Universität Stuttgart
Fakultät Informatik

Studiengang :	Softwaretechnik
Prüfer :	Prof. Dr. rer. nat. habil. Paul Levi
1. Firmenbetreuer :	Dipl.-Inf. Axel Gern
2. Firmenbetreuer :	Dipl.-Inf. Michael Smuda von Trzebiatowski
3. Firmenbetreuer :	Dr. Carsten Knöppel
Beginn :	01. April 2003
Ende :	30. September 2003
CR-Klassifikation:	I.2.9, I.2.10, I.4.8

Diplomarbeit-Nr. 2073

Erkennung und Verfolgung von Leitpfosten zur Spurprädiktion

Uwe-Philipp Käppeler

Durchgeführt bei der DaimlerChrysler AG
Forschungsbereich RIC/AP, Esslingen

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in der Forschungsabteilung RIC/AP der DaimlerChrysler AG in Esslingen sowie am Institut für Informatik der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Paul Levi, der mir die Durchführung der Diplomarbeit ermöglicht und mich während der Arbeit betreut hat.

Mein herzlicher Dank richtet sich an die Mitarbeiter und Studenten der Abteilung RIC/AP, besonders an meine Betreuer Michael Smuda von Trzebiatowski und Axel Gern sowie an Carsten Knöppel, Uwe Franke, Stefan Gehrig und Hernán Badino für ihre Unterstützung, eingebrachte Ideen und Anregungen.

Kurzfassung

In der DaimlerChrysler Forschung gibt es ein System zur optischen Spurerkennung, das sich ausschließlich an Fahrbahnmarkierungen orientiert. In dieser Arbeit wurde eine neue Spurerkennung entwickelt, die nur auf Positionen von Leitpfosten basiert. Dazu wurden verschiedene Bildverarbeitungsverfahren auf ihre Eignung zur Detektion der Leitpfosten in Kamerabildern und zu deren Verfolgung in Bildsequenzen untersucht. Für die Spurprädiktion wurde ein neues Straßenmodell entwickelt. Dieses ist aus dem Modell einer ebenen Straße der bereits vorhandenen Spurerkennung abgeleitet, um eine Fusion der Systeme zu ermöglichen. Die neue Spurprädiktion, die sich an dreidimensionalen Leitpfostenpositionen orientiert, berücksichtigt zusätzlich Steigungen und Gefälle von Straßen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung **1**

1.1 Motivation 1

1.2 Aufgabenstellung 2

1.3 Gliederung der Arbeit 3

2 Konzept zur Leitpfostenerkennung **4**

2.1 Eigenschaften von Leitpfosten 6

2.2 Bildverarbeitungsverfahren zur Detektion 7

2.3 Tiefenberechnung in Stereobildern 8

2.3.1 Prozess der Tiefenberechnung 8

2.3.2 Einschränkungen 9

2.3.3 Matching Verfahren 10

2.3.4 Sub Pixel Estimation 11

2.4 Das spurerkennende System 12

2.4.1 Parameter der optischen Spurerkennung 12

2.4.2 Modell der Straße und des Fahrzeugs 14

3 Leitpfostenerkennung mittels Bildverarbeitung **15**

3.1 Matched Filter 16

3.1.1 Herleitung der Suchvektoren 16
3.1.2 Suchvektoren verschiedener Größen 18
3.1.3 Vorteile 19
3.1.4 Nachteile 20
3.1.5 Erweiterungen des Verfahrens 21
3.1.6 Anwendung 22
3.2 Kantenverkettung 24
3.2.1 Kantenoperator 24
3.2.2 Verdünnung und Binarisierung 25
3.2.3 Punktverkettung 26
3.2.4 Kantenverkettung 27
3.2.5 Vorteile 27
3.2.6 Nachteile 27
3.2.7 Hough-Transformation 28
3.2.8 Anwendung 28
3.3 Integralsuche 30
3.3.1 Kantendetektion 31
3.3.2 Vertikale Integration 31
3.3.3 Symmetrie 32
3.3.4 Bestimmung der horizontalen Position und der Breite 32
3.3.5 Bestimmung der vertikalen Position und der Höhe 32
3.3.6 Vorteile 33
3.3.7 Nachteile 33
3.3.8 Mehrfache und einfache Integralsuche 34
3.4 Vergleich der Verfahren 35

3.5 Receiver Operator Characteristic Curves 35
3.5.1 Einstellen der Parameter der Leitpfostendetektion 36
3.5.2 Ergebnisse für die Parameter der Verfahren 38
3.6 Geometrien bei der Detektion 44
3.6.1 Suchbereich 44
3.6.2 Plausibilität 44
3.7 Kombinationen von Verfahren 45

4 Prozeduren der Leitpfostendetektion auf Bildsequenzen 47
4.1 Auswahl der Bildverarbeitungsverfahren 48
4.1.1 Bildverarbeitung der Initialerkennung 48
4.1.2 Bildverarbeitung des Trackings 49
4.2 Ablauf von Initialerkennung und Tracking 49
4.2.1 Tracking 51
4.2.2 Haltbarkeits-Schwellwert des Verfolgers 52
4.2.3 Initialerkennung ohne Tracking 54
4.2.4 Initialerkennung 54
4.3 Ergebnis 54

5 Auswertungen über erkannte Leitpfosten 55
5.1 Auswertungen verfolgter Leitpfosten 56
5.2 Bestimmung von Geschwindigkeit, Gierrate und zurückgelegter Strecke 56
5.2.1 Modell der Landmarkennavigation 56
5.2.2 Bestimmung der zurückgelegten Strecke 57
5.2.3 Inertialsensorik 58
5.2.4 Fusion von Inertialsensorik und Landmarkennavigation 60

5.2.5 Fusion zur redundanten Eigenpositionsbestimmung 63
5.3 Spurprädiktion 63
5.3.1 Straßenmodell mit Krümmungsänderung 64
5.3.2 Entwurf einer vereinfachten Spurprädiktion 65
5.3.3 Spurprädiktion und Falschalarm der Detektion 66
5.4 Dreidimensionales Modell der Straße 68

6 Experimentelle Ergebnisse 70
6.1 Spurprädiktion 71
6.1.1 Straßenkrümmung 71
6.1.2 Dreidimensionaler Straßenverlauf 73
6.1.3 Echtzeitfähigkeit des Systems 80

7 Zusammenfassung und Ausblick 81

A Die monokulare Kamera 84
A.1 Abbildungsfunktion der Kamera 84
A.2 Tiefenberechnung eines Punktes auf der Straßenebene 85
A.3 Tiefenberechnung eines Punktes mit bekannter Höhe über der Straßenebene . . . 87
A.4 Berechnung der Höhe eines Punktes über der Straßenebene 87

B Hinweise für das Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen 88

C Kalmanfilter zur Spurprädiktion 96
C.1 Kalmanfilter der optischen Spurerkennung 96
C.2 Herleitung des Kalmanfilter mit vier Freiheitsgraden 97

Kapitel 1

Einführung

1.1 Motivation

Der Wunsch nach gesteigerter Mobilität in der Bevölkerung führte in den letzten Jahrzehnten zu einer deutlichen Zunahme der Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen [Bundesamt 2003a] und damit zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen auf deutschen Straßen. Die Fahrer werden durch immer dichteren Verkehr zunehmend beansprucht und die Zahl der Unfälle nimmt zu [Bundesamt 2003b].
Um die Folgen von Unfällen oder Unfälle selbst zu reduzieren wurden Sicherheitssysteme wie der Airbag, ABS oder ESP entwickelt, welche heute in vielen Fahrzeugen bereits zur Standardausstattung gehören.

In den letzten Jahren wurden intelligente Fahrerassistenzsysteme entwickelt, die den Fahrer bei seiner Aufgabe unterstützen und Unfälle vermeiden. Diese Systeme können den Fahrer von ermüdenden Tätigkeiten entlasten, wie zum Beispiel die heute bereits erhältliche Distronic, ein Tempomat, der den Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhält.
Andere Systeme warnen den Fahrer bei aufkommenden Gefahren. So zum Beispiel die Lane-Departure-Warning, die im LKW Mercedes Actros als Sonderausstattung erhältlich ist. Dieses System warnt den Fahrer akustisch beim ungewollten Verlassen der Fahrspur.

Fortschritte in der Technik ermöglichen es, dass Fahrerassistenzsysteme entwickelt werden, deren Leistungsfähigkeit zunehmend ausgebaut wird. In Zukunft wird im Fahrzeug immer mehr Sensorik eingebaut werden, die den Verkehr beobachtet und passiv oder aktiv eingreift und den Fahrer unterstützt. Mit Fahrerassistenzsystemen verfolgt die DaimlerChrysler Forschung die „Vision vom unfallfreien Fahren“ [DCAG 2001]. Allen diesen Systemen gemein ist die zentrale Aufgabe der zuverlässigen Erkennung der Fahrspur und der Umgebung.

Dazu gibt es Ansätze die Straßen so zu verändern, dass Maschinen sie leicht erkennen können oder die maschinelle Straßenerkennung so zu gestalten, dass sie mit der bereits vorhandenen Infrastruktur auskommt. Es gibt Untersuchungen mit Fahrzeugen, die Magnetnägeln in der Fahrbahnmitte gefolgt sind. Dieses Verfahren ist sehr robust. Ein Nachteil daran ist der hohe Aufwand für das Anbringen und Warten der Nägel auf den Straßen [Moravec 1998].

Die Abteilung RIC/AP der DaimlerChrysler Forschung arbeitet seit vielen Jahren an der „Optischen Spurerkennung“, die auf der Erkennung von vorhandenen Fahrspurmarkierungen basiert und ohne eine Erweiterung der bestehenden Straßen auskommt. In Verbindung mit einem Regler zur Fahrzeugquerführung ist es damit möglich, ein Fahrzeug bei guter Sicht auf Autobahnen mit Geschwindigkeiten bis zu 180 km/h autonom fahren zu lassen.
Auf Landstraßen ist mit dem bestehenden System keine robuste Spurerkennung möglich. In den nächsten Jahren soll dieses Spurerkennungssystem für den Einsatz auf Landstraßen ausgebaut werden [Trzebiatowski 2003a].

Auf Landstraßen sind meist Leitpfosten in regelmäßigen Abständen links und rechts der Fahrbahn zur Orientierung aufgestellt. Fahrer konzentrieren sich bei schlechten Sichtbedingungen wie Nebel, Regen, Schnee oder bei Nacht auf die Leitpfosten um den Straßenverlauf zu erkennen. So liegt es nahe, dass sich auch die maschinelle Fahrspurerkennung an den Leitpfosten orientiert.

Als erste Arbeit auf dem Gebiet „Spurerkennung im Landstraßenszenario“ in der Abteilung RIC/AP soll ein System entstehen, dass parallel zur Spurerkennung nach [Trzebiatowski 2003a] Leitpfosten am Straßenrand erkennt und mit deren Hilfe den Straßenverlauf schätzt.
Durch die Verwendung von GPS und digitalen Karten werden ortsfeste Koordinatensysteme ermöglicht. Hierfür ist es wünschenswert, die Eigenbewegung zur genauen Positionsbestimmung innerhalb der Karte zu kennen. Die Leitpfostenerkennung kann die Bestimmung der eigenen Bewegung mittels Landmarken stützen.

