4]	58.88	-33.56	221.25	1.7089	88.50	3.50	3.50	1.00	1.00	0.120	0.120
	58.45	-33.34	221.28	1.6854	88.50	3.17	2.78	3.53	1.00	0.129	0.115
2 [3]	64.71	-42.00	223.44	1.5986	88.54	3.50	3.50	1.00	1.00	0.120	0.120
	64.30	-41.75	223.47	1.5763	88.54	3.43	2.49	3.38	1.05	0.133	0.120

Tabelle 5.3: Die angegebenen Werte repräsentieren je Experiment, das bei der Anpassung einer Hyperbelbandschar an Abbilder der Bernhardus-Platz-Szene durchgeführt wurde, in der ersten Zeile die Startwerte und in der zweiten Zeile die geschätzten Werte je Parameter. Alle Werte sind im Szenenbereich angegeben. Experiment 1 ist in Abschnitt 5.2.3.1 und Experiment 2 in Abschnitt 5.2.3.2 beschrieben. Für beide Experimente ist der Öffnungswinkel gleich geblieben. Die Orientierung hat sich ebenfalls nur geringfügig geändert. Da die einlaufenden Äste der jeweiligen Hyperbelbänder außerhalb des Bildausschnittes liegen, haben die angegebenen Fahrspurbreiten für die einlaufenden Äste keine Deutung im Bildausschnitt. Da beide Experimente mit (unterschiedlichen) Abbildern derselben Szene arbeiten und die Angaben im Szenenbereich erfolgten, müssten die geschätzten Werte im Idealfall gleich sein. Die Schätzungen für die beiden Fahrspurbreiten weichen im ersten Fall um 0.15m und im zweiten Fall um 0.02m voneinander ab. Die geschätzten Breiten für die Fahrspurberandung weichen dagegen nur im Millimeterbereich voneinander ab. Die Gesamtbreite der Fahrspur erhält man durch Summation der beiden Fahrspurbreiten und jeweils die Hälfte der Breiten beider äußerer Fahrspurberandungen. Für das erste Experiment erhält man so eine Breite von 7.50m, während sich für das zweite Experiment eine Breite von 7.33m ergibt.

5.3 Anpassung mehrerer Hyperbelbandscharen - Kreuzung

Die im Abschnitt 5.2.1 beschriebenen gekrümmten Fahrspuren und die in den Abschnitten 5.2.3.1 und 5.2.3.2 diskutierten geradlinig verlaufenden Fahrspuren der Bernhardus-Platz-Szene wurden nach dem im Abschnitt 4.3 beschriebenen Verfahren mit zwei Hyperbelbandscharen beschrieben, deren insgesamt 36 Parameter in einem gemeinsamen Parametervektor zusammengefasst wurden. Die Anpassung wurde an Bildern der beiden Bildfolgen durchgeführt, die die Kreuzung des Bernhardus-Platzes aus zwei unterschiedlichen Kamerapositionen zeigen. Die Kantenelementanpassung erfolgte bei der ersten Anpassung in 11 und bei der zweiten Anpassung in 9 Iterationsschritten. Die Startwerte für die Parameter und die Ergebnisse der Schätzungen der ersten Anpassung finden sich in Tabelle 5.4 und die Ergebnisse der zweiten Anpassung in Tabelle 5.5. Die Bestimmung der beiden Hyperbelbandscharen aus den gegebenen Rückgrathyperbeln erfolgte ebenso wie die Anpassung der Hyperbelbandscharen an die Abbilder der Fahrspurberandungen in einem Schritt (s. a. Abbildungen 5.20-5.21 und Abbildungen 5.23-5.24). In Abbildung 5.22 wurde das Ergebnis der ersten Anpassung in einen Markierungsplan des Bernhardus-Platzes projiziert. Die Abweichungen der Fahrspurberandungen im unteren Bildausschnitt ist auf die Transformationsmatrix zur Projektion in den Markierungsplan zurückzuführen, da diese Abweichungen bei der Anpassung im Bildbereich nicht auftreten (s. Abbildung 5.21).

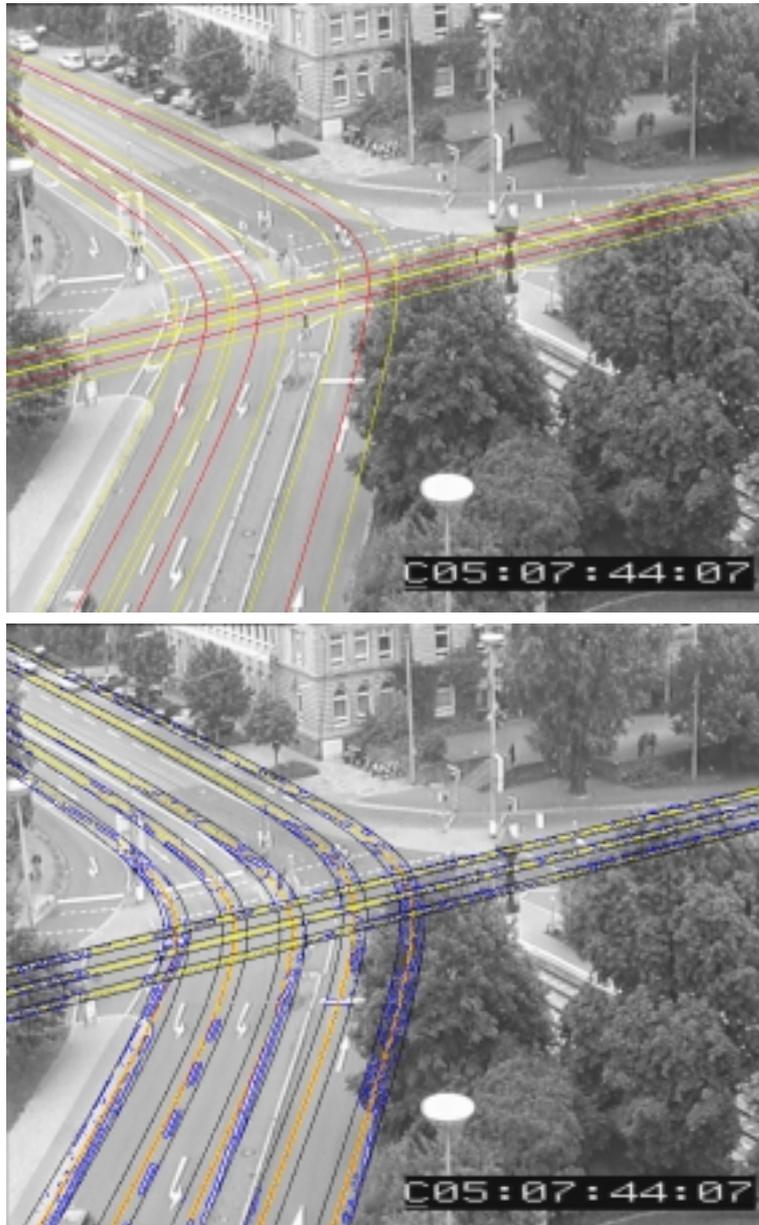


Abbildung 5.20: Die in den Abbildungen 5.8 und 5.17 vorgestellte Anpassung von gekrümmt und geradlinig verlaufenden Fahrspuren wurde hier mittels Kombination beider Hyperbelbandscharen in einem Schritt durchgeführt. Im oberen Bild sind die Rückgrat-hyperbeln rot und die dazugehörigen Hyperbelbänder gelb dargestellt. Das untere Bild zeigt die beiden aus dem oberen Bild resultierenden Hyperbelbandscharen, die als Ausgangspunkt für die Anpassung an die Fahrspurbegrenzungen im Bild dient.

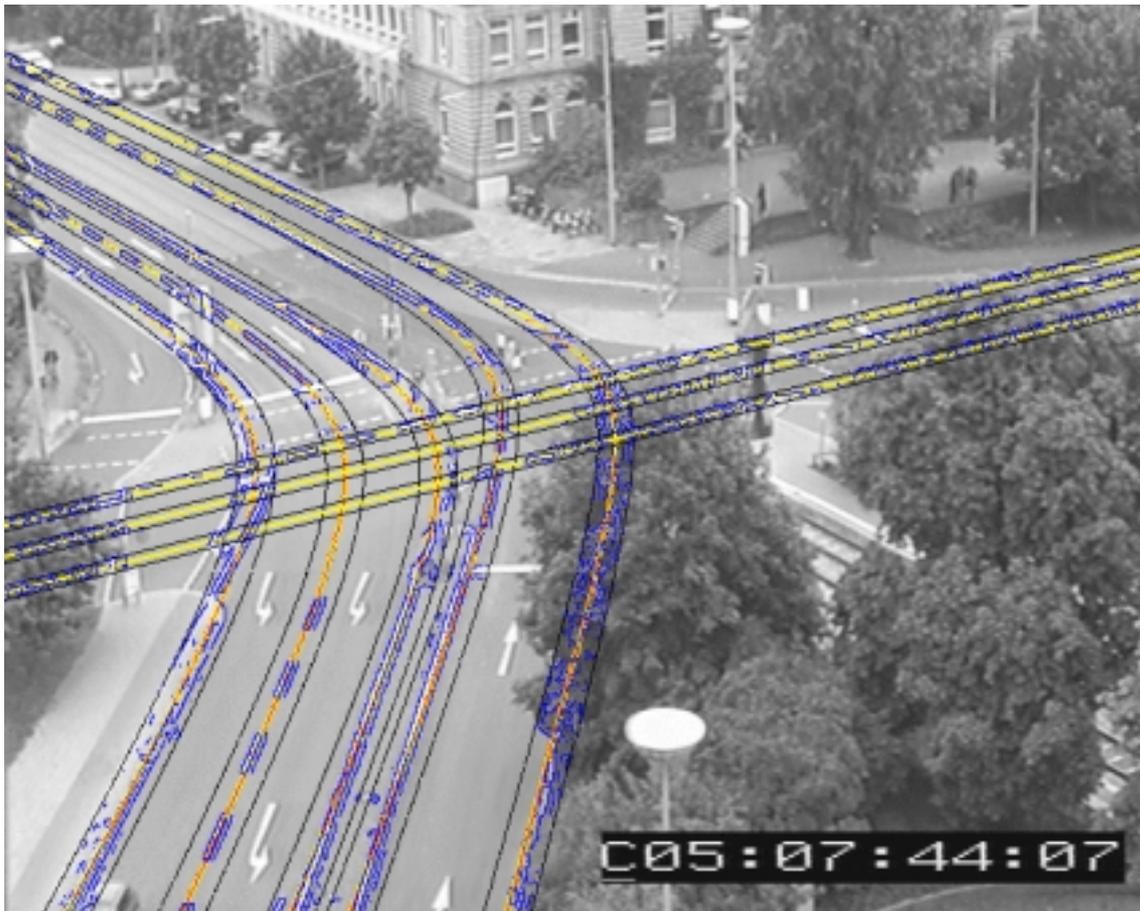


Abbildung 5.21: Die Anpassung der beiden in Abbildung 5.20 dargestellten Hyperbelbandscharen wurde in einem Schritt durchgeführt. Dazu mussten insgesamt 36 Parameter gleichzeitig geschätzt werden.



Abbildung 5.22: Diese Abbildung zeigt die Rückprojektion in den Markierungsplan der in Abbildung 5.21 dargestellten Anpassung zweier Hyperbelbandscharen. Im unteren Bildausschnitt des Markierungsplanes weichen die Schätzungen der Fahrspurberandungen vom eingezeichneten Verlauf ab. Aus der Abbildung 5.21 geht jedoch hervor, dass auch hier die Anpassung erfolgreich durchgeführt werden konnte, sodass diese Abweichung auf die Transformationsmatrix der Rückprojektion in den Markierungsplan zurückzuführen ist. Der eingerahmte Bereich entspricht dem Ausschnitt, der im Bildbereich einsehbar ist. Im rechten Bildausschnitt weichen die eingezeichneten geradlinig verlaufenden Geradeausspuren deutlich vom Verlauf der in den Markierungsplan eingezeichneten Geradeausspuren ab. In diesem Abschnitt konnte kein Fahrzeug zuverlässig verfolgt werden, sodass die verwendeten Trajektorien keinen Hinweis auf eine Krümmung in diesem Bereich gaben.

Position [m]	m_y	Orient. [°]	Form α	Öffnung [°]	Fahrspurweiten [m]																	
					einl. Ast		Fahrspurweiten		ausl. Ast		τ		Fahrspurbegrenzung									
29.66	-6.77	289.9438	5.0024	71.2732	3.50	3.50	6.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	1.00	1.00	1.00	1.00	0.120	0.120	0.120	0.120	
28.86	-7.28	291.1581	4.9754	71.2714	2.81	2.69	6.71	4.91	3.60	3.28	1.92	3.05	3.05	1.09	1.37	0.78	1.07	0.119	0.122	0.136	0.122	0.130
58.88	-33.56	221.25	1.7089	88.50	3.50	3.50			3.50	3.50				1.00	1.00			0.120	0.120	0.120		
58.43	-33.37	221.26	1.6847	88.50	3.21	2.74			3.46	3.90				1.00	1.09			0.129	0.117	0.115		

Tabelle 5.4: Die erste Zeile entspricht den Startwerten, die zweite Zeile den durch eine Kantenelementanpassung geschätzten Werten für die 36 Parameter, die zur Beschreibung der Kreuzungsarme der Kreuzung aus der Bernhardtus-Platz-Szene mittels Kombination zweier Hyperbelbandschare notwendig sind. Alle Werte sind im Szenenbereich angegeben. Zur Bestimmung aller Parameter waren 11 Iterationsschritte notwendig.

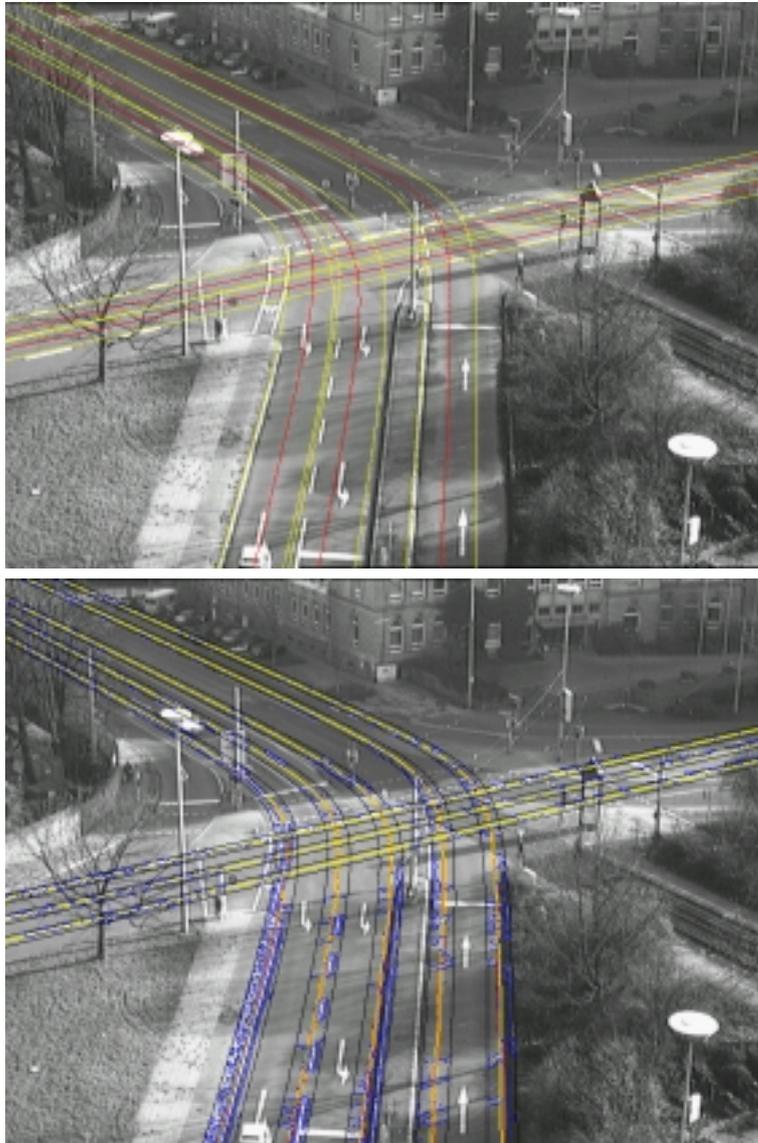


Abbildung 5.23: Die in den Abbildungen 5.10 und 5.18 vorgestellte Anpassung von gekrümmt und geradlinig verlaufenden Fahrspuren wurde hier mittels Kombination beider Hyperbelbandscharen in einem Schritt durchgeführt. Im oberen Bild sind die Rückgrathyperbeln rot und die dazugehörigen Hyperbelbänder gelb dargestellt. Das untere Bild zeigt die beiden aus dem oberen Bild resultierenden Hyperbelbandscharen, die als Ausgangspunkt für die Anpassung an die Fahrspurbegrenzungen im Bild dient.