1.2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, die in den Versuchsträgern der Abteilung RIC/AP zur Verfügung stehende Sensorik auf ihre Eignung zur Leitpfostenerkennung zu untersuchen. Zum Einsatz kommen dabei eine Monokamera oder Stereokameras. Beispiele für Bilder der Kameras, die zur Leitpfostendetektion verwendet werden sollen, sind in Abbildung 1.1 und 1.2 zu sehen. Es sind Verfahren zu entwickeln, die das zuverlässige Finden und Lokalisieren von Leitpfosten im Einzelbild und in Bildsequenzen ermöglichen.

Abbildung 1.1: Leitpfosten im Kamerabild bei einer Autobahnfahrt unter schlechten Sichtbedingungen

Abbildung 1.2: Leitpfosten im kontrastreichen Kamerabild bei einer Landstraßenfahrt unter guten Sichtbedingungen

Es ist ein Modell der Straße zu generieren, das mit Hilfe von erkannten Leitpfosten eine Spurverlaufsschätzung auf Landstraßen ermöglicht. Die entwickelten Algorithmen sollen sowohl an aufgezeichneten Sequenzen als auch im Versuchsfahrzeug erprobt und verifiziert werden. Als Programmiersprache kommt C++ auf einer UNIX-Workstation (Pentium III unter Linux) zum Einsatz.

1.3 Gliederung der Arbeit

Im Anschluss an die Einleitung wird in Kapitel 2 das Konzept der Leitpfostenerkennung erläutert. Es wird die bereits vorhandene Spurerkennung, die in dieser Arbeit verwendete Sensorik und eine Auswahl an Verfahren der Bildverarbeitung vorgestellt. Des Weiteren wird die Entfernungsmessung mit Stereokameras beschrieben.

Im 3. Kapitel wird beschrieben, wie die verschiedenen Verfahren der Bildverarbeitung zur Erkennung von Leitpfosten in Einzelbildern verwendet werden und welche Eigenschaften diese Verfahren jeweils im Bezug auf die Leitpfostenerkennung haben. In Kapitel 4 wird ein System zur Verfolgung der Leitpfosten in Bildsequenzen vorgestellt.

Im 5. Kapitel wird gezeigt, welche Informationen sich über die Straße und das Fahrzeug aus den erkannten Leitpfosten gewinnen lassen und wie die Leitpfostenerkennung mit anderen Systemen fusioniert werden kann.

In Kapitel 6 werden dann die Ergebnisse des entwickelten Systems vorgestellt. Die Arbeit wird mit einem Ausblick auf weitere Entwicklungen und einer kurzen Zusammenfassung abgeschlossen.

Kapitel 2

Konzept zur Leitpfostenerkennung

In diesem Kapitel wird ein Ansatz zur Spurprädiktion durch die Erkennung von Leitpfosten dargestellt. Über die in einem Versuchsträger vorhandene Monokamera oder Stereokamera werden Leitpfosten in der Umgebung des Fahrzeugs erkannt. Aus einer Fusion der Leitpfostenerkennung mit der Inertialsensorik werden Informationen über das Fahrzeug selbst und dessen Umgebung gewonnen. Das Konzept wird in Abbildung 2.1 verdeutlicht: Die Erkennung der Leitpfosten erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden die Positionen von Leitpfosten im Kamerabild mittels Bildverarbeitung bestimmt. Für die Bildverarbeitung werden in dieser Arbeit drei Verfahren auf ihre Tauglichkeit zur Leitpfostendetektion untersucht.
Anschließend werden die Positionen der detektierten Leitpfosten in der Welt berechnet. Zur Entfernungsbestimmung der Leitpfosten werden zwei Verfahren eingesetzt. Ist im Versuchsträger eine Stereokamera verfügbar, so werden die Entfernungen der Leitpfosten über ein Korrelationsverfahren bestimmt, auf das in Kapitel 2.3 eingegangen wird. Ist im Versuchsträger jedoch nur eine Monokamera vorhanden, werden die Entfernungen anhand der Bildpositionen berechnet.
Die ermittelten Leitpfostenpositionen in der Welt werden zusammen mit Messungen der Inertialsensorik des Fahrzeugs ausgewertet. Informationen über das Fahrzeug selbst und über die Straße werden mittels Landmarkennavigation, einer Spurprädiktion einer ebenen Straße und einem dreidimensionalen Straßenmodell, das um Messungen der Höhen der Straße erweitert wird, gewonnen.

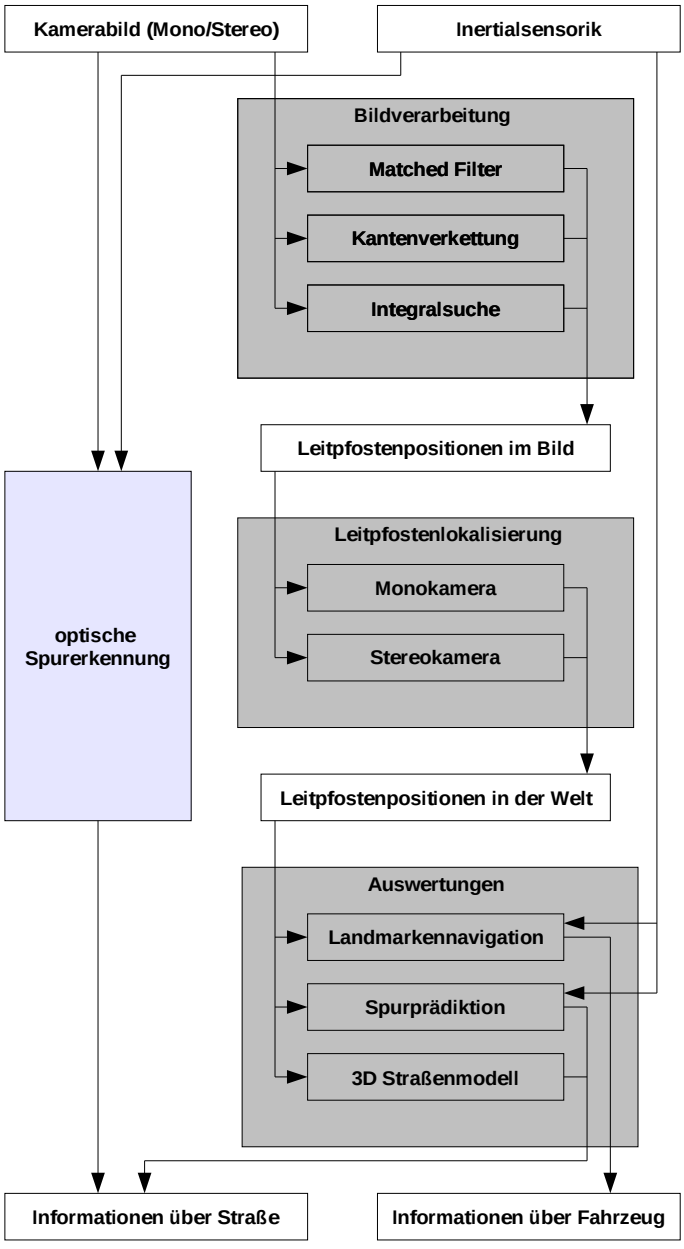


Abbildung 2.1: Konzept zur Spurprädiktion durch die Leitpfostenerkennung

Die Parameter der einzelnen Bildverarbeitungsverfahren werden mittels Receiver Operator Characteristik Curves evaluiert. Anschließend werden die Erkennungsraten der Verfahren miteinander verglichen um eine zur Detektion geeignete Vorgehensweise auszuwählen.

2.1 Eigenschaften von Leitpfosten

Form und Farbe eines jeden Leitpfostens auf deutschen Straßen sind genau festgelegt. Die exakten Abmessungen eines Leitpfostens können den „Hinweisen für das Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen“ [Giesa 1999] entnommen werden. Auszüge aus dem Kapitel 8 dieser Hinweise über „senkrechte Leit- und Schutzeinrichtungen“ befinden sich in Anhang B dieser Diplomarbeit. Es wird dort unter anderem erklärt, wie die weißen und schwarzen Flächen auf den Leitpfosten angeordnet sind und wie die auf der schwarzen Fläche angebrachten Reflektoren auszusehen haben. Des weiteren werden Position und Abstand der Leitpfosten für die Anbringung am Straßenrand genau festgelegt. Die wichtigsten Maße der Leitpfosten sind in Abbildung 2.2 zu sehen.

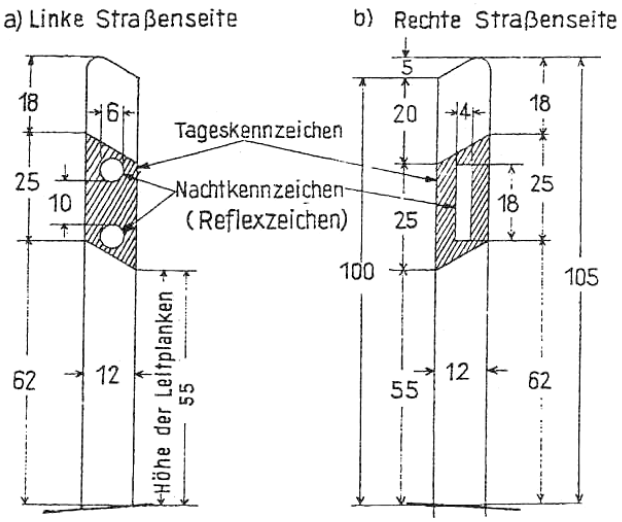


Abbildung 2.2: Abmessungen der Leitpfosten

Zwei Beispiele für Leitpfosten in Kamerabildern sind in Abbildung 2.3 zu sehen. Leitpfosten können freistehend oder auf Leitplanken angebracht sein. Ist ein Leitpfosten auf einer Leitplanke angebracht, so fehlt dessen untere Hälfte, wie in Abbildung 2.3 links zu sehen ist. Der obere Teil jedes Leitpfostens, der noch eine kleine weiße Fläche unter der schwarzen aufweist, ist bei allen Leitpfostentypen identisch. Abbildung 2.3 rechts zeigt im Ausschnitt eines Kamerabildes einen komplett sichtbaren Leitpfosten vor dunklem Hintergrund.

Um die Verkehrsszene von einem Auto aus in Stereobildern zu erfassen kommen im Versuchsträger zwei Kameras zum Einsatz. Wie in Anhang A.1 hergeleitet, ist es möglich über die Eigenschaften der Kamera die Abbildung eines Leitpfostens im Bild zu berechnen. Seitenverhältnisse können ermittelt werden und anhand des Abstandes der Kamera zum Leitpfosten kann auch die Größe seiner Abbildung in Bildpunkten berechnet werden, oder umgekehrt über die Abmessungen im Bild Rückschlüsse auf die Entfernung gezogen werden.

Abbildung 2.3: Leitpfosten in Kamerabildern

2.2 Bildverarbeitungsverfahren zur Detektion

Den Eigenschaften der Leitpfosten entsprechend werden verschiedene Bildverarbeitungsverfahren vorgestellt, deren Tauglichkeit zur Detektion der Leitpfosten in dieser Arbeit untersucht wird.

Die immer vorhandenen oberen Hälften der Leitpfosten auf allen Straßen in Deutschland sehen identisch aus. Damit ist ein mögliches Bildverarbeitungsverfahren zur Detektion der Leitpfosten das Matched Filter, das Übereinstimmungen einer vorgegebenen Suchmatrix im Kamerabild sucht. Zur Detektion werden die weißen und schwarzen Flächen eines Leitpfostens in der Suchmatrix abgebildet.

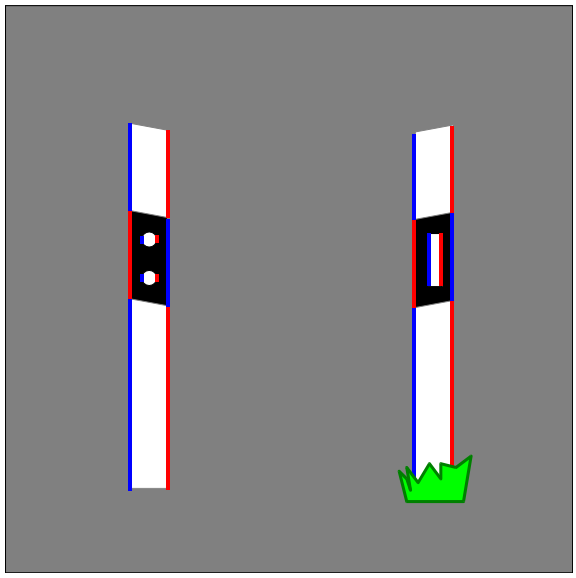


Abbildung 2.4: Vertikale Kanten in idealisierten Abbildungen der Leitpfosten: Aufwärtskanten sind blau eingezeichnet, Abwärtskanten rot

Mit dem Verfahren der Kantenverkettung wird die Detektion der Leitpfosten anhand ihrer Kanten im Kamerabild untersucht.
In den Versuchsträgern sind die Kameras hinter der Windschutzscheibe angebracht. So ist ihr Brennpunkt auf Grund der Bauweise der Fahrzeuge grundsätzlich höher als einen Meter über der Straßenoberfläche und damit auch höher als es die oberen Enden der Leitpfosten über der Straße sind, wodurch die Leitpfosten im Kamerabild auf ebener Straße unterhalb des Horizonts zu sehen sind . Sie überdecken somit einen Untergrund der Umgebung der Straße, von dem sich die weißen Flächen des Leitpfostens hell abheben. Damit treten an den Leitpfosten im Kamerabild die in Abbildung 2.4 dargestellten typischen vertikalen Auf- und Abwärtskanten auf.

Ebenfalls typisch für Leitpfosten im Kamerabild sind die sehr hellen vertikal länglichen Flächen. Diese repräsentieren die weißen Flächen der aufrecht stehenden Leitpfosten.
Mit dem Verfahren der Integralsuche wird die Leitpfostendetektion anhand dieser weißen Flächen untersucht. Das Verfahren beruht auf vertikaler und horizontaler Integration des Kamerabildes.

2.3 Tiefenberechnung in Stereobildern

Wie zu Beginn von Kapitel 2 bereits beschrieben, wird eine Stereokamera zur Entfernungsbestimmung der Leitpfosten eingesetzt, sofern diese verfügbar ist.
In [Badino 2003] werden verschiedene Verfahren der Tiefenberechnung in Stereobildern miteinander verglichen. Eine kurze Einführung in die Thematik wird in diesem Kapitel gegeben, die sich an [Badino 2003] orientiert.

2.3.1 Prozess der Tiefenberechnung

Um 3D Informationen der Umgebung zu gewinnen werden von zwei Kameras synchron Bilder aufgezeichnet. Dabei müssen sich die Positionen oder Orientierungen der beiden Kameras unterscheiden und Objekte, deren Entfernung berechnet wird, in beiden Bildern vorhanden sein.

Im Idealfall sind die beiden Kameras horizontal versetzt und haben die gleiche Orientierung, Epipolargeometrie genannt. Dies führt dazu, dass ein Bildpunkt eines Objektes in beiden Kamerabildern in der gleichen Zeile zu finden ist und die Suche dieses Bildpunktes im Referenzbild von einem zweidimensionalen auf ein eindimensionales Problem reduziert wird. Um dies zu erreichen müssen die Kameras sehr genau montiert werden, was in der Praxis zum Beispiel auf mobilen Robotern bei Erschütterungen der Kameras nicht immer durchführbar ist. Um kleine Abweichungen der Kameraorientierungen und die Verzeichnungen der verschiedenen Linsen der beiden Kameras auszugleichen müssen die beiden Kamerabilder rektifiziert werden. Für weitere Betrachtungen wird von horizontal versetzt angeordneten Kameras gleicher Orientierung und rektifizierten Bildern ausgegangen.

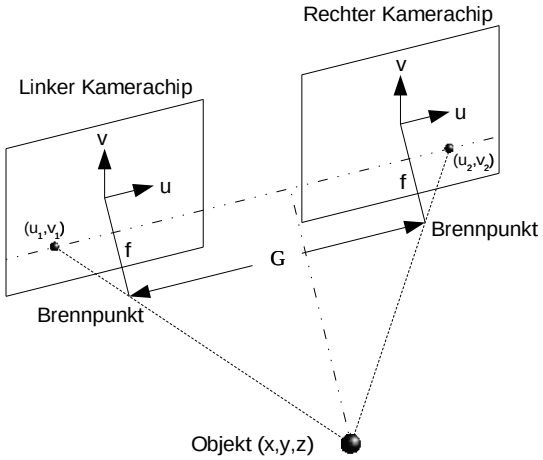


Abbildung 2.5: Kameraanordnung für Stereobildpaare

Die Hauptaufgabe bei der Tiefenberechnung ist das Auffinden von Korrespondenzen in den beiden Bildern. Für jeden „Point of Interest“ im einen Bild, genannt „Referenzbild“, muss ein passender Punkt im anderen Bild, genannt „Suchbild“, gefunden werden. Der horizontale Abstand dieser beiden Punkte wird Disparität genannt (siehe Abbildung 2.5).
Ist die Disparität $d = u_1 - u_2$ bekannt, kann mit Gleichungen (2.1) bis (2.3) ein Objekt des entsprechenden Bildpunktes lokalisiert werden.

$$z = G\frac{f}{d} \tag{2.1}$$

$$x = \frac{G}{2z}(u_1 + u_2) \tag{2.2}$$

$$y = \frac{G}{z}v_1 = \frac{G}{z}v_2 \tag{2.3}$$

Hierbei ist G der Abstand der Brennpunkte der beiden Kameralinsen genannt Grundlinie (Baseline) und f ist die Brennweite der Kameras.

2.3.2 Einschränkungen

Neben der Bedingung, dass ein Suchbildpunkt in derselben Zeile auftreten muss wie sein Referenzbildpunkt, gibt es noch weitere Bedingungen, deren Erfüllung für die Tiefenberechnung in Stereobildern vorausgesetzt werden.

- **Eindeutigkeit**
  Die Abbildung von einem Referenzpunkt zu einem Suchpunkt muss bijektiv sein. Das heißt: Zu einem Referenzpunkt gibt es immer genau einen passenden Suchpunkt und umgekehrt. In diskretisierten digitalen Bildern ist dies nicht immer gegeben. [Marr et al. 1976]

- **Geometrie**
  Die Korrespondenz eines Bildpunktes im linken Bild muss links der Originalposition im rechten Bild zu finden sein und umgekehrt: Die Korrespondenz eines Bildpunktes im rechten Bild muss rechts der Originalposition im linken Bild zu finden sein. Dies ist der Fall, wenn die Kameras horizontal versetzt angeordnet und ihre optischen Achsen parallel sind beziehungsweise die Bilder rektifiziert wurden.

- **Ordnung**
  Eine links–rechts Reihenfolge von Punkten oder Objekten in einem Bild muss auch im anderen Bild des Stereobildpaares eine links–rechts Reihenfolge bilden.
  Bei dünnen Objekten, die den Kameras sehr nahe sind, ist die Reihenfolge nicht eingehalten (Abbildung 2.6). In vielen Anwendungsgebieten kann dieser spezielle Fall jedoch ausgeschlossen werden.

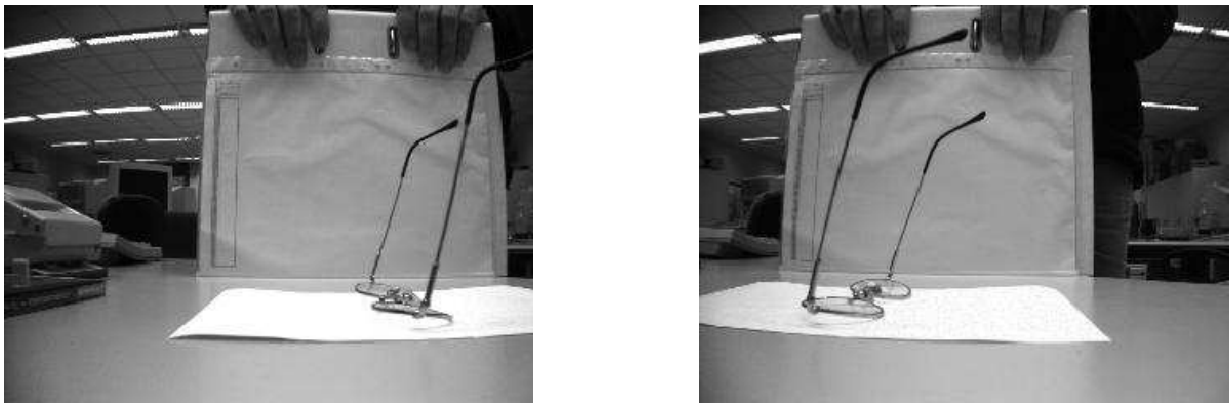


Abbildung 2.6: Verstoß gegen die Objektreihenfolge in Stereobildern aus [Badino 2003]

2.3.3 Matching Verfahren

Um zu einem Punkt im Referenzbild die passende Korrespondenz zu finden gibt es verschiedene Korrelationsfunktionen. Mit diesen wird der Punkt im Suchbild ermittelt, der mit seiner Umgebung am besten zum Referenzpunkt und dessen Umgebung passt. Es wird also der Punkt gesucht, dessen Umgebung sich von der des Referenzpunktes am wenigsten unterscheidet beziehungsweise die Differenz der entsprechenden Bildpunkte der beiden Umgebungen minimal sind. Eine Korrelationsfunktion bildet die Differenzen der Bildpunktumgebungen auf einen Wert, den

Korrelationskoeffizienten, ab. Das Minimum der Korrelationskoeffizienten gehört zum Korrespondenzpunkt im Suchbild des Originalpunktes im Referenzbild.

[Badino 2003] zählt Quellen auf, die verschiedene Korrelationsfunktionen miteinander verglichen haben. Im Bezug auf die Anwendung im Straßenverkehr kommt er zu dem Ergebnis, dass die einfachen und schnell zu berechnenden „sum of absolute differences“ (SAD) und „sum of square differences“ (SSD) Funktionen sehr gute Ergebnisse liefern, sofern im linken und im rechten Bild gleiche Lichtverhältnisse herrschen.