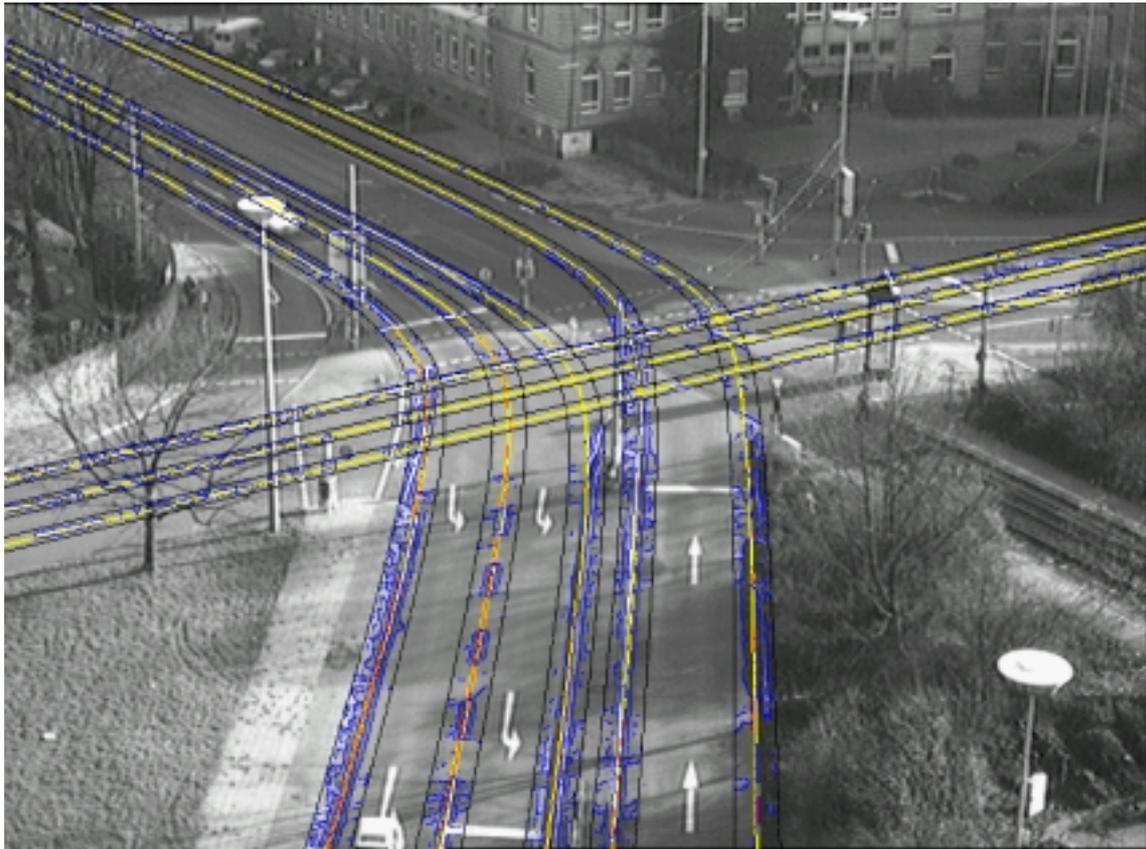


Abbildung 5.24: Die Anpassung der beiden in Abbildung 5.23 dargestellten Hyperbelband-scharen wurde in einem Schritt durchgeführt. Insgesamt mussten 36 Parameter gleichzeitig geschätzt werden.

Position [m]	Orient. [°]	Form	Öffnung [°]	Fahrspurbreiten [m]				τ	Fahrspurbegrenzung [m]																
				einl. Ast	ausl. Ast	einl. Ast	ausl. Ast																		
m_x	m_y	a	η																						
23.19	-9.09	290.8015	3.7014	3.50	3.50	6.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.120	0.120	0.120	0.120	
24.27	-8.82	290.7893	3.6908	3.42	2.41	8.24	4.76	3.63	3.59	2.13	3.34	1.02	0.98	0.80	1.07	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.120	0.118	0.071	0.078	0.077
64.71	-42.00	1.5986	88.54	3.50	3.50			3.50	3.50			1.00	1.00								0.120	0.120			
64.21	-41.75	1.5715	88.54	3.54	2.34			3.29	3.92			1.05	1.06								0.138	0.121	0.125		

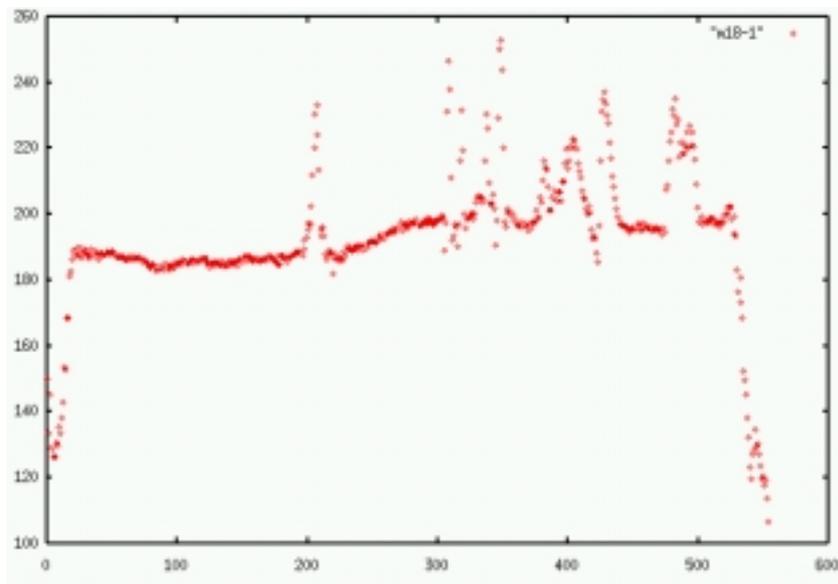
Tabelle 5.5: Die erste Zeile entspricht den Startwerten, die zweite Zeile den durch eine Kantenelementanpassung geschätzten Werten für die 36 Parameter, die zur Beschreibung der Kreuzungsarme der Kreuzung aus der Bernhardus-Platz-Szene mittels Kombination zweier Hyperbelbandscharen notwendig sind. Alle Werte sind im Szenenbereich angegeben. Zur Bestimmung aller Parameter waren 9 Iterationsschritte notwendig.

5.4 Detektion und Klassifikation von Pfeilmarkierungen

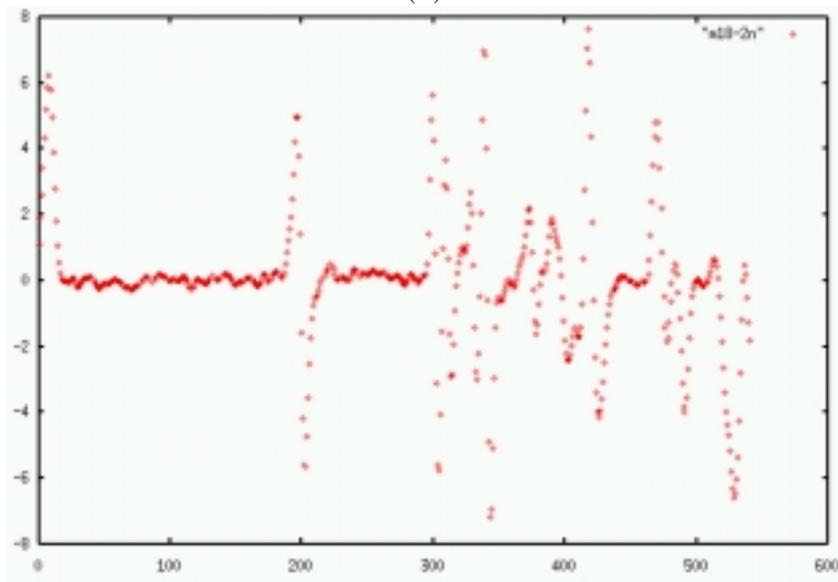
Ausgangspunkt für die Detektion und Klassifikation von Pfeilmarkierungen sind Hyperbelbänder bzw. Hyperbelbandscharen, die bereits an Bilder einer Kreuzung erfolgreich angepasst werden konnten. Für die nachfolgenden Ergebnisse wird daher auf Ergebnisse der letzten Abschnitte zurückgegriffen. Wie im Abschnitt 4.4 beschrieben, wird in einer Umgebung um die Rückgrathyperbel eines an Fahrspurabbilder angepassten Hyperbelbandes nach Pfeilmarkierungen gesucht. Diese Suchumgebung wird im Szenenbereich als Hyperbelband festgelegt. Die Breite ub (s. a. Abschnitt 4.4) wurde für alle Experimente in diesem Abschnitt einheitlich auf $ub = 1.20m$ gesetzt. Nach der Bestimmung des Grauwertverlaufs in der Umgebung der Rückgrathyperbel wird die Steigung des Grauwertverlaufs ermittelt. In den Abbildungen 5.26 und 5.28 ist das Ergebnis der Detektion für die in Abschnitt 5.1.2 vorgestellte Anpassung von Hyperbelbändern und die in Abschnitt 5.2.1 vorgestellte Anpassung von Hyperbelbandscharen dargestellt. Der bei den Experimenten von Abbildung 5.26 und 5.28 festgestellte Grauwertverlauf und dessen Ableitung ist in Abbildung 5.25-(a) und 5.25-(b), sowie Abbildung 5.27-(a) und 5.27-(b) eingezeichnet.

Innerhalb der in Abbildung 5.26 und 5.28 bis 5.30 grün eingezeichneten Hyperbelbändern wurde nach Pfeilmarkierungen gesucht. Die signifikanten Änderungen des Grauwertverlaufs entlang der Rückgrathyperbeln wurden rot eingezeichnet. Diese Änderungen wurden mit weißen Rechtecken der Breite ub umhüllt. Um diese weißen Rechtecke wurden zu den Bildkoordinatenachsen parallele schwarze Rechtecke gelegt, die als Ausgangspunkt für die Untersuchung nach Pfeilmarkierungen dienen.

Alle anderen in dieser Arbeit vorgestellten Bildausschnitte von Bildfolgen enthalten keine Abbilder von Pfeilmarkierungen oder nur solche Pfeilmarkierungen, die auf Fahrspuren liegen, zu denen keine Trajektorien für eine Initialisierung der Hyperbelbandanpassung zur Verfügung standen.



(a)



(b)

Abbildung 5.25: Diagramm (a) zeigt den Grauwertverlauf um die Rückgrathyperbel des Experimentes in Abbildung 5.26. In Diagramm (b) ist die Ableitung des Grauwertverlaufs dargestellt. Die Abschnitte, bei denen die Änderungen des Grauwertverlaufs deutlich von Null verschieden sind, werden für eine weitere Analyse herangezogen.

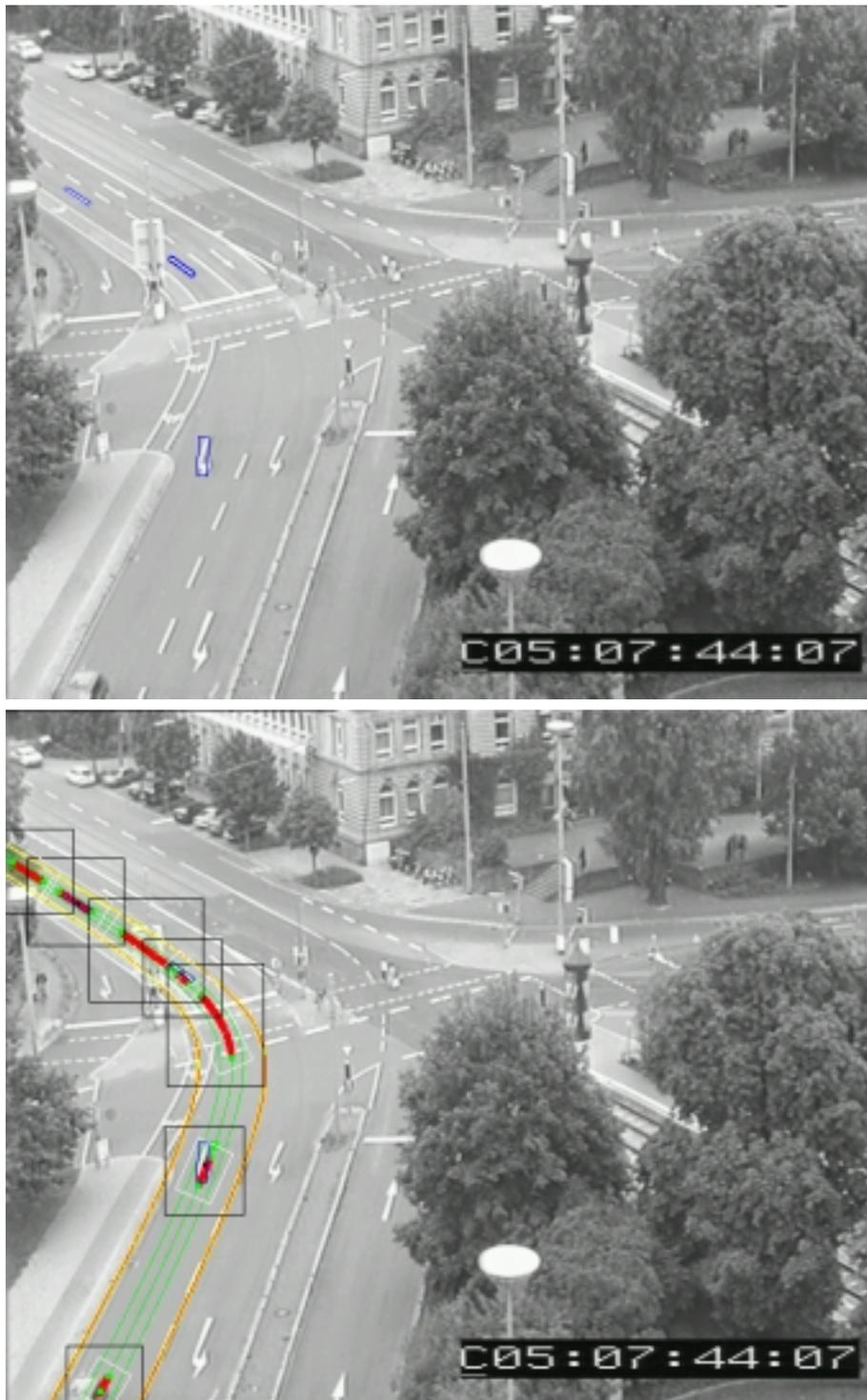
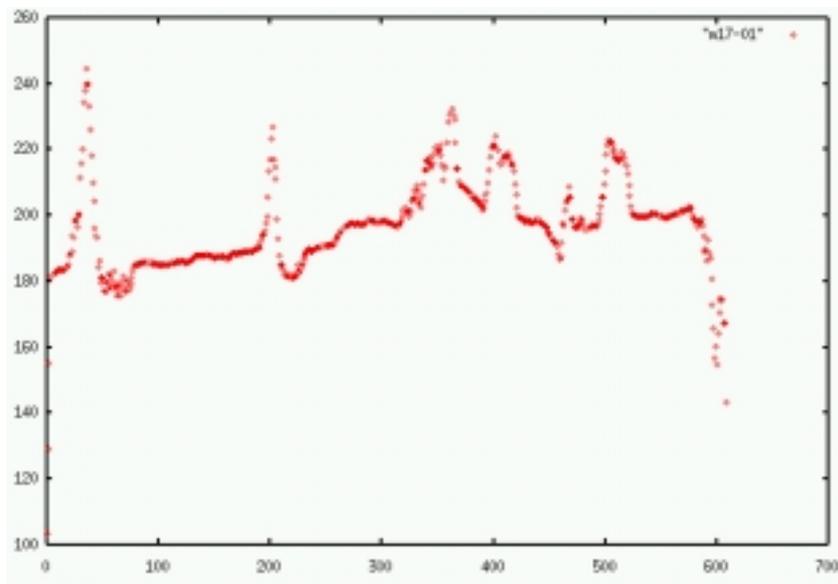
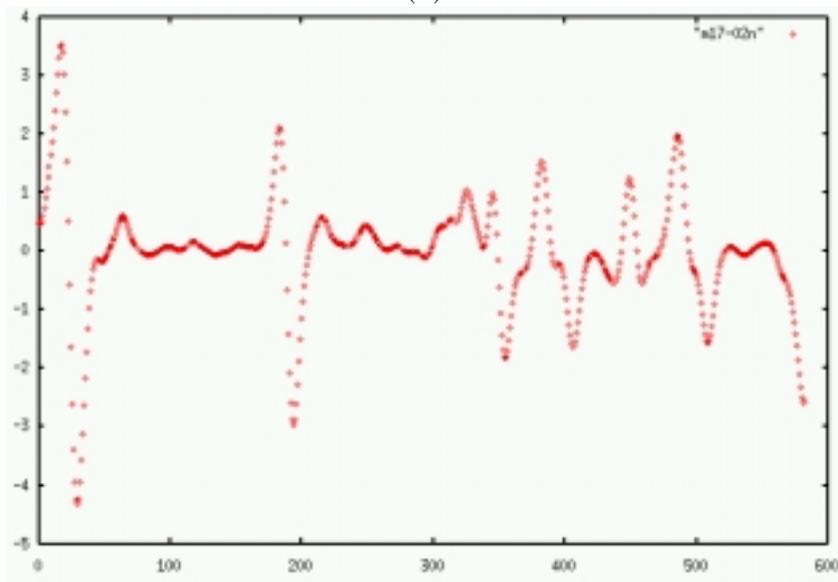


Abbildung 5.26: Die Anpassung aus Abbildung 5.5 ist Grundlage für die Detektion von Pfeilmarkierungen. In einer Umgebung der Rückgrathyperbel (grünes Hyperbelband) werden anhand der in Abbildung 5.25 dargestellten Diagramme die mit einem schwarzen Rahmen gekennzeichneten Bereiche nach Pfeilmarkierungen untersucht. Im oberen Bereich der Fahrspur konnten zwei Geradeaus- und im unteren Bereich der Fahrspur ein Linkspfeil bestimmt werden, die mit einem blauen Rahmen umrandet sind. Die rot eingefärbten Abschnitte der Rückgrathyperbel entsprechen den Bereichen, bei denen die Änderung des Grauwertverlaufs als deutlich von Null verschieden angesehen wurde.