Bei Stereobildern, die aus Fahrzeugen heraus mit Kameras in einem Abstand von unter einem Meter aufgenommen werden, können nahezu identische Lichtverhältnisse in Bildpaaren angenommen werden. Die Sonne als Lichtquelle im Straßenverkehr, die sehr weit von beiden Kameras entfernt ist, liefert in beiden Bildern identische Objektbeleuchtungen und Schatten.
Für die Berechnung der Entfernung von „Points of Interest“ wird in den Versuchsträgern die SSD Korrelationsfunktion verwendet. Die Gleichungen, Eigenschaften und Testresultate von neun weiteren Korrelationsfunktionen können in [Badino 2003] betrachtet werden.

2.3.4 Sub Pixel Estimation

Die Berechnung von ganzzahligen Disparitäten in diskreten Stereobildern führt bei der Tiefenberechnung mit Gleichung (2.1) zu Flächen gleicher Entfernungen, die orthogonal zur optischen Achse der Kameras sind.
Über die subpixelgenaue Disparität lassen sich die Entfernungen in diskretisierten Stereobildern genauer und ohne Sprünge durch eine ganzzahlige Disparität berechnen.

Eine subpixelgenaue Disparität lässt sich berechnen, indem durch die Korrelationskoeffizienten des Korrespondenzpunktes und seiner beiden Nachbarn ein Polynom zweiten Grades berechnet wird (Abbildung 2.7). Die subpixelgenaue Disparität befindet sich im Minimum der Parabel durch die Koeffizienten.

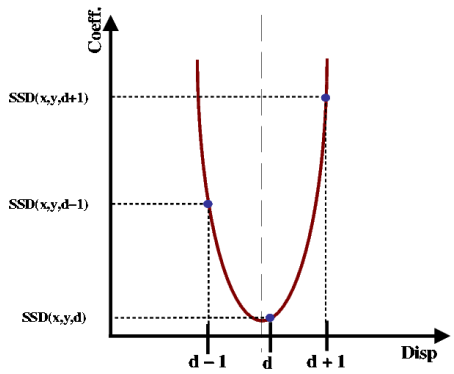


Abbildung 2.7: Subpixelgenaue Disparität aus [Badino 2003]

Gleichungen (2.4) bis (2.6) zeigen die Berechnung der subpixelgenauen Disparität $SPE(x, y, d)$ für den Referenzpunkt (x, y) mit der ganzzahligen Disparität d, wobei a und b die Koeffizienten des Polynoms zweiten Grades der Gleichung $f(x) = ax^2 + bx + c$ sind. $C_{x,y}$ sind die Korrelationskoeffizienten der Bildpunkte im Suchbild zum Bildpunkt $P_i(x, y)$ des Referenzbildes [Badino 2003].

$$a = \frac{C_{x,y}(d+1) + C_{x,y}(d-1)}{2} - C_{x,y}(d) \tag{2.4}$$

$$b = \frac{C_{x,y}(d+1) + C_{x,y}(d-1)}{2} \tag{2.5}$$

$$SPE(x, y, d) = d + \frac{-b}{2a} \tag{2.6}$$

2.4 Das spurerkennende System

In diesem Kapitel wird die bestehende optische Spurerkennung vorgestellt. Es werden die Parameter der optischen Spurerkennung für die Straße und das Fahrzeug beschrieben. Diese werden für die Leitpfostenerkennung übernommen, um die Modelle und Messungen der beiden voneinander unabhängigen Spurprädiktionen fusionieren zu können.

In Anlehnung an die Arbeiten von [Dickmanns et al. 1986] wurde durch [Franke 1992] die optische Spurerkennung vorgestellt. Das System wurde in mehreren Fahrzeugen eingesetzt. Insgesamt wurden mit dem System Untersuchungen auf mehreren tausend Kilometern Fahrt zum Beispiel in den Fahrzeugen VITA [Ulmer 1992], VITA II [Ulmer 1994] und OSCAR [Franke et al. 1994] durchgeführt. Inzwischen wird das Lane-Departure-Warning als Sonderausstattung für den LKW Mercedes Actros verkauft, das auf einer eigens für diese Anwendung entwickelten Version der optischen Spurerkennung basiert. Die optische Spurerkennug wurde in [Gern et al. 2000] und [Gern et al. 2001] durch eine Fusionierung mit Radar und GPS und in [Trzebiatowski 2003b] erweitert.

2.4.1 Parameter der optischen Spurerkennung

Um den Verlauf einer Straße zu erkennen und zu schätzen enthält die Spurerkennung ein Modell der Straße.Die Richtlinien des Straßenbaus [FSV 1984] sehen auf Autobahnen und gut ausgebauten Bundesstraßen eine sich kontinuierlich ändernde Krümmung vor. Wie in [Trzebiatowski 2003a] beschrieben, gibt es verschiedene Möglichkeiten, diese Straßen zu modellieren. Die hier betrachtete Spurerkennung beruht auf dem klothoidischen Straßenmodell, das durch die Gleichung (2.7) repräsentiert wird.

$$c(L) = c_0 + c_1 \cdot L \tag{2.7}$$

$c(L)$ beschreibt die Krümmung an Position L entlang der Klothoide, wobei c_0 die Anfangskrümmung ist und c_1 die Krümmungsänderung, auch Klothoidenparameter genannt. Die Krümmung $c = \frac{1}{R}$ ist umgekehrt proportional zum Kurvenradius R.
Zusätzlich zu den Krümmungsparametern der Straße ist die Fahrzeugposition in der Spur wichtig. Diese wird durch die Parameter x_{off} und $\Delta\psi$ beschrieben. x_{off} ist der laterale Offset des Fahrzeugs innerhalb der Spur, $\Delta\psi$ der Gierwinkel zwischen der Fahrzeuglängsachse und der Fahrbahntangenten. Abbildung 2.8 veranschaulicht die Bedeutungen der Parameter. Dabei ist b die Spurbreite, v die Geschwindigkeit des Fahrzeuges, v_q die Quergeschwindigkeit und $\dot{\Psi}_F$ die Gierrate.

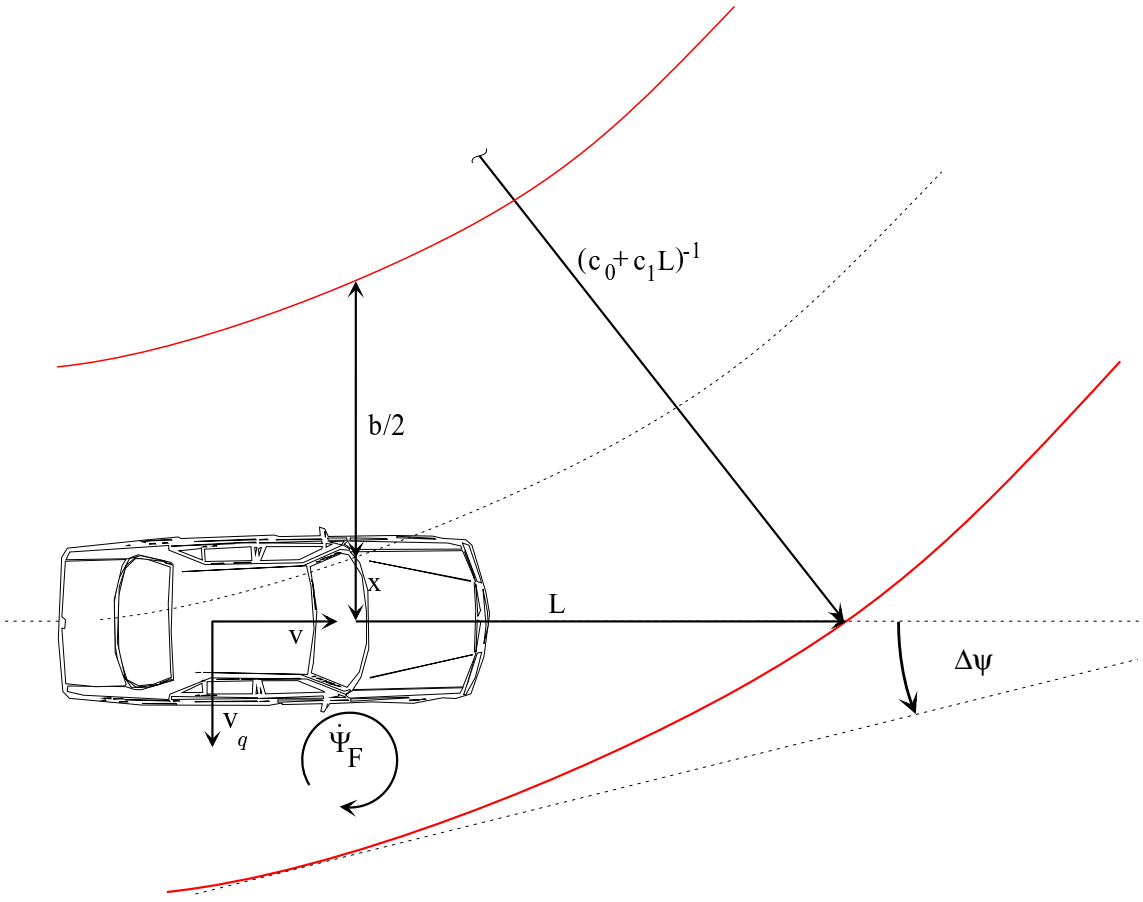


Abbildung 2.8: aus [Trzebiatowski 2003b]
Die relevanten Parameter der optischen Spurerkennung

2.4.2 Modell der Straße und des Fahrzeugs

Unter Annahme einer ebenen Straße lässt sich die Entfernung L auf der Straßenoberfläche zu einem Bildpunkt y_i des Kamerabildes nach Gleichung (2.8) berechnen, deren Herleitung sich in Anhang A befindet.

$$L = \frac{H(1 - \frac{y_i}{f_y} \tan\alpha)}{\frac{y_i}{f_y} + \tan\alpha} \tag{2.8}$$

Gleichung (2.9) beschreibt die Beziehung zwischen einem Punkt auf der Markierung und dem zugehörigen Bildpunkt $P_i(x_i, y_i)$:

$$x_i = \frac{f_x}{L}(a \cdot b - x_{off} - \Delta\psi \cdot L + \frac{c_0}{2} \cdot L^2 + \frac{c_1}{6} \cdot L^3) \tag{2.9}$$

Dabei beschreibt b die Spurbreite und $a = \pm\frac{1}{2}$ die linke beziehungsweise rechte Spurmarkierung. Auf diese Art entsteht eine Kopplung zwischen den Markierungen durch eine Projektion auf die imaginäre Mittellinie der Fahrspur. Unter Annahme von sehr kleinen Winkeln werden die trigonometrischen Funktionen durch ihr Argument angenähert ($\sin x = x, \tan x = x$). Die oben dargestellten Gleichungen (2.9) und (2.8) erlauben die Bestimmung des Spurverlaufs und der Position des Fahrzeugs innerhalb der Spur.

Bei den auf Bundesstraßen und Autobahnen üblichen Fahrgeschwindigkeiten um $100km/h$ und mehr, müssen dynamische und kinematische Randbedingungen berücksichtigt werden. Diese lassen sich durch folgendes Differenzialgleichungssystem ausdrücken [Schwarzinger 1998]:

$$\dot{x}_{off} = v \cdot \Delta\psi + v_q \tag{2.10}$$
$$\dot{\Delta\psi} = \dot{\psi}_{veh} - c_0 \cdot v \tag{2.11}$$
$$\dot{c}_0 = c_1 \cdot v \tag{2.12}$$
$$\dot{c}_1 = 0 \tag{2.13}$$
$$\dot{\alpha} = 0 \tag{2.14}$$
$$\dot{b} = 0 \tag{2.15}$$

v beschreibt dabei die Fahrzeuggeschwindigkeit in Längsrichtung, v_q die Fahrzeugquergeschwindigkeit ausgelöst durch den Schwimmwinkel des Fahrzeugs und $\dot{\psi}_{veh}$ die Gierrate. v_q und $\dot{\psi}_{veh}$ können mittels Inertialsensorik gemessen werden.

Basierend auf dem beschriebenen dynamischen und kinematischen Modell werden die Straßenmarkierungen von Bild zu Bild mit Hilfe eines Kalmanfilters verfolgt. In jedem Schritt erfolgt zunächst eine Prädiktionsphase, in der die Schätzgrößen für den aktuellen Zeitpunkt geschätzt werden. Anschliessend gehen Messungen der Bildverarbeitung in die Innovationsphase des Kalmanfilters ein [Welch et al. 2001].

Kapitel 3

Leitpfostenerkennung mittels Bildverarbeitung

In diesem Kapitel werden drei Ansätze zur Erkennung von Leitpfosten in Einzelbildern oder Bildausschnitten im Detail vorgestellt. Das Matched Filter und die Kantenverkettung werden bereits in [Gehrig et al. 1991] angewendet, um Leitpfosten in Einzelbildern zu erkennen. Zusätzlich wird das Verfahren der Integralsuche erläutert.
Die Eigenschaften der Verfahren werden aufgezählt und gegeneinander verglichen. Es werden Möglichkeiten der Kombination der Verfahren untersucht. Anschließend wird darauf eingegangen, wie sich über Geometrien im Bild Falschalarme der Leitpfostendetektoren aussortieren lassen und wie Schwellwerte und Parameter der Verfahren mit Hilfe von Receiver Operator Characteristic Curves eingestellt werden können.

3.1 Matched Filter

Um Leitpfosten, deren Aussehen exakt festgelegt ist, in Bildern mit einem Matched Filter zu suchen, werden die Hell-Dunkel-Strukturen der Leitpfosten und ihrer Umgebung in einer Suchmatrix nachgebildet. Im Kamerabild werden die Leitpfosten gesucht, indem es mit der Suchmatrix gefaltet wird. Damit wird im Bild nach allen am Leitpfosten auftretenden Kanten gleichzeitig gesucht.

Im Allgemeinen wird bei der Anwendung dieses Operators das Kamerabild als verrauschtes Signal eines Bildes des gesuchten Objektes aufgefasst. Das Matched Filter entfernt das Rauschen. Dazu wird das Eingangsbild mit der Suchmatrix gefaltet, die einer Anordnung von Grauwerten entspricht, die das gesuchte Objekt repräsentieren. Um den Rechenaufwand drastisch zu senken, wird die Suchmatrix in einen horizontalen und einen vertikalen Vektor separiert. Das Bild wird dann erst mit dem einen, und das Zwischenergebnis mit dem anderen Vektor gefaltet. Hierbei muss man für die Faltung keine $Höhe * Breite$ Multiplikationen für jeden einzelnen Bildpunkt durchführen sondern nur $Höhe + Breite$ Multiplikationen. Allerdings sind nur Matrizen separierbar, die bestimmte Symmetrien aufweisen [Jähne 1997].
Bei der diskreten Faltung werden die Bildpunkte der Umgebung eines Bildpunktes gewichtet, addiert und dem Zielbildpunkt zugeordnet. Aus Symmetriegründen ist es sinnvoll, den Zielbildpunkt zentral in einer Maske ungerader Größe zu wählen [Jähne 1997]. In Gleichung (3.1) wird das Eingangsbild B in das Bild B' überführt indem es mit einer $(2r + 1 \times 2s + 1)$ Matrix F gefaltet wird, wobei mit r und s die Größe der Matrix festgelegt wird.

$$B'(x, y) = \sum_{m=-r}^{r} \sum_{n=-s}^{s} F(m, n) * B(x + m, y + n) \tag{3.1}$$

Im gefilterten Bild sind die Grauwerte an den Punkten besonders groß, deren Umgebung gut zur Faltungsmatrix passt. Die gesuchten Objekte befinden sich also an den höchsten Grauwerten im gefilterten Bild, sofern sie überhaupt im Bild vorhanden sind.

3.1.1 Herleitung der Suchvektoren

Abbildung 3.1 zeigt das Modell eines Leitpfostens der linken Straßenseite, nach dem mit einer Suchmatrix gesucht wird. Um nur die obere Hälfte eines Leitpfostens zu suchen, die auch von Leitpfosten auf oder hinter Leitplanken sichtbar ist, werden die Grauwerte des in dieser Abbildung rot umrandeten Bereichs auf die Werte -1 für schwarz und 1 für weiss abgebildet. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Quersumme der Werte in der Matrix 0 ergibt und die Größe der Matrix muss der Größe in Bildpunkten des gesuchten Objekts entsprechen.

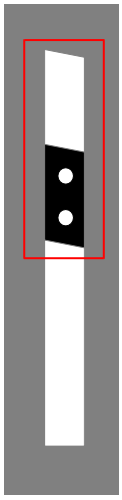


Abbildung 3.1:
Leitpfostenmodell der Suchmatrix

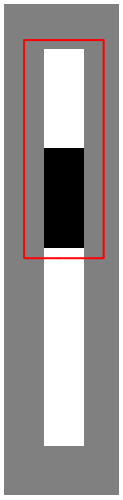


Abbildung 3.2:
Leitpfostenmodell der Suchvektoren

Um die Faltung zu optimieren und Leitpfosten mit einem horizontalen und einem vertikalen Vektor zu suchen, muss das Modell des gesuchten Objekts vereinfacht werden. Es kann dann nicht berücksichtigt werden, dass die Kanten zwischen den weißen und schwarzen Flächen des Leitpfostens um 35° geneigt sind.

Die horizontale Suche nach einem hellen (hier 5 Bildpunkte breiten) „Balken“ auf dunklerem Untergrund führt zu dem in Abbildung 3.3 dargestellten Suchvektor. Dieser ist mittelwertfrei, das heißt seine Einzelwerte ergeben addiert 0.

Um die vertikale Hell-Dunkelstruktur der oberen Hälfte des Leitpfostens zu suchen, wird ein vertikaler Suchvektor verwendet, der in Abbildung 3.4 zu sehen ist.

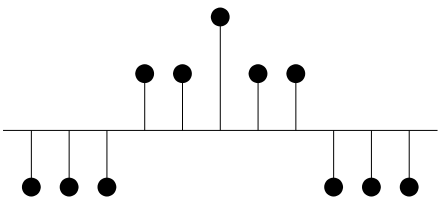


Abbildung 3.3: horizontaler Suchvektor

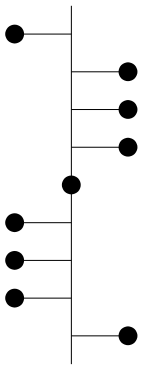


Abbildung 3.4: vertikaler Suchvektor

Das Anwenden des horizontalen Vektors $\vec{h}$ und vertikalen Vektors $\vec{v}$ hintereinander entspricht der Anwendung einer Suchmatrix M, für die gilt: $M = \vec{v} \cdot \vec{h}$. Werden die in Abbildung 3.3 und 3.4 dargestellten Suchvektoren nacheinander angewendet, so ergibt sich eine Suchmatrix M, die einen Leitpfosten repräsentiert, der in Abbildung 3.2 dargestellt ist. Dieses Leitpfostenmodell eignet sich für die Matched Filter Suche nach den Leitpfosten an der linken und rechten Straßenseite.

3.1.2 Suchvektoren verschiedener Größen

Für die Suche nach Leitpfosten unterschiedlicher Größe im Bild benötigt man Suchvektoren entsprechender Größe. Die in Abbildung 3.3 und 3.4 dargestellten Suchvektoren lassen sich für unterschiedliche ungerade Breiten b_L und Höhen h_L nach Gleichungen (3.2) und (3.3) berechnen, wobei gilt $m = [(b_L - 1)/2]$ und $n = [(h_L - 1)/4]$.

$$\vec{h} = (-1_1, \ldots, -1_m, 1_1, \ldots, 1_{m-1}, 2, 1_1, \ldots, 1_{m-1}, -1_1, \ldots, -1_m) \tag{3.2}$$

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1_1 \\ \vdots \\ 1_n \\ 0 \\ -1_1 \\ \vdots \\ -1_n \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

Mit diesen Vektoren kann man nach Leitpfosten der Breite b_L und Höhe h_L suchen. Punktantworten des Filters auf Leitpfosten, deren Größe nicht mit b_L und h_L übereinstimmen, nehmen proportional zur Differenz zwischen der gesuchten und tatsächlichen Größe ab.

Um auch nach Leitpfosten suchen zu können, deren Größe um einen oder zwei Bildpunkte abweichen, können die Vektoren aus (3.2) und (3.3) auch um entsprechend viele 0-Werte zwischen den Übergängen von -1 nach 1 und umgekehrt erweitert werden. Damit lässt sich beliebig tolerant nach den Leitpfosten suchen. Es ergeben sich die Suchvektoren aus den Gleichungen (3.4) und (3.5) um nach Leitpfosten zu suchen, deren Breite und Höhe um ein bis zwei Bildpunkte größer sind als b_L beziehungsweise h_L, welche verwendet werden, um m und n zu bestimmen.

$$\vec{h} = (-1_1, \ldots, -1_m, 0, 1_1, \ldots, 1_{m-1}, 2, 1_1, \ldots, 1_{m-1}, 0, -1_1, \ldots, -1_m) \tag{3.4}$$

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1_1 \\ \vdots \\ 1_n \\ 0 \\ -1_1 \\ \vdots \\ -1_n \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.5}$$

3.1.3 Vorteile

- **Teilverdeckung**
  Das Matched Filter ist robust gegenüber Teilverdeckungen der Leitpfosten. Der Grauwert der Punktantwort zu einem Leitpfosten im gefilterten Bild ist proportional zum sichtbaren Teil des Leitpfostens. Mit dem Schwellwert, der mit den Punktantworten des Filters verglichen wird, wird damit auch bestimmt, wie tolerant dieses Verfahren teilverdeckte Leitpfosten detektiert.

- **Schräglage**
  Leitpfosten mit leichter Schräglage werden von dem Filter noch ausgemacht. Passt der vertikale Filtervektor noch auf das schräge Bild des Leitpfostens und ändert sich die horizontale Breite des Leitpfostens durch die Schräglage um weniger als einen Bildpunkt, so beeinträchtigt die Schräglage des Pfostens die Erkennung nicht.

- **Ganze Bilder und Bildausschnitte**
  Das Matched Filter ist auf ganze, beliebig große Bilder anwendbar, die größer sind als die Suchmatrix selbst. Das Verhältnis zwischen der Größe der gesuchten Objekte und der Bildgröße ist dabei unwichtig und beeinflusst nicht die einzelnen Punktantworten des Filters. Der Rechenaufwand ist proportional zur Größe des Bildes oder des Bildausschnittes, auf den das Matched Filter angewendet wird.