(a)



(b)

Abbildung 5.27: Diagramm (a) zeigt den Grauwertverlauf um die Rückgrathyperbel des Experimentes in Abbildung 5.28. In Diagramm (b) ist die Ableitung des Grauwertverlaufs dargestellt. Die Abschnitte, bei denen die Änderungen des Grauwertverlaufs deutlich von Null verschieden sind, werden für eine weitere Analyse herangezogen.

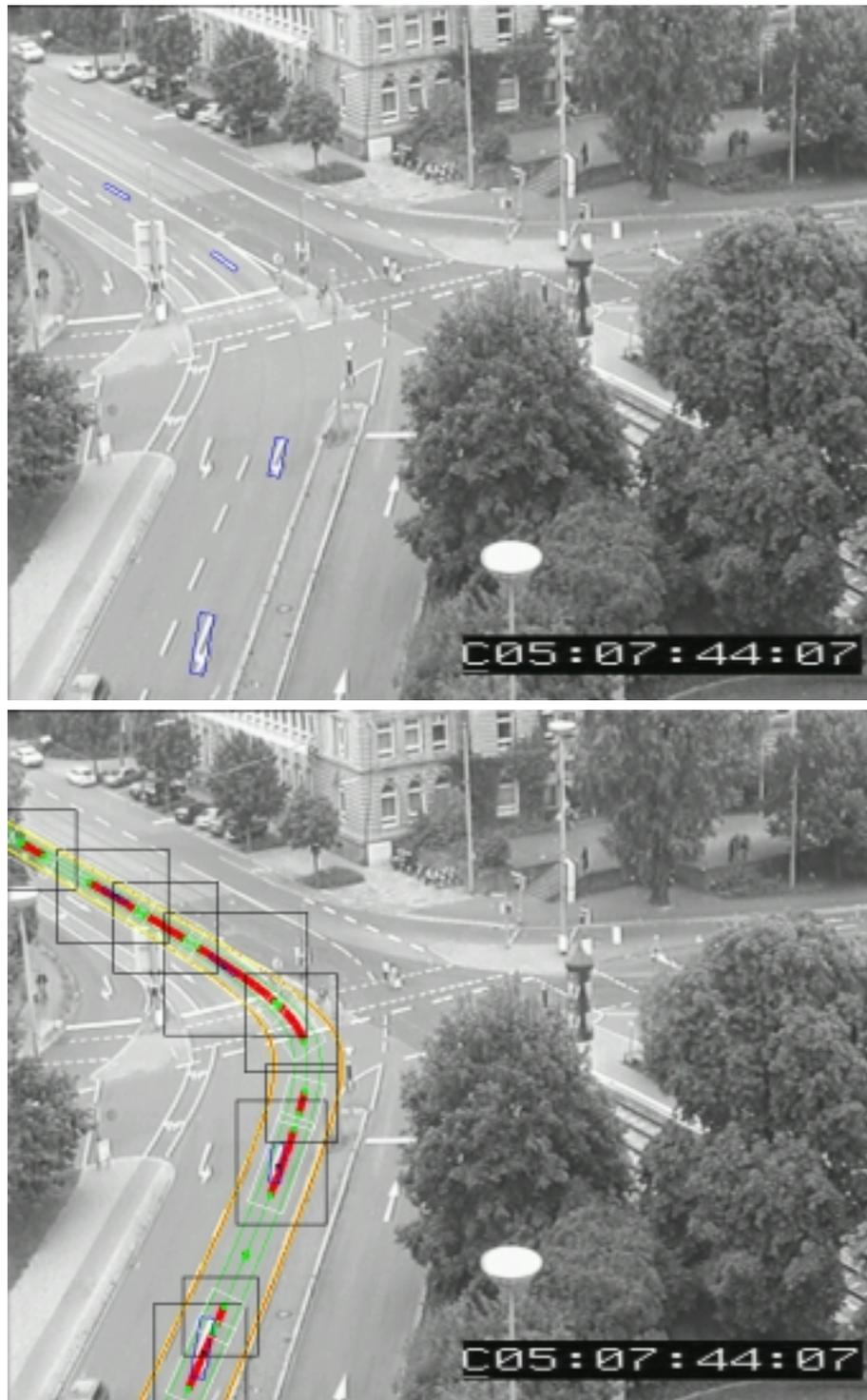


Abbildung 5.28: Die Anpassung aus Abbildung 5.5 ist Grundlage für die Detektion von Pfeilmarkierungen. In einer Umgebung der Rückgrathyperbel (grünes Hyperbelband) werden anhand der in Abbildung 5.25 dargestellten Diagramme die mit einem schwarzen Rahmen gekennzeichneten Bereiche nach Pfeilmarkierungen untersucht. Auch bei dieser Fahrspur konnten alle Pfeilmarkierungen (zwei Links- und zwei Geradeauspfeile innerhalb der blau eingezeichneten Rahmen) detektiert werden. Die rot eingefärbten Abschnitte der Rückgrathyperbel entsprechen den Bereichen, bei denen die Änderung des Grauwertverlaufs als deutlich von Null verschieden angesehen wurde.

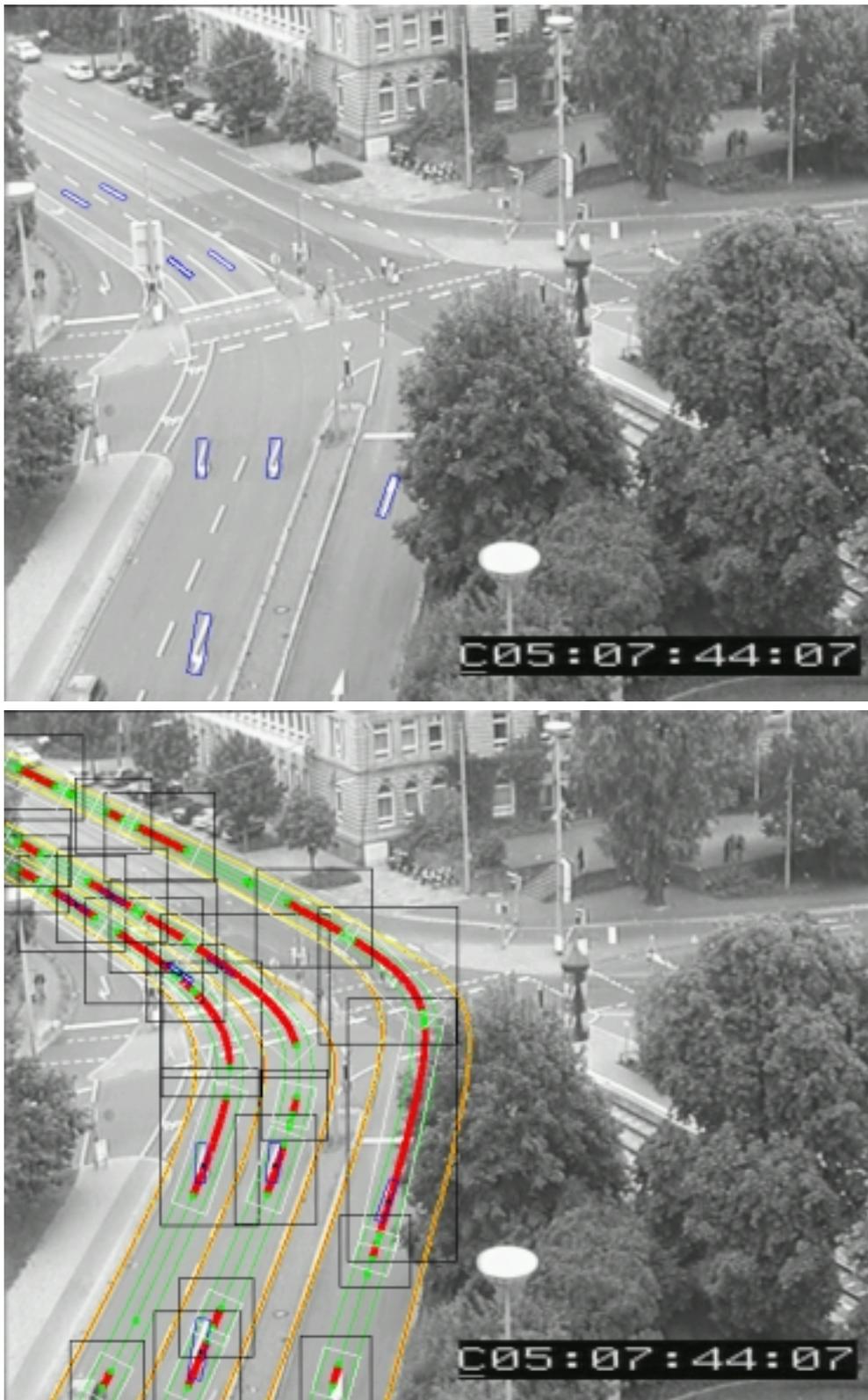


Abbildung 5.29: Nach der erfolgreichen Anpassung, s. a. Abbildung 5.8, wird jede Fahrspur nach Pfeilmarkierungen untersucht. Alle vollständig sichtbaren Pfeilmarkierungen (fünf Geradeaus- und drei Linkspfeile; s. a. obere Abbildung) konnten detektiert werden (blauer Rahmen).

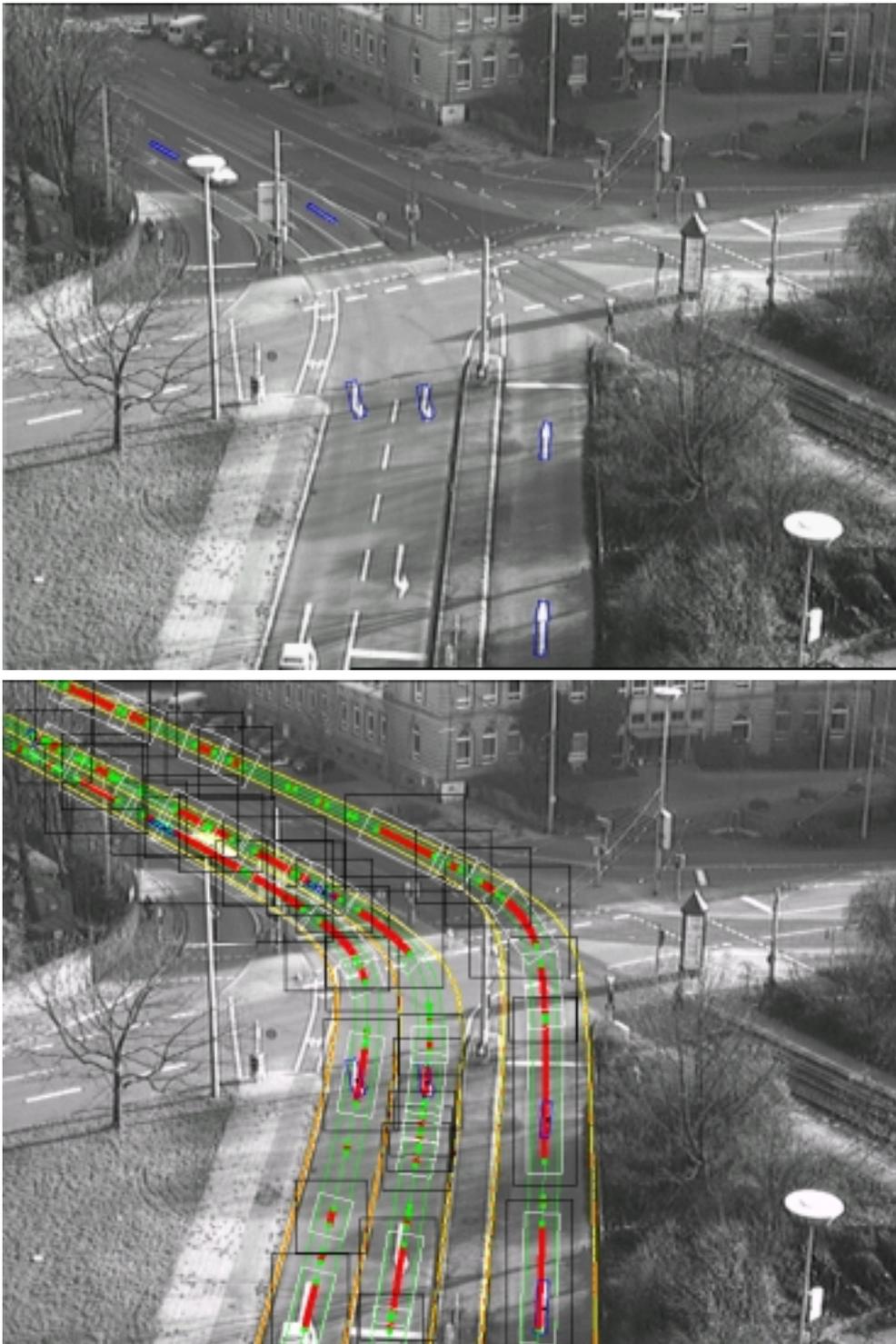


Abbildung 5.30: Im Gegensatz zur Abbildung 5.29 sind die Abbilder der Pfeilmarkierungen durch schwachen Kontrast im oberen Teil des Bildes und durch Schattenwurf stark beeinflusst. Von den nicht durch Fahrzeuge verdeckten Pfeilmarkierungen (fünf Geradeaus- und drei Linkspfeile; s. a. obere Abbildung) konnten vier Geradeauspfeile und zwei Linkspfeile detektiert werden (blauer Rahmen).

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Ansatz vorgestellt, mit dessen Hilfe aufgrund von Grauwertbildfolgen einer Szene von innerstädtischen Straßenkreuzungen eine rechnergestützte Erkennung und Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen aufgebaut werden kann. Die dabei zugrundegelegten Grauwertbildfolgen wurden mit einer stationär positionierten Kameraanordnung aufgenommen. Die zur Beschreibung des Zusammenhangs von Bild- und Szenenkoordinatensystem notwendige Transformation ist durch eine einmal durchgeführte Kamerakalibrierung bekannt.

Ausgehend von den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen wurde eine Taxonomie von Begriffen erstellt, die die grundlegende Struktur innerstädtischer Straßenkreuzungen repräsentiert. Aufgrund dieser Taxonomie konnte mit Relationen, die einfache Beziehungen zwischen den Begriffen formulieren, eine Terminologie erstellt werden. Mit Terminologien lassen sich in einer für den Menschen verständlichen und auf Logik basierenden Form die begrifflichen Zusammenhänge eines Diskursbereiches beschreiben.

Zur begrifflichen Beschreibung des Diskursbereichs „Innerstädtische Straßenkreuzungen“ wurden die Begriffe so ausgewählt, dass die Struktur innerstädtischer Straßenkreuzungen grundlegend beschrieben werden kann. Da Kreuzungen aufgebaut werden, um den Straßenverkehr sicher zu leiten und Fahrzeugkolonnen daher auf einheitlich gekennzeichnete Fahrspuren geführt werden, ist es sinnvoll, die Beziehung von Fahrspuren einer Kreuzung bei der Beschreibung von Kreuzungen in den Vordergrund zu stellen. Verkehrsströme werden über Kreuzungsarme, die aus einer Fahrspur oder aus mehreren parallel verlaufenden Fahrspuren bestehen können, zur Kreuzung hin- und wieder weggeführt. Mehrere Kreuzungsarme können wiederum zur Beschreibung einer gesamten Kreuzung herangezogen werden. Für die Begriffe Fahrspur, Kreuzungsarm und Kreuzung werden Erkennungsroutinen bereitgestellt.

Die Erkennungsroutine für den Begriff Fahrspur basiert auf der Beobachtung, dass der Verlauf von gekrümmten Fahrspuren mittels Klothoiden konstruiert wird, diese je-

doch aufgrund kurzer Fahrspuren bei innerstädtischen Straßenkreuzungen mit für diese Arbeit hinreichender Genauigkeit durch Hyperbeln beschrieben werden können. Die Fahrspurberandungen werden durch Hyperbelbänder modelliert, deren Konstruktion auf eine Rückgrathyperbel in der Fahrspurmitte zurückgeführt wird. Die Anpassung des Fahrspurmodells muss im Bildbereich erfolgen, da für den Schätzprozess das Messrauschen einer Normalverteilung zugrundegelegt wird. Aufgrund der Projektion vom Szenen- in den Bildbereich erhält man einen nichtlinearen Schätzprozess. Die Anpassung mittels Kalman-Filter erfordert daher eine passende Initialisierung. Der Suchraum nach einer geeigneten Initialisierung für Fahrspuren im Bildausschnitt der zugrundegelegten Grauwertbildfolgen wird durch die Verwendung von Trajektorien eingeschränkt. Diese Trajektorien entstammen einer datengetriebenen Verfolgung von Fahrzeugen im Bildbereich. Die Schwerpunkte der bei dieser Verfolgung bestimmten OIC-Masken im Bildbereich dienen als Stützpunkte für eine Hyperbelanpassung mittels linearer Regression (auch: Methode der kleinsten Quadrate). Eine Rückprojektion dieser Hyperbel in den Szenenbereich führt zur initialen Schätzung einer Rückgrathyperbel als Ausgangspunkt für ein Hyperbelband in der Szene. Ein solches Hyperbelband besteht aus zwei Hyperbeln, deren Asymptoten parallel ausgerichtet sind, und deren Scheitelpunkte einen geeigneten Abstand aufweisen müssen. Hyperbelbänder, deren Asymptotenpaare unterschiedliche Abstände aufweisen können, zeigten sich als geeignet zur Beschreibung des geometrischen Verlaufes von Fahrspurberandungen. Fahrspurberandungen wurden dabei nicht als unendlich dünn angesehen, sondern ihrerseits wieder durch Hyperbelbänder beschrieben. Die Anpassung dieses Fahrspurmodells erfolgte mittels Kantenelementanpassung, für die ein modifiziertes Abstandsmaß von Kantenelementen zu Hyperbeln verwendet wird. Die Zuordnung von Kantenelementen zu den Hyperbeln des Fahrspurberandungsmodells wird auf ein Toleranzband eingeschränkt.

Die Beschreibung von Fahrspuren mittels Hyperbelbändern wird sowohl für gekrümmte als auch für geradlinig verlaufende Fahrspuren eingesetzt. Im Falle von geradlinigen Fahrspuren wird der Öffnungswinkel nahe 90° gesetzt. Diese Näherung hat sich für die Ziele dieser Arbeit als sinnvoll erwiesen: Die Verwendung einer einheitlichen Datenstruktur ermöglichte eine einfachere Implementierung. Insbesondere bei der Kombination von Hyperbelbandscharen konnte so auf eine Fallunterscheidung bei der Behandlung von parallelen Fahrspuren verzichtet werden.

Mit dem vorgestellten Fahrspurberandungsmodell konnten daher nicht nur Fahrspuren erfolgreich angepasst werden, sondern es wurde gleichzeitig möglich, Bordsteinkanten und Fahrstreifenbegrenzungslinien zu detektieren. Das Modell des Hyperbelbandes ermöglichte es überdies, auch Fahrspuren anzupassen, deren Fahrspurberandungen zum Teil große Lücken, gerade im Kreuzungsbereich aufwiesen.

Diese Anpassung von Fahrspuren konnte robuster gestaltet werden, indem nicht nur einzelne Fahrspuren, sondern mehrere parallel verlaufende Fahrspuren zusammengefasst und in einer einheitlichen geometrischen Beschreibung - den Hyperbelbandscharen - ans Bild angepasst wurden. Durch diese Kombination wurde es möglich, auch Fahrspuren zu detektieren, deren Begrenzungen für die Detektion im Einzelfalle nicht ausreichend waren.

Basierend auf der Beschreibung einer Hyperbelbandschar ist es daher möglich, nicht nur eine einzelne Fahrspur, sondern ganze Kreuzungsarme zu detektieren. Die Kombination mehrerer Hyperbelbandscharen erlaubt schließlich die Anpassung einer geometrischen Kreuzungsbeschreibung an Bildfolgen mit Szenen innerstädtischer Straßenkreuzungen.

Die Verknüpfung dieser Erkennungsroutinen mit der eingangs vorgestellten begrifflichen Beschreibung führt schließlich zur rechnergestützten Erkennung und Beschreibung innerstädtischer Straßenkreuzungen.

6.2 Ausblick

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz kann noch weiter verfeinert werden. Die Terminologie kann erweitert und mit weiteren Erkennungsroutinen verknüpft werden, ohne die Grundstruktur dieses Ansatzes verändern zu müssen. Beispielsweise kann die Suche nach Richtungspfeilen durch Erkennungsroutinen erfolgen, die die Rückgrathyperbeln von bereits detektierten Fahrspuren als Ausgangspunkt für die Untersuchung des Grauwertverlaufes im Bereich der Rückgrathyperbel verwenden. Charakteristische Schwankungen können dann Aufschluss über die Art der Fahrbahnmarkierung geben.

Nicht zuletzt ist die Erweiterung der generischen Beschreibung durch die Aufnahme von Begriffen wie *Schild*, *Signalanlage* oder *Lichtmast* denkbar. Ein solcher Schritt erweitert das bestehende Kreuzungsmodell vom 2D- in den 3D-Bereich. Hierdurch wird es möglich, Probleme durch auftretende Verdeckungen zu vermeiden. Ebenso könnten Fehlzuordnungen von Kantenelementen zu Modellbeschreibungen verringert werden.

Die Auswahl von Fahrzeugtrajektorien lässt sich durch statistische Analyse automatisieren. Bereits in [Sung 88] wurde eine Möglichkeit vorgestellt, wie mit Hilfe einer über einen längeren Zeitraum beobachteten Kreuzungsszene Aussagen über die Struktur einer Kreuzung, insbesondere auch über die Ampelphasen, getroffen werden können. Mit einem solchen Ansatz könnten Aussagen über die Zuverlässigkeit von beobachteten Trajektorien getroffen werden. Beispielsweise wird bei der Überquerung von Kreuzungen üblicherweise kein Fahrspurwechsel vorgenommen. Trotzdem kann bei der Bestimmung der Trajektorie eines einzelnen Fahrzeuges keine Aussage darüber getroffen werden, ob die beobachtete Trajektorie eine Fahrspur geeignet beschreiben kann. Werden viele Fahrzeuge über einen längeren Zeitraum beobachtet, so kann mittels statistischer Analyse nach [Sung 88] entschieden werden, welche Trajektorien zur Initialisierung des Schätzprozesses zur Anpassung von Fahrspuren herangezogen werden sollen.

Weitere Chancen, insbesondere durch die Verwendung von Hyperbelbändern, sind in einer Automatisierung der Kamerakalibrierung zu sehen. Parallel verlaufende Fahrspurbegrenzungen in der Szene haben einen gemeinsamen Fluchtpunkt im Bildbereich. Parallel verlaufende Fahrspuren werden durch Hyperbelbänder in der Szene beschrieben. Sind die Asymptoten dieser Hyperbelbänder parallel, so besitzen diese Asymptoten auch gemeinsame Fluchtpunkte im Bildbereich. Bei gekrümmten Fahrspuren erhält man bereits

zwei verschiedene zueinander (in der Szene) parallele Asymptotenpaare, die jeweils einen Fluchtpunkt festlegen. Unter der Voraussetzung, dass die beobachteten Fahrspuren in einer Ebene liegen, bestimmen diese beiden Fluchtpunkte ihrerseits den Horizont. Mit Hilfe von Kreuzungskomponenten, die in der Szene senkrecht auf der Fahrbahn stehen, und Wissen über die räumliche Ausdehnung von Kreuzungskomponenten kann so eine Verfeinerung der Kamerakalibrierung erreicht werden.

Die weitere Nutzung des Wissens über die Struktur von innerstädtischen Straßenkreuzungen kann in zwei Richtungen gewinnbringend eingesetzt werden:

- Die geometrische Beschreibung liefert beispielsweise Information über die Lage von Fahrspuren, die zur Segmentierung eines Optischen-Fluss-Feldes herangezogen werden kann. Solche Optischen-Fluss-Segmente dienen zur Initialisierung einer modellgestützten Verfolgung von Fahrzeugen. Die verbesserte Initialisierung wiederum führt zu einer Verbesserung der Verfolgung zweier auf benachbarten Fahrspuren fahrender Fahrzeuge. Durch den Verlauf von Fahrspuren können Erwartungen an das Verhalten von beobachteten Fahrzeugen formuliert werden, die letztlich zu einer robusteren Verfolgung von Fahrzeugen beitragen (s. a. [Haag 98]).
- Mit Hilfe der begrifflichen Beschreibung kann die Struktur einer Kreuzung zu einer verfeinerten natürlichsprachlichen Beschreibung beitragen und so ein erweitertes Bild bei der Beschreibung einer Kreuzungsszene liefern.

Anhang A

Betrachtungen zu Quadriken

A.1 Quadriken

Punktmenge, die sich durch die einfachste Form von nichtlinearen Gleichungen – das sind quadratische Gleichungen – beschreiben lassen, nennt man *Quadriken*. Mit diesen Quadriken kann man elementare geometrische Gebilde wie z.B. Kugeln, Kreise, Parabeln, Paraboloiden oder auch Hyperbeln mathematisch erfassen. Um die Ausführungen im Hauptteil kompakt formulieren zu können, werden nachfolgend Quadriken in Matrixschreibweise eingeführt. Es wird außerdem erläutert, wie sich Quadriken möglichst einfach durch ihre *Normalform* darstellen lassen.

Definition A.1 Es seien \mathbb{R}^n ein reeller n -dimensionaler affiner Raum mit zugehörigem Vektorraum V , \tilde{Q} eine symmetrische von der Nullmatrix verschiedene $n \times n$ -Matrix, $\mathbf{a} \in V$, $a_0 \in \mathbb{R}$, $\mathbf{O} \in \mathbb{R}^n$, und \mathcal{K} ein Koordinatensystem mit dem Ursprung \mathbf{O} und den orthonormalen Basisvektoren $\mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_n$. Ist die Menge Q der Ortsvektoren \mathbf{x}

$$Q = \{ \mathbf{x} \in V \mid \mathbf{X} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{x} = \mathbf{O}\vec{\mathbf{X}}, Q = \begin{bmatrix} \tilde{Q} & \mathbf{a} \\ \mathbf{a}^T & a_0 \end{bmatrix}, (\mathbf{x}^T, 1) Q \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \} \quad (\text{A.1})$$

nichtleer, so heißt sie *Quadrik* (s. a. [Bronstein & Semendjajew 91]). Die Matrix \tilde{Q} beschreibt den quadratischen, der Vektor \mathbf{a} den linearen und a_0 den konstanten Anteil der quadratischen Form, die durch die Matrix Q bis auf einen beliebigen Faktor vollständig festgelegt ist.

Die nachfolgenden Eigenschaften sind in [Bronstein & Semendjajew 91] zu finden. Quadriken unterscheidet man in Quadriken *mit* Mittelpunkt, sog. *Mittelpunktquadriken*, und solche *ohne* Mittelpunkt. Wir wollen im weiteren Verlauf nur Mittelpunktquadriken betrachten, zu denen insbesondere auch Hyperbeln zählen. Bei Quadriken mit Mittelpunkt ist die Untermatrix \tilde{Q} der Matrix Q regulär, d. h. die

inverse Matrix \tilde{Q}^{-1} von \tilde{Q} existiert. Der Ortsvektor \mathbf{m} des Mittelpunktes berechnet sich zu:

$$\mathbf{m} = \tilde{Q}^{-1}(-\mathbf{a}). \quad (\text{A.2})$$

Seien $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ die Eigenwerte von \tilde{Q} , $\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n$ die dazu korrespondierenden normierten Eigenvektoren und $\tilde{C} = [\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n]$. Aufgrund der Symmetrieeigenschaft von \tilde{Q} ist \tilde{C} orthogonal und die Matrix $\tilde{C}^T \tilde{Q} \tilde{C}$ liegt in Diagonalform mit den Eigenwerten von \tilde{Q} als Diagonalelementen vor, sodass Q mit

$$\mathcal{C} = \begin{bmatrix} \tilde{C} & \mathbf{m} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

in die Diagonalmatrix

$$\mathcal{C}^T Q \mathcal{C} = \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{C}^T \tilde{Q} \tilde{C} & 0 \\ 0 & a'_0 \end{bmatrix}}_{(n+1) \times (n+1)} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \lambda_n & \\ & & & a'_0 \end{bmatrix}, \quad \text{mit } a'_0 = a_0 + \mathbf{a}^T \mathbf{m} \quad (\text{A.4})$$

transformiert werden kann. Wählt man für \mathcal{K}

$$\mathcal{K} = \{ \mathbf{m}, \tilde{C} \}, \quad (\text{A.5})$$

so ist \tilde{C} eine Orthonormalbasis von \mathcal{K} und für den Ortsvektor $\mathbf{x} \in Q$ im Koordinatensystem \mathcal{K} gilt:

$$(\mathbf{x}^T, 1) \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \lambda_n & \\ & & & a'_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ 1 \end{pmatrix} = 0. \quad (\text{A.6})$$

Für $a'_0 = 0$ stellt die Quadrik Q ein sich schneidendes Geradenpaar dar¹. In diesem Fall liegt die Gleichung (A.6) bereits in Normalform vor. Für $a'_0 \neq 0$ führt eine Division von Gleichung A.6 durch $-a'_0$ zur *Normalform* von Q :

$$(\mathbf{x}^T, 1) \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1}{-a'_0} & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \frac{\lambda_n}{-a'_0} & \\ & & & -1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ 1 \end{pmatrix} = 0. \quad (\text{A.7})$$

¹Schneiden sich die Geraden dagegen nicht, handelt es sich um eine Quadrik *ohne* Mittelpunkt, die hier nicht behandelt werden soll. In diesem Fall ist die Untermatrix \tilde{Q} nicht regulär. Beim zweidimensionalen affinen Raum, also im Falle von Kegelschnitten, existiert für alle nicht parallelen Geradenpaare immer ein Mittelpunkt.

Die Basisvektoren der Basis $\tilde{\mathcal{C}}$ bilden mit dem Mittelpunkt \mathbf{m} von Q die *Hauptachsen* der Quadrik Q . Die Normalisierung von Q heißt *Hauptachsentransformation*. Eine Klassifikation von Quadriken erfolgt anhand des Quotienten aus Eigenwerten und Faktor $-a'_0$, während die Eigenvektoren die Orientierung der Quadrik festlegen.

A.2 Hyperbeln

Aufbauend auf der Normalform einer Hyperbel werden Eigenschaften diskutiert, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit genutzt werden.

Zweidimensionale Quadriken nennt man *Kegelschnitte*. Sei H ein über den affinen Raum \mathbb{R}^2 definierter Kegelschnitt. Ein Kegelschnitt H ist durch die Matrix

$$\mathcal{H} = \begin{bmatrix} A & B/2 & D/2 \\ B/2 & C & E/2 \\ D/2 & E/2 & F \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

festgelegt (s. a. Definition A.1). Für die Elemente $\mathbf{x} \in H$ erhält man die ausgeschriebene Form:

$$(\mathbf{x}^T, 1) \mathcal{H} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ 1 \end{pmatrix} = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0. \quad (\text{A.9})$$

Gilt für die zur Normalform von H gehörige Matrix \mathcal{H}' (s. a. Gleichung A.7)

$$\mathcal{H}' = \begin{bmatrix} A' & 0 & 0 \\ 0 & C' & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

noch $A' > 0$ und $C' < 0$, so beschreibt H eine *Hyperbel*.

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes sei das Koordinatensystem \mathcal{K} so gewählt, dass die Hyperbel H in Normalform vorliegt.

Die *Halbachsenparameter* a und b der Hyperbel H berechnen sich zu:

$$a = \frac{1}{\sqrt{A'}}, \quad b = \frac{1}{\sqrt{-C'}}. \quad (\text{A.11})$$

Eine Hyperbel besitzt zwei Äste, die sich beide an zwei Asymptoten annähern. Der *Richtungskoeffizient* dieser Asymptoten hat den Wert:

$$k = \pm \tan(\eta) = \pm \frac{b}{a}. \quad (\text{A.12})$$

Der Winkel η bezeichnet dabei den *Öffnungswinkel* der Asymptoten.

Der Schnittpunkt der Asymptoten ist gleich dem Mittelpunkt \mathbf{m} von H (s. Gleichung A.2). Liegt eine Hyperbel in Normalform vor, ist der Mittelpunkt gleich dem Ursprung.

Die Schnittpunkte der Hyperbeläste mit der ersten Hauptachse nennt man *Scheitelpunkte*. Sie haben im Koordinatensystem \mathcal{K} die Koordinaten $(a, 0)$ und $(-a, 0)$.

Für die Hyperbelschar H_p seien die Halbachsenparameter $a = p \cdot a'$ und $b = p \cdot b'$ mit demselben Richtungskoeffizienten $k = b/a = b'/a'$ und $p \in \mathbb{R}$ gegeben. Jede Hyperbel der Hyperbelschar soll dabei im Koordinatensystem \mathcal{K} in Normalform vorliegen. Im Koordinatensystem \mathcal{K} haben alle Hyperbeln H_p den Ursprung als Mittelpunkt und die Scheitelpunkte haben die Koordinaten $(p \cdot a', 0)^T$. Für $p_1, p_2 \in \mathbb{R}$ mit $p_1 < p_2$ gilt auch $p_1 \cdot a < p_2 \cdot a$ (nach Gleichung A.11 gilt immer $a > 0$) und damit liegt der Scheitelpunkt der Hyperbel H_{p_1} näher am Ursprung als der Scheitelpunkt der Hyperbel H_{p_2} . Es lässt sich ebenfalls zeigen, dass dadurch die Hyperbel H_{p_1} am Scheitelpunkt, anschaulich gesprochen, spitzer ausfällt als die Hyperbel H_{p_2} .

Eine Verschiebung der in Normalform vorliegenden Hyperbel H um den Vektor $\mathbf{v} = (v_x, v_y)^T$ kann durch die Matrix

$$\begin{aligned} \mathcal{H}'_{\mathbf{v}} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ v_x & v_y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A' & 0 & 0 \\ 0 & C' & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & v_x \\ 0 & 1 & v_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A' & 0 & A'v_x \\ 0 & C' & C'v_y \\ A'v_x & C'v_y & A'v_x^2 + C'v_y^2 - 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

ausgedrückt werden. Ein Vergleich der Gleichungen A.13 und A.8 zeigt, dass sich bei der Verschiebung mit einem Vektor \mathbf{v} nur der lineare und konstante Anteil der Kegelschnittgleichung ändert.