3.1.4 Nachteile

- **Klassifizierung**
  Ob es sich bei einem lokalen oder globalen Maximum des Grauwertes im gefilterten Bild um einen Leitpfosten handelt, kann bei diesem Verfahren nur über einen Schwellwert bestimmt werden. Die Punktantworten des Matched Filter sind aber abhängig von den Lichtverhältnissen und der Filter liefert auch viele falsche Kandidaten. Um Leitpfosten tatsächlich zu erkennen muss man auf das Ergebnis des Matched Filter noch einen Klassifikator anwenden.

- **Größenvorgabe**
  Um einen Leitpfosten in einem Bild zu erkennen muss dessen Größe im Bild schon vor der Anwendung des Matched Filter bekannt sein, um die Suchmatrix oder die Suchvektoren zu bestimmen. Es kann jedoch nur beim Verfolgen von Leitpfosten in Bildsequenzen deren Größe bereits im Voraus geschätzt werden.

- **Lichtverhältnisse**
  Wie bereits erwähnt, ist die Leitpfostendetektion mit dem Matched Filter nicht schwellwertfrei. Die Punktantworten des Matched Filter auf Punkte des Kamerabildes sind von den Lichtverhältnissen abhängig. Je nach Kontrast des Bildes müsste der Schwellwert angepasst werden, um nicht zu viele falsche Leitpfosten, aber dafür die vorhandenen Leitpfosten noch zu detektieren.

- **Position und Größe**
  Lokale Maxima der Punktantworten des Matched Filter, die einen Schwellwert überschreiten, liefern Leitpfostenkandidaten und deren Position im Bild. Das Ergebnis besagt also, dass der Bildpunkt des lokalen Maximums einen Teil eines Leitpfostens abbildet. Das Matched Filter liefert aber keine Informationen über die Abmessungen des Leitpfostens im Bild. Die Größe des Leitpfostens kann nur indirekt über Punktantworten von Matched Filter verschiedener Suchmatrizen bestimmt werden. Auch Informationen über die Region des Leitpfostens, die auf dem Bildpunkt abgebildet wird, fehlen. Deshalb ist eine Lokalisierung der Leitpfosten mit dem Matched Filter nicht möglich.
  In der Praxis zeigte sich, dass von denselben Leitpfosten in Bildsequenzen nacheinander unterschiedliche Regionen auf das lokale Maximum in den Punktantworten des Matched Filter abgebildet werden. Damit wird auch ein Verfolgen der Leitpfosten mit dem Matched Filter erschwert, da die Bewegung der Maxima im gefilterten Bild nicht mit der tatsächlichen Bewegung der Leitpfosten im Bild übereinstimmt. Die Position der detektierten Leitpfosten ist über deren Abmessungen im Bild verrauscht.

3.1.5 Erweiterungen des Verfahrens

Das Matched Filter kann zur Suche der Leitpfosten im ganzen Bild eingesetzt werden. Dabei muss, wie bereits beschrieben, die Größe der Leitpfosten im Bild bereits vor der Suche bekannt sein. Um ohne diese Vorgabe nach Leitpfosten zu suchen, muss das Verfahren, wie es in [Gehrig et al. 1991] verwendet wird, erweitert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Erweiterungen des Verfahrens untersucht.

- **Iterative Anwendung mit Vektoren unterschiedlicher Größe**
  Um mit dem Matched Filter Leitpfosten zu detektieren, deren Größe in Bildpunkten noch nicht bekannt oder schätzbar ist, wird nach verschiedenen möglichen Größen getrennt gesucht.
  In Kapitel 3.1.2 befinden sich Herleitungen für horizontale und vertikale Vektoren zur Suche mit dem Matched Filter in Abhängigkeit von der vorgegebenen Größe der gesuchten Leitpfosten. Ist eine untere und obere Grenze der Größe der im Bild auftretenden Leitpfosten bekannt, so wird das Matched Filter für jede ganzzahlige Größe im vorgegebenen Intervall mit Hilfe der berechenbaren Vektoren iterativ angewendet.
  Die Tiefenberechnung von Punkten auf einer Ebene parallel zur ebenen Straße, die in Anhang A.2 beschrieben wird, ermöglicht es die Entfernung und damit auch die Breite und Höhe eines Leitpfostens in Bildpunkten zu jeder Zeile im Kamerabild zu berechnen. Somit kann für jeden Bildausschnitt eine obere und untere Grenze für die Größe von auftretenden Leitpfosten angegeben werden. Müssen die Leitpfosten vollständig im Bildausschnitt zu sehen sein, sind die größten Leitpfosten die, dessen Fußpunkt (auf Höhe der Straßenebene) in der untersten Zeile des Bildausschnittes liegt. Die kleinsten reichen mit ihrer Spitze (einen Meter über der Straßenebene) bis in die oberste Bildzeile oder bis zum Horizont, falls dieser im Bildausschnitt vorhanden ist und die Kamera sich in einer Höhe über den Leitpfostenspitzen befindet. Für diese beiden Fälle können mit Hilfe der Parameter der Kamera jeweils die Entfernung und damit auch die Größe im Bild berechnet werden. Damit ist auch das Intervall gegeben, welches alle möglichen Größen der im Bildausschnitt abgebildeten Leitpfosten und damit auch die iterative Suche mit verschiedenen Vektoren für das Matched Filter eingrenzt.
  Diese iterative Anwendung des Matched Filter ist den möglichen Größen entsprechend aufwendiger als eine Suche nach einer einzigen Größe von Leitpfosten.

- **Ein selbstanpassendes Matched Filter**
  Um den Aufwand des Matched Filter nicht wie bei der iterativen Anwendung zu erhöhen ist es möglich die Suchvektoren in jeder Zeile des Bildes neu zu berechnen und damit das Filter nur einmal auf das ganze Bild anzuwenden.
  Die in Anhang 3.1.2 hergeleiteten Vektoren sprechen auf die obere Hälfte eines Leitpfostens an, die auch zu sehen ist, wenn der Leitpfosten auf einer Leitplanke angebracht ist und in der die typischen Hell-, Dunkelstrukturen der Leitpfosten vorhanden sind. Wie in Anhang A.2 beschrieben, lässt sich die Entfernung und damit die Größe eines Leitpfostens in Abhängigkeit der Bildzeile bestimmen, dessen Mittelpunkt der oberen gesuchten Hälfte

auf der entsprechenden Bildzeile liegt. Werden die Suchvektoren auf diese Weise in jeder Bildzeile neu berechnet, so wird mit dem Matched Filter von oben nach unten nach immer breiteren und höheren Leitpfosten gesucht.

Mit diesen beiden Erweiterungen des Verfahrens wird auch nach Leitpfosten im Bild gesucht, deren Größe vor der Suche noch nicht bekannt ist. Die weiteren oben aufgeführten negativen Eigenschaften des Matched Filter bleiben dabei jedoch bestehen.

3.1.6 Anwendung

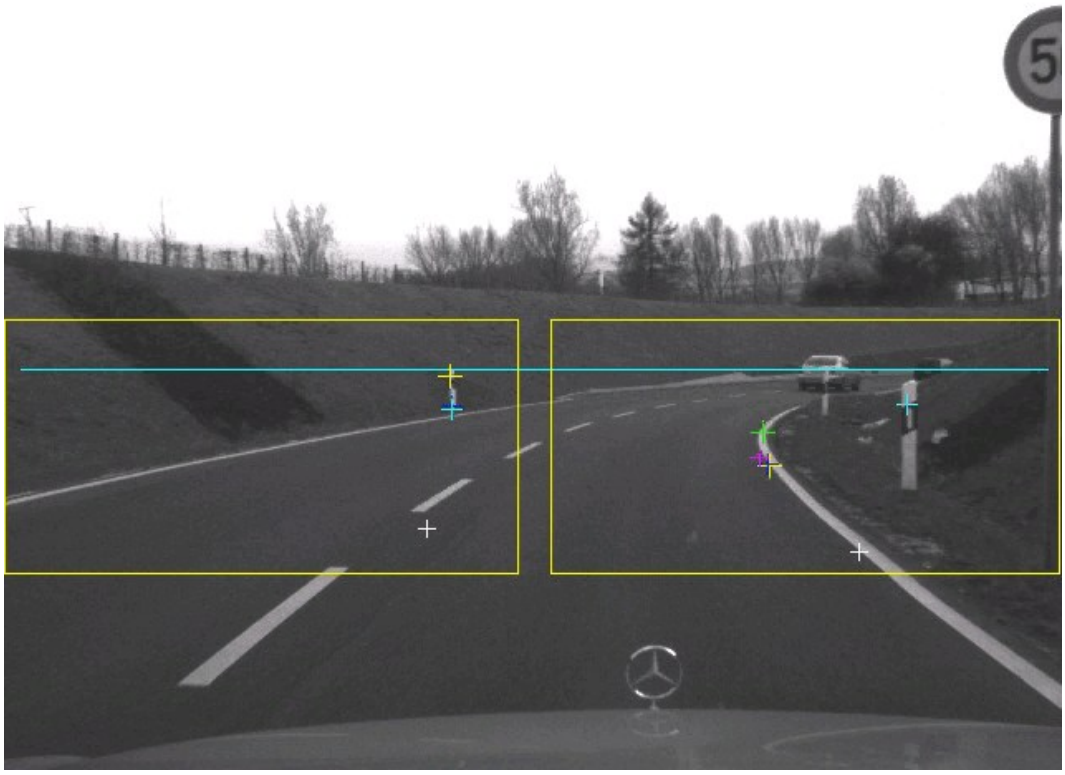
In Abbildung 3.5 a) sieht man das iterative Matched Filter auf ein Kamerabild aus dem Versuchsträger angewendet. In den beiden gelben Suchbereichen im Kamerabild wird jeweils nach Leitpfosten verschiedener Breiten gesucht. Die hellblaue horizontale Linie ist der Horizont bei ebener Straße. Die Maxima der Punktantworten sind mit einem farbigen Kreuz gekennzeichnet. Das grüne Kreuz ist das Maximum der Punktantworten aus der Suche nach Leitpfosten von 3 Bildpunkten breite, gelb ist das Maximum für 5, blau für 7, hellblau für 9, violett für 13 und weiß für 17 Bildpunkte breite Leitpfosten.

Abbildung 3.5 b) zeigt das Zwischenergebnis nach der Faltung der Suchbereiche des Kamerabildes mit dem horizontalen Suchvektor für einen 5 Bildpunkte breiten Leitpfosten.

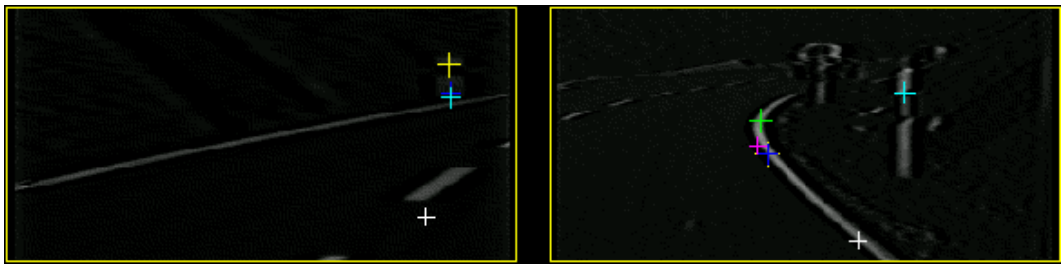
In Abbildung 3.5 c) ist das Ergebnis der zweiten Faltung des Bildes mit dem vertikalen Suchvektor zu sehen. Ausgangsbild für diese Faltung ist das Ergebnis der ersten Faltung.
Unter den gelb eingezeichneten Suchbereichen sind die Maxima der Punktantworten der einzelnen Faltungen aufgelistet. Die Farben entsprechen den Markierungen der Positionen im Bild.