Bei der Anpassung von Kegelschnitten an Punktmengen, wie sie im Abschnitt D diskutiert wird, werden Zwangsbedingungen formuliert, die die Art des Kegelschnittes festlegen sollen. Wie im Abschnitt A.1 beschrieben, folgt aus der Gleichung A.7, dass im quadratischen Anteil die Art des Kegelschnittes und seine Orientierung festgelegt ist. Um Beziehungen der Kegelschnittparameter A bis C abzuleiten, wird deshalb nachfolgend die Matrix $\tilde{\mathcal{H}}$ herangezogen, die entsprechend der Definition A.1 den quadratischen Anteil des Kegelschnittes repräsentiert.

Sei die Matrix $\tilde{\mathcal{C}}$ wie im Abschnitt A.1 die Basis des Koordinatensystems \mathcal{K} . Um den quadratischen Anteil $\tilde{\mathcal{H}}'$ der Matrix \mathcal{H}' in die Matrix $\tilde{\mathcal{H}}$ zu überführen, wird die Gleichung

$$\tilde{\mathcal{H}} = \tilde{\mathcal{C}}^{-T} \tilde{\mathcal{H}}' \tilde{\mathcal{C}}^{-1} = \tilde{\mathcal{C}} \tilde{\mathcal{H}}' \tilde{\mathcal{C}}^T$$

aufgestellt. Die Matrix $\tilde{\mathcal{C}}$ ist orthogonal mit Determinante gleich Eins. Sie hat deshalb die Form:

$$\tilde{\mathcal{C}} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix}, \quad \text{mit } \gamma \in \mathbb{R}.$$

Bei der Anpassung von Ellipsen an Stützpunkte mittels linearer Regression wird die Zwangsbedingung $A + C = 1$ verwendet. Für isometrische Abbildungen bleibt die Spur

einer Matrix erhalten. Es gilt:

$$A + C = \text{Spur } \tilde{\mathcal{H}} = \text{Spur } \tilde{\mathcal{H}}' = A' + C' = 1.$$

Für Hyperbeln gilt $C' < 0$, sodass für Hyperbeln entsprechend die Zwangsbedingung $A - C = 1$ motiviert wird.

Anhang B

Betrachtungen zu Hyperbelbändern

B.1 Hyperbelbänder

Satz B.1 Die Parameter der Hyperbeln $H_1(p_1 \cdot a_G, p_1 \cdot b_G, \mathbf{m}_1, \theta_G)$ und $H_2(p_2 \cdot a_G, p_2 \cdot b_G, \mathbf{m}_2, \theta_G)$ eines Hyperbelbandes $H_1|_G H_2$ mit dem Parametersatz $(a_G, b_G, \mathbf{m}_G, \theta_G, d_1, d_2, \tau)$ können mit den nachfolgenden Werten im Eigensystem \mathcal{K}_G der Rückgrathyperbel G bestimmt werden:

$$\begin{aligned}\mathbf{m}_1 &= - \begin{pmatrix} (d_1 + d_2)/(2 \sin(\eta)) \\ (d_1 - d_2)/(2 \cos(\eta)) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}_G}, \\ \mathbf{m}_2 &= \begin{pmatrix} (d_1 + d_2)/(2 \sin(\eta)) \\ (d_1 - d_2)/(2 \cos(\eta)) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}_G}, \\ p_1 \cdot a_G &= a_G + \frac{d_1 + d_2}{2 \sin(\eta)} - \sqrt{\left(\tau \frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_2 - d_1}{2 \cos(\eta)}\right)^2}, \\ p_2 \cdot a_G &= a_G - \left(\frac{d_1 + d_2}{2 \sin(\eta)} - \sqrt{\left(\tau \frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_2 - d_1}{2 \cos(\eta)}\right)^2}\right), \\ \mathbf{s}_1 &= \mathbf{m}_1 + (p_1 \cdot a_G, 0)_{\mathcal{K}_G}^T, \\ \mathbf{s}_2 &= \mathbf{m}_2 + (p_2 \cdot a_G, 0)_{\mathcal{K}_G}^T.\end{aligned}$$

Beweis: Die Hyperbeln H_1 und H_2 haben dieselbe Orientierung θ_G , sodass sich die Eigensysteme der drei Hyperbeln H_1 , H_2 und G nur durch den Ursprung unterscheiden. Damit liegen die Scheitelpunkte der Hyperbeln H_1 und H_2 auf jeweils einer Geraden parallel zur ersten Hauptachse von G . Alle nachfolgenden Betrachtungen erfolgen im Koordinatensystem \mathcal{K}_G der Rückgrathyperbel G . Für das Verhältnis der Halbachsenparameter

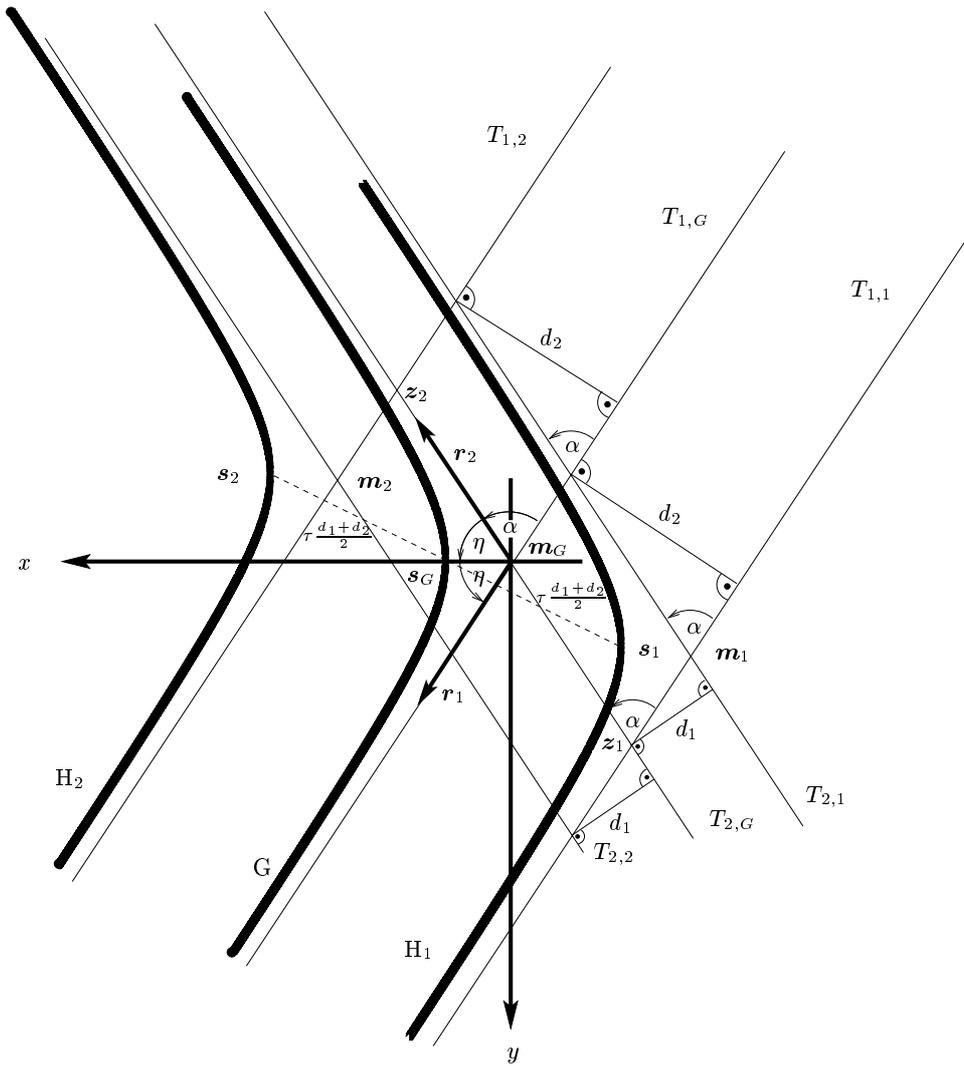


Abbildung B.1: Das Hyperbelband $H_1|_G H_2$ kann ausgehend von der Rückgrathyperbel G konstruiert werden. Das Koordinatensystem ist so festgelegt, dass G in Normalform vorliegt. $T_{1,1}$, $T_{1,2}$, $T_{1,G}$ mit Richtung \mathbf{r}_1 und $T_{2,1}$, $T_{2,2}$, $T_{2,G}$ mit Richtung \mathbf{r}_2 sind die Asymptoten, \mathbf{m}_1 , \mathbf{m}_2 , \mathbf{m}_G die Mittelpunkte und \mathbf{s}_1 , \mathbf{s}_2 , \mathbf{s}_G die Scheitelpunkte der Hyperbeln H_1 , H_2 und G . Das Symbol d_2 bezeichnet den Abstand zwischen den Asymptoten $T_{1,1}$, $T_{1,G}$ sowie $T_{1,2}$, $T_{1,G}$ und das Symbol d_1 den Abstand zwischen den Asymptoten $T_{2,1}$, $T_{2,G}$ sowie $T_{2,2}$, $T_{2,G}$. Der Öffnungswinkel η ist durch den Richtungskoeffizienten der Asymptoten $\tan(\eta) = b/a$ festgelegt. Mit dem Winkel $\alpha = \pi - 2\eta$, den Abständen d_1 , d_2 und den normierten Richtungsvektoren der Asymptoten lassen sich die Vektoren $\mathbf{m}_G \vec{z}_1$, $\mathbf{z}_1 \vec{m}_1$ und damit der Mittelpunkt \mathbf{m}_1 eindeutig bestimmen. Gleiches gilt für die Vektoren $\mathbf{m}_G \vec{z}_2$, $\mathbf{z}_2 \vec{m}_2$ und den Mittelpunkt \mathbf{m}_2 . Der Abstand zwischen den Scheitelpunkten \mathbf{s}_1 , \mathbf{s}_G und \mathbf{s}_2 (gestrichelte Linie) hat den Betrag $\tau \frac{d_1 + d_2}{2}$.

gilt die folgende Beziehung:

$$\tan(\eta) = \frac{b_G}{a_G} = \frac{p_1 b_G}{p_1 a_G} = \frac{p_2 b_G}{p_2 a_G} \quad \text{mit } p_1, p_2 \in \mathbb{R}.$$

Damit haben alle drei Hyperbeln denselben Öffnungswinkel η (s. a. Abbildung B.1).

Für die Scheitelpunkte \mathbf{s}_1 , \mathbf{s}_2 und zugehörigen Mittelpunkten \mathbf{m}_1 , \mathbf{m}_2 gilt daher die Gleichung:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_1 &= \mathbf{m}_1 + (p_1 a_G, 0)_{\mathcal{K}_G}^T, \\ \mathbf{s}_2 &= \mathbf{m}_2 + (p_2 a_G, 0)_{\mathcal{K}_G}^T. \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

Die Mittelpunkte \mathbf{m}_1 und \mathbf{m}_2 lassen sich eindeutig durch die normierten Richtungsvektoren der Asymptoten, durch die Abstände d_1 , d_2 und den Winkel $\alpha = \pi - 2\eta$ bestimmen. Die normierten Richtungsvektoren der Asymptoten T_1 und T_2 haben die folgende Gestalt:

$$\mathbf{r}_1 = \begin{pmatrix} \cos(\eta) \\ \sin(\eta) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}_G}, \quad \mathbf{r}_2 = \begin{pmatrix} \cos(\eta) \\ -\sin(\eta) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}_G}. \quad (\text{B.2})$$

Die Mittelpunkte \mathbf{m}_1 und \mathbf{m}_2 lassen sich durch eine Linearkombination von \mathbf{r}_1 und \mathbf{r}_2 bestimmen. Um mit den vorgegebenen Fahrspurbreiten d_1 und d_2 vom Punkt \mathbf{m}_G zum Punkt \mathbf{z}_1 bzw. \mathbf{z}_2 (s. Abbildung B.1) zu gelangen, müssen die Richtungsvektoren \mathbf{r}_i der Asymptoten T_i mit dem Faktor r_i ($i \in \{1, 2\}$) multipliziert werden:

$$r_i = \frac{d_i}{\sin(\pi - 2\eta)} = \frac{d_i}{\sin(2\eta)}.$$

Für die Linearkombination $r_1 \mathbf{r}_1 + r_2 \mathbf{r}_2$ gilt:

$$\begin{aligned} r_1 \mathbf{r}_1 + r_2 \mathbf{r}_2 &= \frac{1}{\sin(2\eta)} (d_1 \mathbf{r}_1 + d_2 \mathbf{r}_2) \\ &= \frac{1}{\sin(2\eta)} \begin{pmatrix} d_1 \cos(\eta) + d_2 \cos(\eta) \\ d_1 \sin(\eta) - d_2 \sin(\eta) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}_G} \\ &= \begin{pmatrix} (d_1 + d_2)/(2 \sin(\eta)) \\ (d_1 - d_2)/(2 \cos(\eta)) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}_G}. \end{aligned}$$

Für die Mittelpunkte gilt schließlich die Beziehung:

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_1 &= \mathbf{m}_G + \mathbf{m}_G \vec{z}_1 + \mathbf{z}_1 \vec{m}_1 = -(r_1 \mathbf{r}_1 + r_2 \mathbf{r}_2) \\ &= - \begin{pmatrix} (d_1 + d_2)/(2 \sin(\eta)) \\ (d_1 - d_2)/(2 \cos(\eta)) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}_G}, \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{m}_2 &= \mathbf{m}_G + \mathbf{m}_G^T \mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_2^T \vec{\mathbf{m}}_2 = r_1 \mathbf{r}_1 + r_2 \mathbf{r}_2 \\
&= \begin{pmatrix} (d_1 + d_2)/(2 \sin(\eta)) \\ (d_1 - d_2)/(2 \cos(\eta)) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}_G}. \tag{B.4}
\end{aligned}$$

Zur Bestimmung der Scheitelpunkte \mathbf{s}_1 und \mathbf{s}_2 der Hyperbeln H_1 und H_2 muss für den Abstand der Scheitelpunkte gelten:

$$\begin{aligned}
\tau \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} &= \|\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_G\| = \|\mathbf{m}_1 + (p_1 \cdot a_G, 0)_{\mathcal{K}_G}^T - (a_G, 0)_{\mathcal{K}_G}^T\| \\
&= \left\| \begin{pmatrix} p_1 \cdot a_G - (d_1 + d_2)/(2 \sin(\eta)) - a_G \\ -(d_1 - d_2)/(2 \cos(\eta)) \end{pmatrix}_{\mathcal{K}_G} \right\| \tag{B.5}
\end{aligned}$$

Um für den Term $p_1 \cdot a_G$ eine Lösung zu finden, muss die Gleichung

$$\sqrt{\left(p_1 \cdot a_G - \frac{d_1 + d_2}{2 \sin(\eta)} - a_G \right)^2 + \left(\frac{d_2 - d_1}{2 \cos(\eta)} \right)^2} = \tau \frac{d_1 + d_2}{2}$$

gelöst werden. Dabei muss beachtet werden, dass $\tau(d_1 + d_2)/2 > 0$ gilt. Als mögliche Lösungen erhält man schließlich:

$$p_1 \cdot a_G = a_G + \frac{d_1 + d_2}{2 \sin(\eta)} \pm \sqrt{\left(\tau \frac{d_1 + d_2}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_2 - d_1}{2 \cos(\eta)} \right)^2}. \tag{B.6}$$

Um entscheiden zu können, welche Lösung der Gleichung B.6 die richtige ist, wird der vereinfachte Fall $d_1 = d_2 = d$ betrachtet. Für diesen Fall lässt sich der Mittelpunkt \mathbf{m}_1 nach Gleichung B.3 und damit der Scheitelpunkt \mathbf{s}_1 nach Gleichung B.1 zu

$$\begin{aligned}
\mathbf{m} &= (-d/\sin(\eta), 0)_{\mathcal{K}_G}^T, \\
\mathbf{s} &= (-d/\sin(\eta), 0)_{\mathcal{K}_G}^T + (p_1 a_G, 0)_{\mathcal{K}_G}^T
\end{aligned}$$

bestimmen (s. a. Abbildung B.2). Beachtet man, dass aufgrund der Konstruktion eines Hyperbelbandes $a_G > m_{1x} + p_1 \cdot a_G$ gilt, erhält man mit Gleichung B.5:

$$\begin{aligned}
\tau \cdot d &= a_G - (-d/\sin(\eta) + p_1 \cdot a_G), \\
p_1 \cdot a_G &= a_G + d/\sin(\eta) - \tau \cdot d. \tag{B.7}
\end{aligned}$$