An diesem Beispiel ist sichtbar, dass das iterative Verfahren viele falsche Kandidaten liefert. Unter anderem kommt das daher, dass im Bild meist weniger Leitpfosten vorhanden sind, als mit der iterativen Anwendung des Filters gesucht werden. Am Leitpfosten links im Bild sieht man mehrere Maxima der Punktantworten auf dem Leitpfosten. Diese sind jedoch an unterschiedlichen Positionen auf der Abbildung des Leitpfostens.

a)



b)



c)

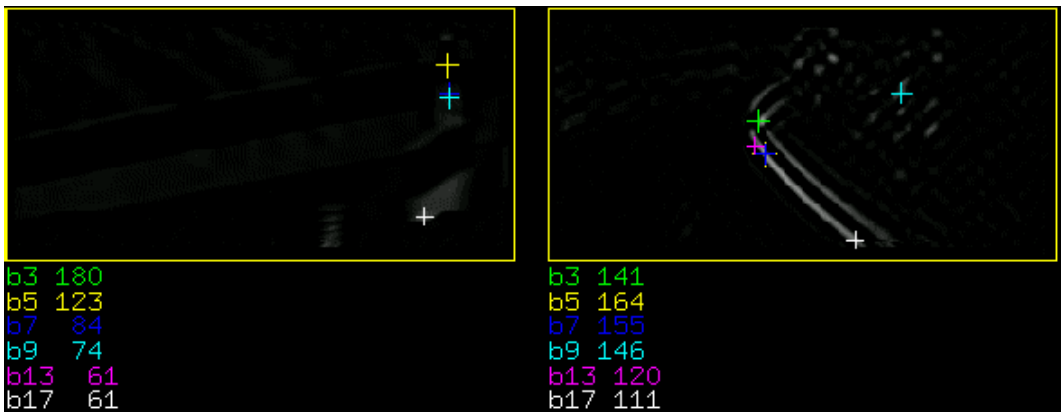


Abbildung 3.5: Beispiel für die Anwendung des Matched Filter

3.2 Kantenverkettung

Um mit einer Kantenverkettung nach Leitpfosten in einem Bild zu suchen, werden mehrere Bildverarbeitungsoperatoren nacheinander auf das Bild angewendet. Der Gesamtablauf ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

Zuerst wird auf das Ausgangsbild ein Kantenoperator angewendet. Die Kantenbilder mit den Aufwärts- und Abwärtskanten werden anschließend binarisiert. Mit einer Punktverkettung werden aus den binarisierten Kantenbildern Vektorenlisten generiert, die alle Kanten des Bildes repräsentieren. Zuletzt werden passende Kantenvektoren gesucht, die zusammen einen Leitpfosten repräsentieren.

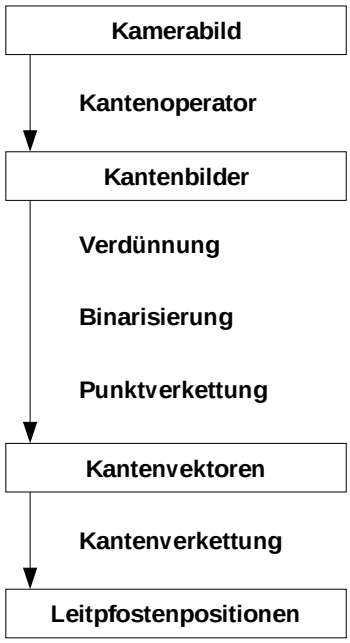


Abbildung 3.6: Gesamtablauf des Verfahrens der Kantenverkettung

3.2.1 Kantenoperator

Als Kantenoperator wird ein Sobeloperator für die diskrete Faltung des Ausgangsbildes verwendet. Um die im Bild senkrecht auftretenden Leitpfosten zu finden, wird die Kantenextraktion nur auf die senkrechten Auf- und Abwärtskanten beschränkt. Um Rauschen im Ausgangsbild zu unterdrücken und nur die längeren Kanten zu extrahieren, die für Leitpfosten typisch sind, wird statt einem 3x3 Sobeloperator, wie er in [Jähne 1997] und [Haberäcker 1995] vorgestellt

wird, ein 3x5 Sobeloperator verwendet, wie er in Abbildung 3.7 zu sehen ist. Ein Sobeloperator für horizontale Kanten wird nicht benötigt. Der dargestellte Operator extrahiert Aufwärtskanten, die Negation dieses Operators oder die Negation der Punktantwort dieses Operators liefert die Abwärtskanten des Ausgangsbildes. Für die Suche der Leitpfosten wird für die Auf- und Abwärtskanten jeweils ein gefiltertes Bild generiert.

-1	0	1
-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1
-1	0	1

Abbildung 3.7: 3x5 Sobeloperator

3.2.2 Verdünnung und Binarisierung

Die beiden Kantenbilder werden vor der Generierung der Vektorenlisten verdünnt und binarisiert, wie in [Gehrig et al. 1991] beschrieben.
Für die Punktverkettung, die auf die verdünnten und binarisierten Kantenbilder angewendet wird, ist nur die Position der Kanten wichtig. Deshalb können die Kantenbilder mit einer „Nonmaxima-Unterdrückung“ verdünnt werden. Dabei werden alle Kanten im Bild auf ihr lokales Maximum reduziert und die Grauwerte der restlichen Bildpunkte gehen verloren.

Bei der Erkennung von Leitpfosten in Kamerabildfolgen aus bewegten Fahrzeugen heraus muss mit veränderlichen Lichtverhältnissen gerechnet werden. Deshalb ist eine Binarisierung der Kantenbilder mit fixem Schwellwert, die abhängig vom Kontrast im Ausgangsbild ist, ungeeignet. Dadurch könnten auch alle oder zu viele Bildpunkte im Kantenbild auf 0 gesetzt werden und somit auch Kanten entfernt werden, die Leitpfosten repräsentieren. Statt einem fixen Schwellwert wird die in [Haberäcker 1995] beschriebene $p\%$-Methode, unter der Annahme, dass die Kanten der Leitpfosten im Kantenbild zu den hellsten p% aller Bildpunkte gehören, angewendet. Der Schwellwert wird bei dieser Methode auf den maximalen Grauwert festgelegt, für den gilt, dass die Summe aller Bildpunkte deren Grauwert größer oder gleich dem Schwellwert ist, nicht weniger als p% aller Punkte im Bild ausmachen. Das heißt, dass bei der Binarisierung mindestens p% der Punkte des Bildes erhalten bleiben. Damit bleiben auch bei kontrastarmen Ausgangsbildern die stärksten Kanten des Bildes erhalten. Ein Wert für p wird in Kapitel 3.5 empirisch ermittelt.

3.2.3 Punktverkettung

Auf die verdünnten und binarisierten Kantenbilder wird die Punktverkettung angewendet, um Vektorenlisten für die Auf- und Abwärtskanten zu generieren.

Mit der Punktverkettung erhält man aus einem Bild eine Liste mit Aufpunkten und Vektoren, die alle Linien im Bild repräsentieren [Gehrig et al. 1991]. Dazu wird für jeden Bildpunkt, dessen Grauwert größer ist als ein festgelegter Schwellwert, untersucht, ob der Grauwert angrenzender Bildpunkte ebenfalls größer als der Schwellwert ist. Diese in Abbildung 3.8 blau eingezeichneten und durchnummerierten Punkte werden Schritt für Schritt zu Linien verbunden. Dabei ist der erste Bildpunkt der Aufpunkt und der rot eingezeichnete Vektor zeigt zum letzten Punkt der Linie.

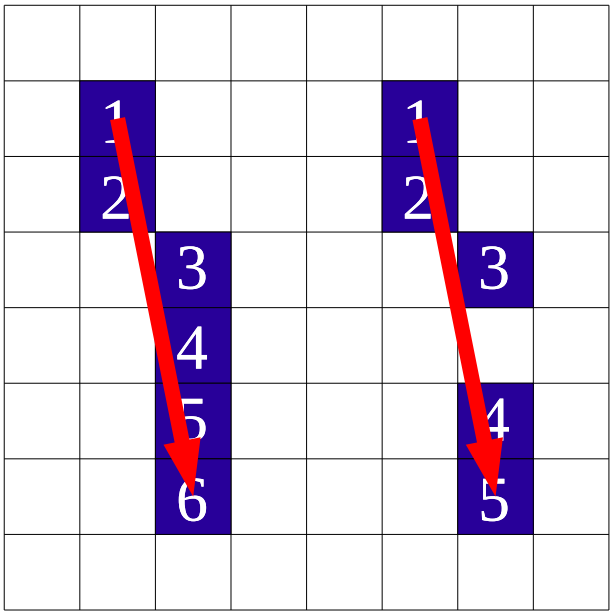


Abbildung 3.8: Punktverkettung

Bei der Suche nach angrenzenden schwellwertüberschreitenden Bildpunkten kann eine Richtung vorgegeben werden. Für die Leitpfostendetektion kann die Suche auf vertikal abwärts benachbarte Punkte beschränkt werden um nur die vertikalen Linien zu erhalten, die die senkrechten Kanten repräsentieren.
Des Weiteren kann ein Schwellwert einer maximalen Größe für Lücken zwischen den Bildpunkten vorgegeben werden, die zusammen noch einen Vektor bilden. In Abbildung 3.8 rechts ist ein Beispiel für einen Vektor, dessen Bildpunkte eine Lücke enthalten.

3.2.4 Kantenverkettung

Mit der Kantenverkettung werden in den Listen aus der Punktverkettung Vektoren gesucht, die zusammen einen Leitpfosten repräsentieren.
Dabei werden Vektoren zu Aufwärts- und Abwärtskanten gleicher Richtung, passender Länge und einem zur Länge passenden Abstand gesucht. Hierbei können Schwellwerte für den maximalen Winkel zwischen der Senkrechten und den Vektoren, also der Schräglage eines Leitpfostens, angegeben werden. Ebenso können Toleranzen für Größenverhältnisse und für die Vektorlängen definiert werden. Die Toleranzen bei diesem Verfahren sind nötig um die Leitpfostendetektion auch in verrauschten Kamerabildern oder bei Teilverdeckungen durch die ungleichmäßig hohe Vegetation am Straßenrand zu ermöglichen. Welche vertikalen Kantenvektoren einen Leitpfosten repräsentieren können und wie die Vegetation die Kanten ungleichmäßig überdecken kann, wurde bereits in Abbildung 2.4 dargestellt.

3.2.5 Vorteile

- **Ganze Bilder und Bildausschnitte**
  Auch mit diesem Verfahren können Leitpfosten in beliebig großen Bildern oder Bildausschnitten gesucht werden.