Die Gleichung B.6 wird für $d_1 = d_2 = d$ zu

$$p_1 \cdot a_G = a_G + \frac{d}{\sin(\eta)} \pm \tau \cdot d \tag{B.8}$$

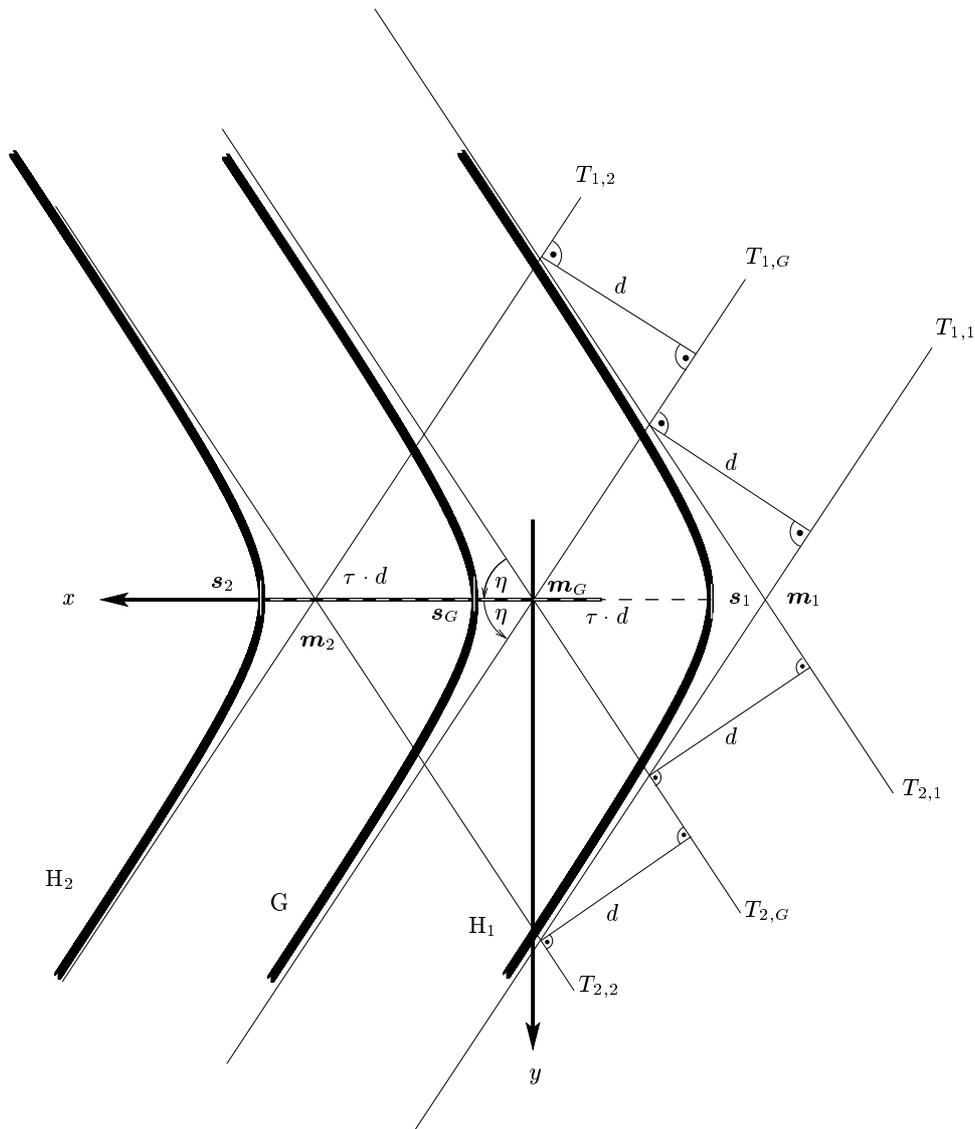


Abbildung B.2: Das Hyperbelband $H_1|_G H_2$ kann für $d = d_1 = d_2$ mit Hilfe der Rückgrathyperbel G konstruiert werden. Das Koordinatensystem ist so festgelegt, dass G in Normalform vorliegt. $T_{1,1}, T_{1,2}, T_{1,G}$ und $T_{2,1}, T_{2,2}, T_{2,G}$ sind die – wie abgebildet – zueinander parallelen Asymptoten, m_1, m_2, m_G die Mittelpunkte und s_1, s_2, s_G die Scheitelpunkte der Hyperbeln H_1, H_2 und G . Das Symbol d bezeichnet den Abstand zwischen den Asymptoten $T_{1,1}, T_{1,G}$ sowie $T_{1,2}, T_{1,G}$ und den Abstand zwischen den Asymptoten $T_{2,1}, T_{2,G}$ sowie $T_{2,2}, T_{2,G}$. Der Öffnungswinkel η ist durch den Richtungskoeffizienten der Asymptoten $\tan(\eta) = b/a$ festgelegt. Aufgrund des einheitlichen Abstandes d und der Parallelität der Asymptoten liegen alle Scheitelpunkte auf der x -Achse. Der Abstand zwischen den Scheitelpunkten s_1, s_G und s_G, s_2 (gestrichelte Linie) hat den Betrag $\tau \cdot d$.

vereinfacht. Ein Vergleich der Gleichungen B.7 und B.8 sowie Stetigkeitsbetrachtungen führen schließlich zur folgenden Lösung:

$$p_1 \cdot a_G = a_G + \frac{d_1 + d_2}{2 \sin(\eta)} - \sqrt{\left(\tau \frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_2 - d_1}{2 \cos(\eta)}\right)^2}. \quad (\text{B.9})$$

Für die Hyperbel H_2 findet man auf ähnliche Weise die Lösung:

$$p_2 \cdot a_G = a_G - \frac{d_1 + d_2}{2 \sin(\eta)} + \sqrt{\left(\tau \frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_2 - d_1}{2 \cos(\eta)}\right)^2}. \quad (\text{B.10})$$

■

B.2 Abstandsmaß für Hyperbeln

Seien H_1 und H_2 ϵ_{Winkel} -ähnliche Hyperbeln mit $H_k(a_k, b_k, \mathbf{m}_k, \theta)$. Um eine einfachere Beschreibung für das Abstandsmaß zu erhalten, wird nachfolgend das Eigensystem der Hyperbel H_1 als Koordinatensystem \mathcal{K} gewählt:

$$\mathcal{K} = \left\{ \begin{pmatrix} m_{1x} \\ m_{1y} \end{pmatrix}, \left[\begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix} \right] \right\}.$$

Alle nachfolgenden Betrachtungen erfolgen im Koordinatensystem \mathcal{K} .

Ein Hyperbelast der Hyperbel H_k kann in Parameterform mit

$$\begin{aligned} x &= a_k \cdot \cosh(t) + m_{kx}, \\ y &= b_k \cdot \sinh(t) + m_{ky} \end{aligned}$$

beschrieben werden. Die x und y -Koordinaten lassen sich durch Eliminierung des Parameters t mit

$$\begin{aligned} x &= a_k \cdot \cosh\left(\operatorname{asinh}\left(\frac{y - m_{ky}}{b_k}\right)\right) + m_{kx} \\ &= a_k \cdot \sqrt{\left(\frac{y - m_{ky}}{b_k}\right)^2 + 1} + m_{kx}. \end{aligned}$$

zueinander in Beziehung setzen. Für die Hyperbeln H_1 und H_2 wird deshalb die Funktion $g_k(y)$, $k \in \{1, 2\}$ mit

$$g_k(y) = a_k \cdot \sqrt{\left(\frac{y - m_{ky}}{b_k}\right)^2 + 1} + m_{kx} \quad (\text{B.11})$$

definiert.

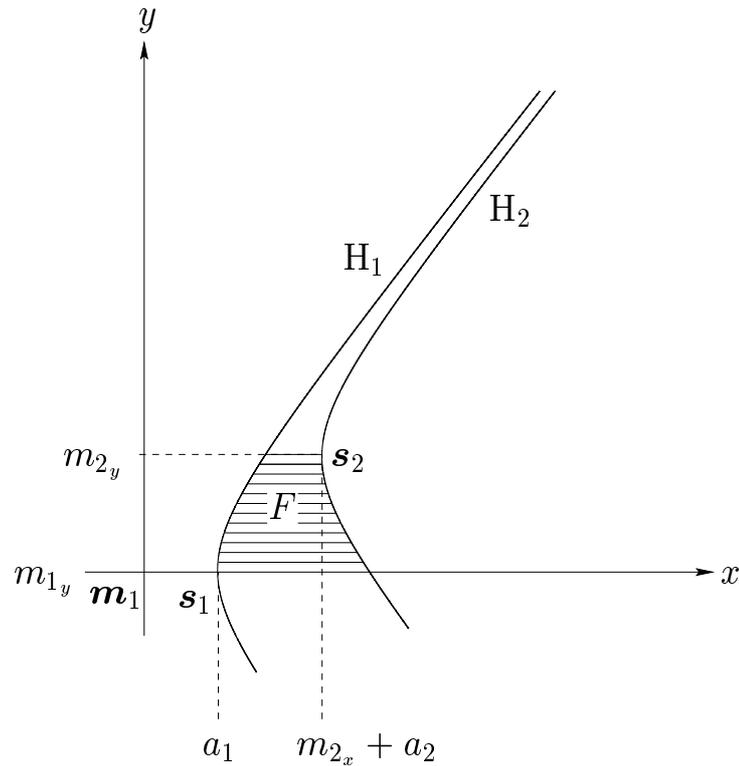


Abbildung B.3: Das Koordinatensystem \mathcal{K} liegt im Eigensystem von H_1 mit Ursprung \mathbf{m}_1 . Die gestrichelte Fläche F wird durch die beiden Hyperbeln H_1, H_2 , die x -Achse und die zur x -Achse parallele Gerade $y = m_{2y}$ begrenzt. Diese begrenzenden Geraden sind dabei so definiert, dass der Scheitelpunkt \mathbf{s}_1 von H_1 auf der x -Achse und der Scheitelpunkt \mathbf{s}_2 von H_2 auf der Geraden $y = m_{2y}$ liegt. Die Orientierung beider Hyperbeläste wird als gleich angenommen, da H_1 und H_2 ϵ_{Winkel} -ähnlich sind.

Der Abstand der Hyperbeln H_1, H_2 lässt sich als Wurzel einer Fläche F definieren, die durch die beiden Hyperbeln H_1, H_2 , der x -Achse ($y = m_{1y} = 0$) und der zur x -Achse parallelen Gerade $y = m_{2y}$ begrenzt wird. Dabei liegt der Scheitelpunkt \mathbf{s}_1 auf der x -Achse und der Scheitelpunkt \mathbf{s}_2 auf der Geraden $y = m_{2y}$. Die Scheitelpunkte haben die Koordinaten $\mathbf{s}_1 = (a_1, 0)_{\mathcal{K}}^T$ und $\mathbf{s}_2 = (m_{2x} + a_2, m_{2y})_{\mathcal{K}}^T$. In Abbildung B.3 ist die Konstruktion einer solchen Fläche F skizziert. Falls beide Scheitelpunkte gemeinsam auf der x -Achse liegen, ist der Flächeninhalt von F gleich Null. Die beiden Scheitelpunkte müssen dabei jedoch nicht identisch sein. Aus diesem Grund wird das Quadrat des Abstandes der beiden Scheitelpunkte in x -Richtung zum Flächeninhalt von F addiert:

$$d(H_1, H_2) = \sqrt{\underbrace{\int_{m_{1y}}^{m_{2y}} (g_1(y) - g_2(y)) \, dy}_F + \underbrace{(m_{2x} + a_2 - a_1)^2}_{(\mathbf{s}_{2x} - \mathbf{s}_{1x})^2}} \quad (\text{B.12})$$

Im Koordinatensystem \mathcal{K} gilt $(m_{1x}, m_{1y}) = (0, 0)_{\mathcal{K}}^T$, sodass die Gleichung B.12 vereinfacht

werden kann:

$$d(H_1, H_2) = \sqrt{\int_0^{m_{2y}} (g_1(y) - g_2(y)) dy + (m_{2x} + a_2 - a_1)^2}.$$

Die Bestimmung des Integrals $\int (g_1(y) - g_2(y)) dy$ lässt sich auf die Stammfunktion von $\int g(y) dy$ zurückführen.

Satz B.2 Eine Stammfunktion von $\int g(y) dy$ hat die Form:

$$\int g(y) dy \stackrel{!}{=} \frac{ab}{2} \left(\frac{y - m_y}{b} \sqrt{\left(\frac{y - m_y}{b}\right)^2 + 1} + \log \left(\sqrt{\left(\frac{y - m_y}{b}\right)^2 + 1} + \frac{y - m_y}{b} \right) \right) + y m_x + C. \quad (\text{B.13})$$

Beweis: Eine Stammfunktion von $\int g(y) dy$ lässt sich wie folgt finden:

$$\begin{aligned} \int g(y) dy &= \int \left(a \cdot \sqrt{\left(\frac{y - m_y}{b}\right)^2 + 1} + m_x \right) dy \\ &= y \cdot m_x + \int a \cdot \sqrt{\left(\frac{y - m_y}{b}\right)^2 + 1} dy \end{aligned}$$

Die Substitution $y = b\xi + m_y$ führt zu $d\xi = 1/b dy$. Damit erhält man für $\int g(y) dy$:

$$\begin{aligned} \int g(y) dy &= y \cdot m_x + \int ab \cdot \sqrt{\xi^2 + 1} d\xi \\ &= y \cdot m_x + \frac{ab}{2} \left(\xi \sqrt{\xi^2 + 1} + \log \left(\sqrt{\xi^2 + 1} \right) \right) + C. \quad (\text{B.14}) \end{aligned}$$

Durch Substitution von $\xi = (y - m_y)/b$ in Gleichung B.14 erhält man die in Gleichung B.13 angegebene Stammfunktion für $\int g(y) dy$. ■

Die Bestimmung der Fläche F ist vorzeichenbehaftet, wenn sich die Hyperbeln H_1 und H_2 im Bereich $[m_{1y}, m_{2y}]$ überschneiden. Für die vorliegende Arbeit wird das hier diskutierte Abstandsmaß für die Rückgrathyperbeln von Hyperbelbändern, die zur Beschreibung von Fahrspuren verwendet werden, eingesetzt. Diese Rückgrathyperbeln liegen jedoch so weit auseinander, dass sich die Rückgrathyperbeln im Bereich zwischen den Scheitelpunkten nicht durchdringen. Aus diesem Grund müssen für den vorliegenden Einsatzbereich des vorgestellten Abstandsmaßes keine sich durchdringenden Hyperbeln berücksichtigt werden.

Anhang C

Fahrzeugtrajektorien

Bei der Verfolgung von Fahrzeugen können zwei Ansätze unterschieden werden: der *modellbasierte* und der *datengetriebene* Ansatz. Beim modellbasierten Ansatz werden zur Berechnung der Fahrzeugtrajektorien begriffliche und geometrische Beschreibungen verwendet. Diese Beschreibungen umfassen die Kreuzungsstruktur, das Fahrverhalten von Fahrzeugen, generische Beschreibungen von Fahrzeugen und nicht zuletzt Information über die internen und externen Kameraparameter (s. a. [Haag 98]). Insbesondere die Benutzung von Beschreibungen über die Kreuzungsstruktur stehen in deutlichem Widerspruch zur Zielsetzung, die Kreuzungsstruktur ausschließlich aus dem Bild, dem Wissen über den allgemeinen Aufbau von innerstädtischen Straßenkreuzungen und der Kenntnis der Kameraparameter abzuleiten, da bei der modellgestützten Verfolgung bereits ein Kreuzungsmodell derselben Kreuzung *interaktiv* erstellt werden muss, für die eine begriffliche und geometrische Beschreibung *rechnergestützt* ermittelt werden soll.

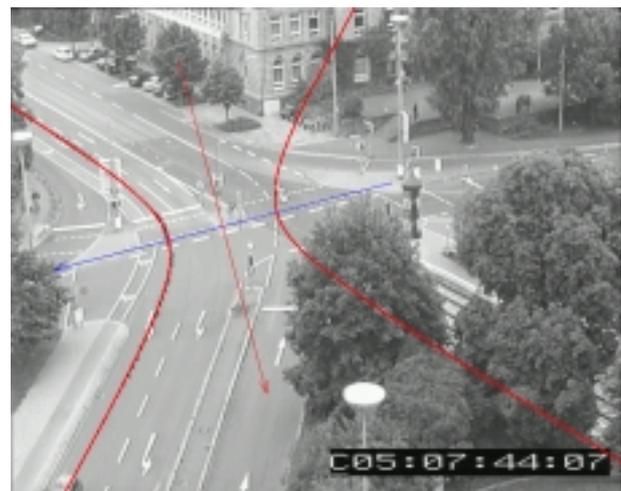
Durch eine datengetriebene Verfolgung von Fahrzeugen können Trajektorien mit nur wenig vorausgesetztem Modellwissen bestimmt werden (s. a. [Middendorf 99, Nagel & Gehrke 98a, Nagel & Gehrke 98b]). Die Verfolgung von Fahrzeugen wird dabei ausschließlich im Bildbereich durchgeführt, sodass keine Annahmen über den Szenenbereich getroffen werden.

Für die Anpassung des Fahrspurmodells aus Abschnitt 4.1 an Ausschnitte von Bildfolgen mit Szenen einer innerstädtischen Straßenkreuzung werden Trajektorien benötigt, um Startwerte für den nichtlinearen Schätzprozess bereitzustellen. An diese Trajektorien werden im Bildbereich Hyperbeln angepasst, deren Rückprojektion in die Szene als Startwert für die Rückgrathyperbel des anzupassenden Fahrspurmodells dient. Bei der Ermittlung dieser Trajektorien darf daher kein Wissen einfließen, das beispielsweise ein Kreuzungsmodell voraussetzt. Aus diesem Grund eignet sich die datengetriebene Verfolgung zur Bestimmung von Fahrzeugtrajektorien für die Initialisierung des Anpassprozesses in Abschnitt 4.1. Die bei der datengetriebenen Verfolgung berechneten OIC-Masken (*Object Image Candidate*) dienen als Ausgangspunkt für die Bestimmung einer Rückgrathyperbel im Bild. Die Schwerpunkte der OIC-Masken werden als Stützpunkte bei der Anpassung einer Hyperbel im Bildbereich herangezogen. Aufgrund von Verdeckungen oder Schwie-

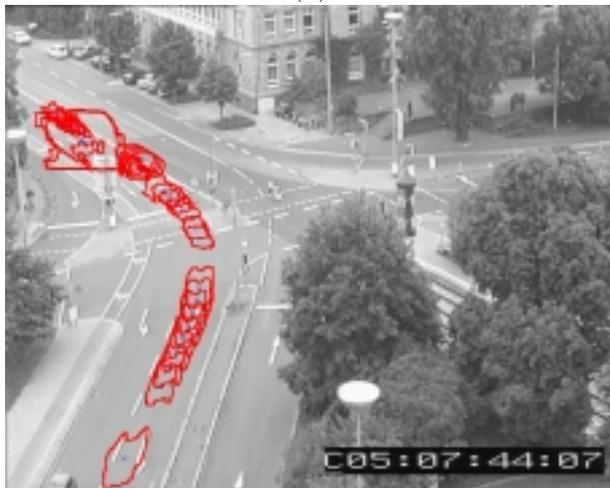
rigkeiten bei der Bestimmung von OIC-Masken konnten zum Teil nur kleinere Teilstücke der Trajektorien berechnet werden, die jedoch interaktiv einer gemeinsamen Trajektorie zugeordnet wurden. Dadurch entstehen in der resultierenden Trajektorie Lücken. In Abbildung C.1 sind links Konturen von OIC-Masken dargestellt, an deren Schwerpunkte Hyperbeln nach dem in Anhang D beschriebenen Verfahren angepasst wurden. Die Resultate dieser Anpassung sind in der rechten Spalte dargestellt.



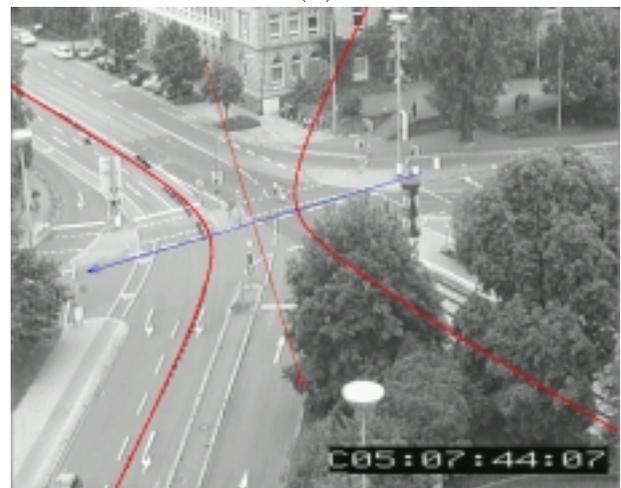
(a)



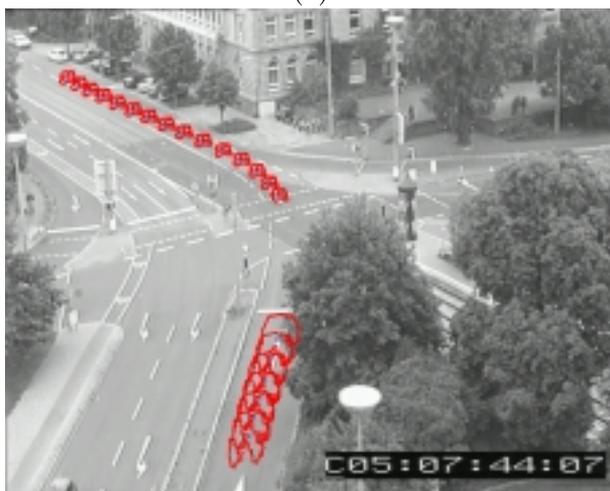
(b)



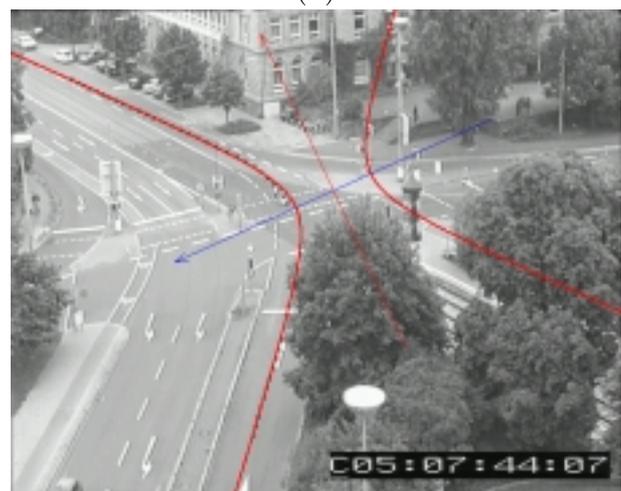
(c)



(d)



(e)



(f)

Abbildung C.1: Links sind Konturen von OIC-Masken dargestellt, an deren Schwerpunkte Hyperbeln angepasst wurden.

Anhang D

Anpassung von Hyperbeln

In nahezu allen Bereichen der Bildauswertung müssen Parameter von Systembeschreibungen aus verrauschten Daten geschätzt werden (s. a. [Zhang 97]). Die Schätzung dieser Parameter kann deshalb gewöhnlich nur als Optimierungsproblem gelöst werden. Die in den nächsten Abschnitten vorgestellten Methoden greifen dieses Problem auf und zeigen, wie Standardverfahren auf die hier vorrangig zu diskutierende Aufgabe der Hyperbelanpassung übertragen werden können.

Sei also \mathbf{x} der Zustandsvektor, dessen Komponenten die zu schätzenden Parameter darstellen. Die Dimension $\dim(\mathbf{x})=m$ entspricht somit der Anzahl der zu schätzenden Parameter. Sei \mathbf{z} der Messvektor, der als Ausgabe des Systems gemessen wird. Im rauschfreien Fall beschreibt die Vektorfunktion \mathbf{f} die Beziehung zwischen \mathbf{z} und \mathbf{x} :

$$\mathbf{f}(\mathbf{z}, \mathbf{x}) = 0.$$

Bei physikalischen Systemen können jedoch nur verrauschte Messungen \mathbf{y} beobachtet werden, sodass mit einem Fehlervektor $\boldsymbol{\epsilon}$

$$\mathbf{y} = \mathbf{z} + \boldsymbol{\epsilon}$$

gilt. In der Regel werden mehrere Messungen \mathbf{y}_i ($i = 1, \dots, n$) durchgeführt, wobei zur Schätzung von \mathbf{x} die Menge $\{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n\}$ verwendet werden soll. Aufgrund der verrauschten Daten ist die Gleichung $\mathbf{f}(\mathbf{y}_i, \mathbf{x}) = 0$ nur selten erfüllt. Aus diesem Grund wird eine Funktion

$$\mathbf{F}(\{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n\}, \mathbf{x})$$

aufgestellt, die optimiert werden muss. Diese Optimierung wird in der Regel als Minimierungsproblem formuliert. Diese Funktion \mathbf{F} heißt *Kosten-* oder *Zielfunktion*. Oftmals wird statt $\mathbf{F}(\{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n\}, \mathbf{x})$ einfach nur $\mathbf{F}(\mathbf{y}_i, \mathbf{x})$ geschrieben.

Gibt es keine weiteren Beschränkungen für den Zustandsvektor \mathbf{x} und existieren die ersten und zweiten Ableitungen der Funktion \mathbf{F} im gesamten Definitionsbereich, so kann die notwendige Bedingung für ein Minimum mit

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} = 0, \quad \frac{\partial^2 \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}^2} > 0$$

beschrieben werden, wobei der zweite Ausdruck für eine $m \times m$ -Matrix steht, die positiv definit ist.

D.1 Methode der kleinsten Quadrate

Die *lineare Regression* oder auch *Methode der kleinsten Quadrate* beschreibt ein Optimierungsverfahren, das die Summe von quadratischen Abständen der verrauschten Messungen $\{\mathbf{y}_i\}$ zur Funktion \mathbf{f} minimiert. Im Falle von Kegelschnitten wird jedoch in der Regel nicht der *euklidische*, sondern der viel einfacher zu handhabende *algebraische* Abstand verwendet.

In unserer Aufgabenstellung sollen nun Hyperbeln an die Messungen $\{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n\}$ angepasst werden. Als Funktion $\mathbf{f}(\mathbf{z}, \mathbf{x})$ wird deshalb die im Abschnitt A.2 eingeführte ausgeschriebene Form eines Kegelschnittes benutzt:

$$\mathbf{f}(\mathbf{z}, \mathbf{x}) = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F$$

$$\text{mit } \mathbf{z} = (x, y)^T, \quad \mathbf{x} = (A, B, C, D, E, F)^T.$$

Als Kostenfunktion wird wie oben beschrieben die Funktion

$$\mathbf{F}(\{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n\}, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n (\mathbf{f}(\mathbf{y}_i, \mathbf{x}))^2$$

eingeführt. Für dieses Minimierungsproblem ist $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ eine triviale Lösung. Um diese triviale Lösung auszuschließen, werden Normalisierungen für $\mathbf{f}(\mathbf{z}, \mathbf{x})$ in Form von Zwangsbedingungen aufgestellt, von denen in den nächsten Abschnitten zwei Beispiele besprochen werden.

D.1.1 Normalisierung mit $A - C = 1$

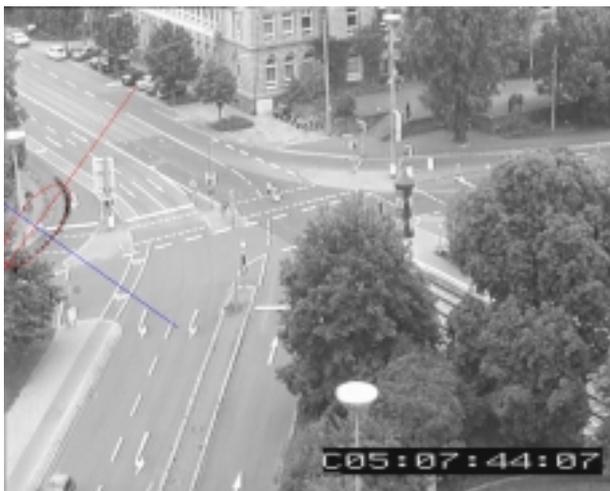
Eine einfache Form, eine Zwangsbedingung einzuführen, die zur Anpassung von Hyperbeln mittels der Methode der kleinsten Quadrate führt, erhält man durch die Zwangsbedingung $A - C = 1$. Die bei der Anpassung von Ellipsen übliche Zwangsbedingung $A + C = 1$ kann für Hyperbeln nicht verwendet werden, da rechtwinklige Hyperbeln diese Bedingung nicht erfüllen. Im vorliegenden Fall von Trajektorien treten jedoch mitunter auch Hyperbeln auf, deren Öffnungswinkel nahezu rechtwinklig sind.

Jede Hyperbel kann dann durch einen Vektor \mathbf{x} mit

$$\mathbf{x} = [A, B, D, E, F]^t$$

beschrieben werden. Das Gleichungssystem $\mathbf{f}(\mathbf{z}_i, \mathbf{x}) = 0$ bekommt dabei die Gestalt:

$$\mathbf{f}(\mathbf{z}_i, \mathbf{x}) = \mathbf{a}_i^T \mathbf{x} - b_i = 0 \quad \text{mit } \mathbf{a}_i = [x_i^2 + y_i^2, xy, x, y, 1]^T \quad b_i = y_i^2.$$



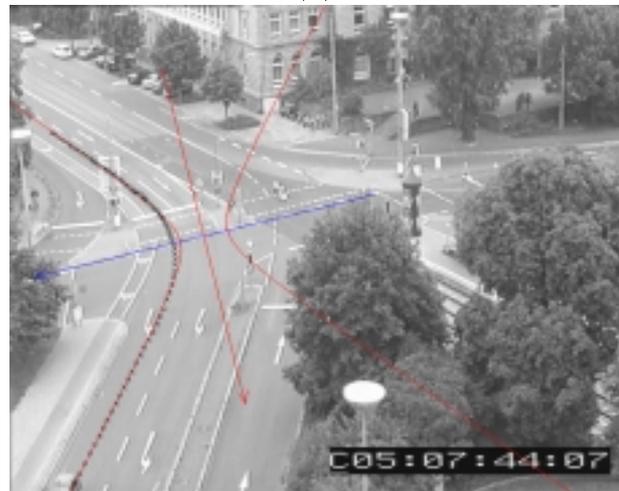
(a)



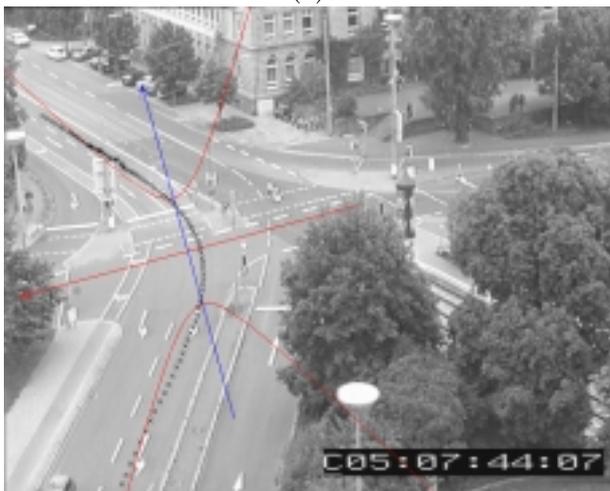
(b)



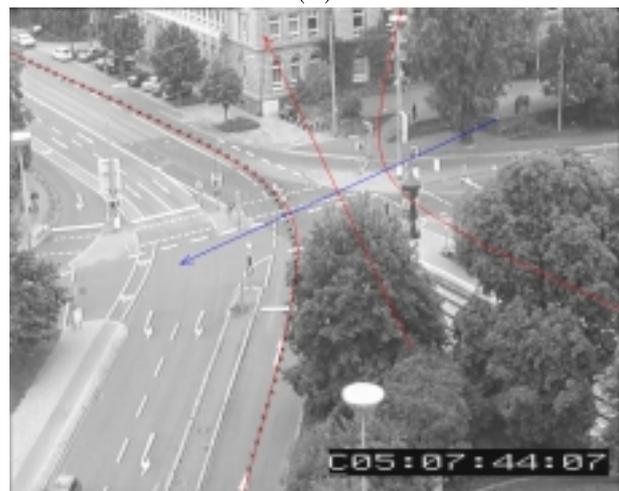
(c)



(d)



(e)



(f)

Abbildung D.1: Den Stützpunkten der Trajektorie wurden Kegelschnitte überlagert, die mit der Zwangsbedingung $A + C = 1$ bestimmt wurden. Die Anpassung einer Hyperbel in den Bildern (d) und (f) weist eine höhere Abweichung von den Stützpunkten auf als die vergleichbare Anpassung mit der Zwangsbedingung $A - C = 1$.

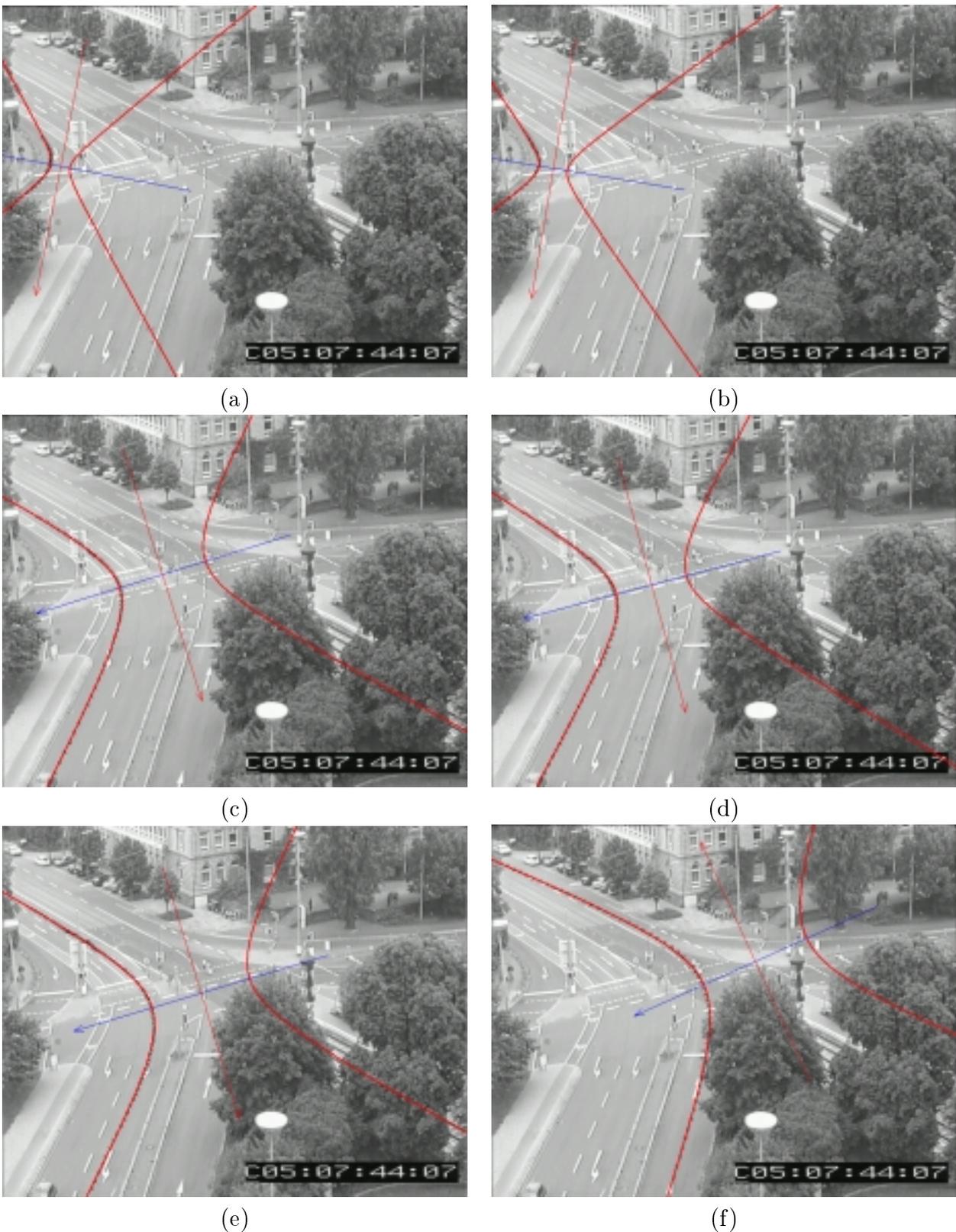


Abbildung D.2: Den Stützpunkten der Trajektorie wurde die angepasste Hyperbel überlagert. Die Hauptachsen wurden so ausgerichtet, dass mit Hilfe der Parameterform $(a \cosh t, b \sinh t)$ bei wachsendem Parameter t der Verlauf der Trajektorie beschrieben wird. Die Bestimmung der Hyperbeln erfolgte unter Verwendung der Zwangsbedingung $A - C = 1$.

Sind n Punkte \mathbf{z}_i gegeben, lässt sich das Gleichungssystem

$$\begin{aligned}\mathcal{A}\mathbf{x} &= \mathbf{b}, \\ \mathcal{A} &= [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n]^T, \\ \mathbf{b} &= [b_1, b_2, \dots, b_n]^T,\end{aligned}$$

durch die Anwendung der *Pseudoinversen* mit

$$\mathbf{x} = (\mathcal{A}^T \mathcal{A})^{-1} \mathcal{A}^T \mathbf{b}$$

lösen.

In Abbildung D.2 sind Beispiele dargestellt, bei denen Hyperbeln an Stützpunkte von Fahrzeugtrajektorien mit der oben beschriebenen Methode angepasst wurden. Abbildung D.1 zeigt Beispiele, die mit der Zwangsbedingung $A + C = 1$ berechnet wurden. Die bei diesen Beispielen erfolgreich durchgeführte Anpassung von Hyperbeln in den Bildern (d) und (f) weist dennoch eine höhere Abweichung von den vorgegebenen Stützpunkten auf als die vergleichbaren Beispiele mit der Zwangsbedingung $A - C = 1$.

Literaturverzeichnis

- [Beauvais & Lakshmanan 00] M. Beauvais and S. Lakshmanan: *CLARK: A Heterogeneous Sensor Fusion Method for Finding Lanes and Obstacles*. Image and Vision Computing **18**:5 (2000) 397–413.
- [Bennett et al. 99] N. Bennett, R. Burrige, and N. Saito: *A Method to Detect and Characterize Ellipses Using the Hough Transform*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **21**:7 (1999) 652–657.
- [Bertozzi & Broggi 98] M. Bertozzi and A. Broggi: *GOLD: A Parallel Real-Time Stereo Vision System for Generic Obstacle and Lane Detection*. IEEE Transactions on Image Processing **7**:1 (1998) 62–81.
- [Bibel et al. 93] W. Bibel, S. Hölldobler und T. Schaub: *Wissensrepräsentation und Inferenz – Eine grundlegende Einführung*. Vieweg-Verlag Braunschweig Wiesbaden 1993.
- [Bronstein & Semendjajew 91] I.N. Bronstein und K.A. Semendjajew: *Taschenbuch der Mathematik*. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart/Leipzig und Verlag Nauka Moskau 1991.
- [Buxton & Gong 95a] H. Buxton and S. Gong: *Visual Surveillance in a Dynamic and Uncertain World*. Artificial Intelligence **78** (1995) 431–459.
- [Buxton & Gong 95b] H. Buxton and S. Gong: *Advanced Visual Surveillance Using Bayesian Networks*. Proc. Workshop on Context-Based Vision, 19 June 1995, Cambridge/MA, pp. 111–122.
- [Carlsson 96] S. Carlsson: *Projectively Invariant Decomposition and Recognition of Planar Shapes*. International Journal of Computer Vision **17**:2 (1996) 193–209
- [Dance et al. 96] S. Dany, T. Caelli, and Z.-Q. Liu: *A Conceptual, Hierarchical Approach to Symbolic Dynamic Scene Interpretation*. Pattern Recognition **29**:11 (1996) 1891–1903.

- [Daniilidis 92] K. Daniilidis: *Zur Fehlerempfindlichkeit in der Ermittlung von Objektbeschreibungen und relativen Bewegungen aus monokularen Bildfolgen*. Dissertation, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), Juli 1992.
- [Dickmanns et al. 93] E.D. Dickmanns, R. Behringer, C. Brüdigam, D. Dickmanns, F. Thomanek, V. von Holt: *An All-Transputer Visual Autobahn-Autopilot/Copilot*. Proc. Fourth International Conference on Computer Vision 1993 (ICCV'93), 11–14 May 1993, Berlin/Germany, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos/CA 1993, pp. 891–896.
- [Fautz 96] M. Fautz: *Automatisiertes Anpassen eines Kreuzungsmodells an Teile von innerstädtischen Straßenkreuzungen*. Diplomarbeit, Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), April 1996.
- [Fernyhough et al. 96] J.H. Fernyhough, A.G. Cohn, and D.C. Hogg: *Generation of Semantic Regions from Image Sequences*. Proc. Fourth European Conference on Computer Vision 1996 (ECCV'96), 15–18 April 1996, Cambridge/UK; B. Buxton and R. Cipolla (Eds.), Lecture Notes in Computer Science **1065** (Vol. II), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996, pp. 475–484.
- [Fernyhough et al. 98] J.H. Fernyhough, A.G. Cohn, and D.C. Hogg: *Building Qualitative Event Models Automatically from Visual Input*. Proc. Sixth International Conference on Computer Vision 1998 (ICCV'98), 4–7 January 1998, Bombay/India, Narosa Publishing House New Delhi a. o. 1998, pp. 350–355.
- [Fernyhough et al. 00] J.H. Fernyhough, A.G. Cohn, and D.C. Hogg: *Constructing Qualitative Event Models Automatically from Video Input*. Image and Vision Computing **18**:2 (2000) 81–103.
- [Fitzgibbon et al. 99] A. Fitzgibbon, M. Pilu, and R.B. Fisher: *Direct Least Square Fitting of Ellipses*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **21**:5 (1999) 476–480.
- [Gengenbach et al. 95] V. Gengenbach, H.-H. Nagel, F. Heimes, G. Struck, and H. Kollnig: *Model-based Recognition of Intersections and Lane Structures*. Proceedings of the Intelligent Vehicle '95 Symposium, 25–26 September 1995, ISBN 0-7803-2983-X, pp. 512–517.
- [Goldbeck et al. 00] J. Goldbeck, B. Huertgen, S. Ernst, and L. Kelch: *Lane Following Combining Vision and DGPS*. Image and Vision Computing **18**:5 (2000) 425–433.

- [Guichard & Tarel 99] F. Guichard and J.Ph. Tarel: *Curve Finder Combining Perceptual Grouping and a Kalman Like Fitting*. Proc. Seventh International Conference on Computer Vision 1999 (ICCV'99), 20–27 September 1999, Kerkyra (Corfu)/Greece, pp. 1003–1008.
- [Guiducci 99] A. Guiducci: *Parametric Model of the Perspective Projection of a Road with Applications to Lane Keeping and 3D Road Reconstruction*. Computer Vision and Image Understanding **73**:3 (1999) 414–427.
- [Haag 98] M. Haag: *Bildfolgenauswertung zur Erkennung der Absichten von Verkehrsteilnehmern*. Dissertation, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), Juli 1998. Erschienen in Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz (DISKI) **193**, infix-Verlag St. Augustin 1998.
- [Hartog et al. 96] J.E. den Hartog, T.K. ten Kate, and J.J. Gerbrands: *Knowledge-Based Interpretation of Utility Maps*. Computer Vision and Image Understanding **63**:1 (1996) 105–117.
- [Heimes et al. 98] F. Heimes, H.-H. Nagel, and Th. Frank: *Model-Based Tracking of Complex Innercity Road Intersections*. Mathematical and Computer Modelling **27**:9-11 (1998) 189-203.
- [Jazwinski 70] A.H. Jazwinski: *Stochastic Processes and Filtering Theory*, Academic Press, New York, NY and London, UK 1970.
- [Kanatani 93] K. Kanatani: *Geometric Computation for Machine Vision*. Oxford Engineering Science Series **37**, Oxford University Press, Oxford/UK, New York a. o. 1993.
- [Kluge 97] K.C. Kluge: *Performance Evaluation of Vision-based Lane Sensing: Some Preliminary Tools, Metrics, and Results*. IEEE Conference on Intelligent Transportation System (ITSC'97), 9–12 November 1997, ISBN 0-7803-4269-0, pp. 723–728.
- [Kluge & Lakshmanan 95] K.C. Kluge and S. Lakshmanan: *A Deformable-Template Approach to Lane Detection*. Proceedings of the Intelligent Vehicles '95 Symposium, 25–26 September 1995, ISBN 0-7803-2983-X, pp. 54–59.
- [Koller 92] D. Koller: *Detektion, Verfolgung und Klassifikation bewegter Objekte in monokularen Bildfolgen am Beispiel von Straßenverkehrsszenen*. Dissertation, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), Juni 1992. Erschienen in Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz (DISKI) **13**, infix-Verlag St. Augustin 1992.
- [Kollnig et al. 94] H. Kollnig, H.-H. Nagel, and M. Otte: *Association of Motion Verbs with Vehicle Movements Extracted from Dense Optical Flow Fields*.

- Proc. Third European Conference on Computer Vision (ECCV'94), Stockholm, 2–6 May 1994, J.-O. Eklundh (Ed.), Lecture Notes in Computer Science **801** (Vol. II), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1994, pp. 338–347.
- [Kollnig 95] H. Kollnig: *Ermittlung von Verkehrsgeschehen durch Bildfolgenauswertung*. Dissertation, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), Februar 1995. Erschienen in Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz (DISKI) **88**, infix-Verlag St. Augustin 1995.
- [Kreucher & Lakshmanan 99] Ch. Kreucher and S. Lakshmanan: *LANA: A Lane Extraction Algorithm that Uses Frequency Domain Features*. IEEE Transactions on Robotics and Automation **15**:2 (1999) 343–350.
- [Krüger 92] W. Krüger: *Situationsmodellierung in der Bildfolgenauswertung*. KI Informatik-Fachberichte **311**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York u. a. (1992).
- [Leuck 94] H. Leuck: *Segmentierung von optischen Flussfeldern unter Verwendung eines Fahrbahnmodells zur Initialisierung einer Modellanpassung*. Studienarbeit, Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), Juli 1994.
- [Leuck 95] H. Leuck: *Verfolgung und Klassifikation von Fahrzeugen in Bildfolgen*. Diplomarbeit, Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), März 1995.
- [Li-Qun et al. 92] X. Li-Qun, D. Young, and D. Hogg: *Building a Model of a Road Junction Using Moving Vehicle Information*. Proc. Third British Machine Vision Conference (BMVC'92), 22-24 September 1992, Leeds/UK, D. Hogg (Ed.), Springer-Verlag London Berlin Heidelberg 1992, pp. 443–452.
- [Mayer et al. 93] H. Mayer, C. Heipke und G. Maderlechner: *Wissensbasierte automatische Extraktion von semantischer Information aus Katasterkarten*. In Mustererkennung 1993, 15. DAGM-Symposium, Lübeck, 27.-29. September 1993, S.J. Pöppel, H. Handels (Hrsg.), Informatik aktuell, Springer-Verlag London Berlin Heidelberg 1993, pp. 367–374.
- [Middendorf 99] M. Middendorf: *Untersuchung von Schätzprozessen in der Bildfolgenauswertung*. Diplomarbeit, Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), August 1999.

- [Mück 94] K. Mück: *Entwurf und Anpassung begrifflicher und geometrischer Modelle an Bildfolgen von innerstädtischen Straßenkreuzungen*. Diplomarbeit, Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), November 1994.
- [Mück 98] K. Mück: *Geplante Vorgehensweise bei der Erkennung von innerstädtischen Straßenkreuzungen mit Hilfe begrifflichen Wissens*. Interner Bericht, Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH) (Juli 1998).
- [Nagel & Gehrke 98a] H.-H. Nagel and A. Gehrke: *Spatiotemporal Adaptive Filtering for Estimation and Segmentation of Optical Flow Fields*. Proc. Fifth European Conference on Computer Vision (ECCV'98), 2-6 June 1998, Freiburg/Germany; H. Burkhardt and B. Neumann (Eds.), Lecture Notes in Computer Science **1407** (Vol II). Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998, pp. 86–102.
- [Nagel & Gehrke 98b] H.-H. Nagel and A. Gehrke: *Bildbereichsbasierte Verfolgung von Straßenfahrzeugen durch adaptive Schätzung und Segmentierung von Optischen-Fluß-Feldern*. In Mustererkennung 1998, 20. DAGM-Symposium, Stuttgart, 29. September–1. Oktober 1998, P. Levi, R.-J. Ahlers, F. May und M. Schwanz (Hrsg.), Informatik aktuell, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1998, pp. 314–321.
- [Osswald 94] T.H. Osswald: *Anpassung generischer Modelle innerstädtischer Straßenkreuzungen an Bildfolgen*. Fakultät für Elektrotechnik der Universität Karlsruhe (TH), durchgeführt am Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), April 1994.
- [Pilu et al. 96] M. Pilu, A. Fitzgibbon, R. Fisher: *Ellipse-Specific Direct Least-Square Fitting*. Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing ICIP'96, Lausanne, Switzerland, 16-19 September 1996, P. Delogne (Ed.), IEEE Computer Society Press, Los Alamitos/CA 1996, Vol. III, pp. 599-602.
- [Porrill 90] J. Porrill: *Fitting Ellipses and Predicting Confidence Envelopes Using a Bias Corrected Kalman Filter*. Image and Vision Computing **8** (1990) 37–41
- [RAST-E 71] *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RAST), Teil: Erschließung (RAST-E)*. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V., Arbeitsgruppe Planung und Verkehr — Stadtstraßen, Kirschbaum Verlag Bonn – Bad Godesberg 1971.
- [RAST-K 73] *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RAST), Teil: Knotenpunkte (RAST-K)*. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V.,

- Arbeitsgruppe Planung und Verkehr — Stadtstraßen, Kirschbaum Verlag Bonn – Bad Godesberg 1973.
- [RAST-L 73] *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RAST), Teil: Linieneinführung (RAST-L)*. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V., Arbeitsgruppe Planung und Verkehr — Stadtstraßen, Kirschbaum Verlag Bonn – Bad Godesberg 1973.
- [RAST-Q 68] *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RAST), Teil: Querschnittsgestaltung (RAST-Q)*. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V., Arbeitsgruppe Planung und Verkehr — Stadtstraßen, Kirschbaum Verlag Bonn – Bad Godesberg 1968.
- [RMS 80] *Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS), Teil 1: Abmessung und geometrische Anordnung von Markierungszeichen (RMS-1), Teil 2: Anwendung von Fahrbahnmarkierungen (RMS-2)*. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V., Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, Kirschbaum Verlag Bonn – Bad Godesberg 1980.
- [Rosin 99] P.L. Rosin: *Further Five-Point Fit Ellipse Fitting*. Graphical Models and Image Processing **61** (1999) 245–259.
- [Schäfer 96] K.H. Schäfer: *Unschärfe zeitlogische Modellierung von Situationen und Handlungen in Bildfolgenauswertung und Robotik*. Dissertation, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), Juli 1996. Erschienen in Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz (DISKI) **135**, infix-Verlag St. Augustin 1996.
- [Sung 88] C.G. Sung: *Extraktion von typischen und komplexen Vorgängen aus einer längeren Bildfolge einer Verkehrsszene*. In Mustererkennung 1988, 10. DAGM-Symposium, Zürich, 27.-29. September 1988, H. Bunke, O. Kübler, P. Stucki (Hrsg.), Informatik-Fachberichte **180**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1988, pp. 90–96.
- [Tonko 97] M. Tonko: *Zur sichtsystemgestützten Demontage von Altfahrzeugen*. Dissertation, Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe (TH), Juni 1997. Erschienen in Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz (DISKI) **166**, infix-Verlag St. Augustin 1997.
- [Werman & Geyzel 95] M. Werman and Z. Geyzel: *Fitting a Second Degree Curve in the Presence of Error*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **17:2** (1995) 207–211.
- [Zhang 97] Z. Zhang: *Parameter Estimation Techniques: A Tutorial with Application to Conic Fitting*. Image and Vision Computing **15:1** (1997) 59–76.

- [Zhu 99] Q. Zhu: *On the Geometrics of Conic Section Representation of Noisy Object Boundaries*. *Journal of Visual Communication and Image Representation* **10:2** (1999) 130–154.
- [Zhu & Peng 99] Q. Zhu and L. Peng: *A New Approach to Conic Section Approximation of Object Boundaries*. *Image and Vision Computing* **17:9** (1999) 645–658.
- [Zhu et al. 00] Z. Zhu, G. Xu, B. Yang, D. Shi, and X. Lin: *VISATRAM: A Real-time Vision System for Automatic Traffic Monitoring*. *Image and Vision Computing* **18:10** (2000) 781–794.