- **Schräglage**
  Mit der Kantenverkettung ist es möglich schräge Leitpfosten zu erkennen. Verwendet man den vertikalen Sobeloperator als Kantendetektor, so sind die Grauwerte der Kanten bei schrägen Pfosten geringer als bei senkrechten Leitpfosten, doch mit einem gradientenfreien Kantenoperator können beliebig geneigte Leitpfosten erkannt werden [Jähne 1997].

- **Position und Größe**
  Im Gegensatz zum Matched Filter bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, die Abmessungen und die Position des detektierten Leitpfostens im Bild zu bestimmen.

3.2.6 Nachteile

- **Lichtverhältnisse**
  Die Ergebnisse der Kantendetektoren sind abhängig vom Kontrast des Ausgangsbildes.

- **Teilverdeckung**
  Leitpfosten, die durch Autos, Vegetation am Straßenrand oder anderen Gegenständen teilverdeckt sind, können mit diesem Verfahren nicht robust erkannt werden. Unterbrochene oder fehlende Kantenvektoren verhindern die Detektion. Über Toleranzen bei der Suche in den Vektoren können Überdeckungen berücksichtigt werden. Hohe Werte für diese Toleranzen führen jedoch auch zu einer höheren Anzahl an Falschalarmen bei der Detektion.

3.2.7 Hough-Transformation

Um die Kantenvektorenliste zu erstellen kann man auch eine Hough-Transformation durchführen, welche in [Haberäcker 1995] und [Jähne 1997] ausführlich beschrieben ist. Diese liefert eine Menge von Geraden mit Aufpunkten, entlang derer im Ausgangsbild Kanten zu finden sind. Durch die Hough-Transformation erhält man aber keine Informationen über Start- und Endpunkt der Kanten auf den Geraden. Um Leitpfosten in einem Bild zu erkennen sind jedoch Informationen über die Größe von Objekten und deren Kanten im Bild interessant, um sie mit den charakteristischen Eigenschaften und gesetzlich festgelegten Größen der Leitpfosten vergleichen zu können. So muss man nach einer Hough-Transformation zusätzlich die Start- und Endpunkte der Kanten im Ausgangsbild suchen. Damit wird die Anwendung der Hough-Transformation aufwendig. Im Gegensatz zum bisher beschriebenen vertikalen Sobel-Kantenoperator liefert die Hough-Transformation Kanten beliebiger Steigung. Zur Detektion der aufrecht stehenden Leitpfosten sind die vertikalen Kanten im Bild jedoch ausreichend.
In [Gehrig et al. 1991] wurde die Hough-Transformation verknüpft mit Operatoren aus der Kantenverkettung zur Leitpfostendetektion untersucht und keine Vorteile gegenüber der Kantenverkettung mit einem Sobel-Kantendetektor festgestellt.

3.2.8 Anwendung

Abbildung 3.9 zeigt das Ergebnis der Kantenverkettung auf einem Kamerabild des Versuchsträgers. Aufwärtskanten im gelb umrahmten Suchbereich sind blau eingezeichnet, Abwärtskanten rot. Wie beschrieben liefert die Kantenverkettung zur Position der detektierten Leitpfosten auch die Größe im Bild. Dadurch ist es möglich die Leitpfosten im Bild grün zu umrahmen.
Der Leitpfosten links und der Pfosten des Straßenschildes rechts im Bild werden nicht als Leitpfosten erkannt. Hier ist jeweils die Verbindung der vorhandenen Kanten zu einem Leitpfosten nicht geglückt.

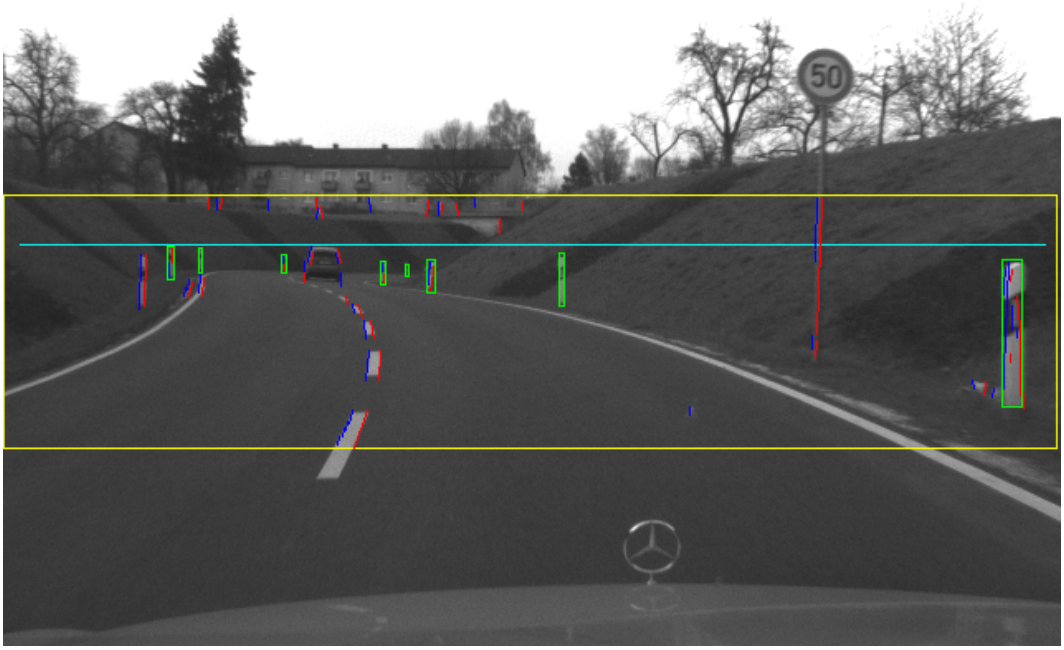


Abbildung 3.9: Beispiel für die Anwendung der Kantenverkettung

3.3 Integralsuche

Bei der Integralsuche werden eine horizontale und vertikale Integration zur Leitpfostendetektion verwendet. Das Verfahren besteht aus mehreren Einzelschritten, die übersichtlich in Abbildung 3.10 zusammengefasst sind.

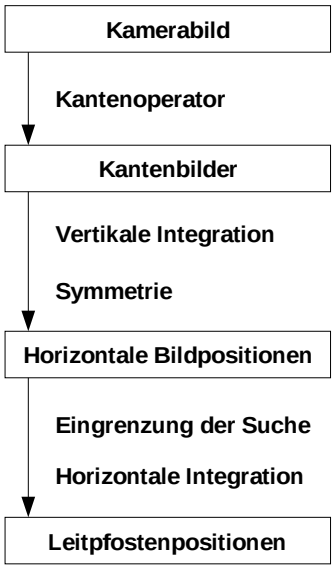


Abbildung 3.10: Gesamtablauf des Verfahrens der Integralsuche

Für alle Leitpfosten im Kamerabild, die aufrecht am Straßenrand angebracht sind, gilt Gleichung (3.6). Diese Gleichung besagt, dass der Anteil der Leitpfostenhöhe h_L von der Gesamtbildhöhe h_B größer ist als der Anteil der Leitpfostenbreite b_L von der Gesamtbildbreite b_B.

$$\frac{h_L}{h_B} > \frac{b_L}{b_B} \tag{3.6}$$

Daraus folgt, dass Leitpfosten im vertikalen Integral über den Kantenbildern eines Bildausschnitts besser detektiert werden können als im entsprechenden horizontalen Integral. Deshalb werden zur Leitpfostendetektion und Lokalisierung die Kantenbilder eines Bildausschnitts erst vertikal integriert, bei einem gefundenen Leitpfosten der Bildausschnitt eingegrenzt und anschließend erst horizontal integriert. Die Einzelschritte sind Abbildung 3.11 dargestellt.

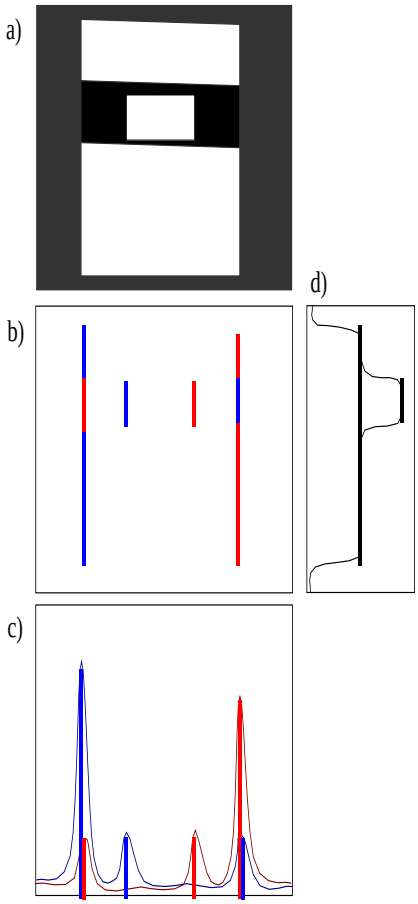


Abbildung 3.11: Vertikale und horizontale Integration der Kantenbilder:

a) Zur Übersicht idealisierte und verzerrte Abbildung eines Leitpfostens

b) Vertikale Kanten des idealisierten Leitpfostens: Aufwärtskanten blau, Abwärtskanten rot

c) vertikale Integration der Kanten: idealisiert dick, verrauscht dünn

d) horizontale Integration aller Kanten: idealisiert und verrauscht

3.3.1 Kantendetektion

Zunächst werden mit einem Kantenoperator die horizontalen Auf- und Abwärtskanten des Ausgangsbildes berechnet. Die Ergebnisse der beiden Kantenbilder eines zur Übersicht idealisierten und verzerrten Ausgangsbildes sind in Abbildung 3.11 b) zu sehen.

3.3.2 Vertikale Integration

Bei der Integration werden die Grauwerte eines zweidimensionalen Bildes auf einen eindimensionalen Vektor abgebildet. Für die vertikale Integration werden die Spalten des Bildes aufsummiert. Für ein Bild B der Größe $(m \times n)$ ergibt sich die vertikale Integration v_v aus Gleichung (3.7).

$$v_v = \left(\sum_{y=1}^{m} B(y,1), \cdots, \sum_{y=1}^{m} B(y,n) \right) \tag{3.7}$$

Die Kantenbilder werden nach Gleichung (3.7) jeweils vertikal integriert und normalisiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.11 c) dargestellt. Dabei ist das Ergebnis vom idealisierten Ausgangsbild a) durch die dickeren Linien im Bild repräsentiert. Ein verrauschtes Ausgangsbild eines Leitpfostens von einer Kamera liefert schematisch die Kurven, die durch die dünneren Linien im Bild dargestellt sind.

3.3.3 Symmetrie

Charakteristisch für die Ergebnisse der vertikalen Integration der Auf- und Abwärtskanten einer Leitpfostenabbildung ist die Symmetrie. Jedes der beiden Integrale besitzt ein größeres und zwei kleinere Maxima der aufsummierten Werte in umgekehrter Reihenfolge jeweils zur Leitpfostenmitte hin. Gespiegelt am Mittelpunkt des Leitpfostenabbildes sind die beiden Integrale abgesehen vom Messrauschen und der um 5% unterschiedlich langen Außenkanten des Abbildes identisch. Damit lässt sich mit Hilfe eines Symmetrieoperators der konzentrischen Paarbildung der Mittelpunkt des Leitpfostens bestimmen. Wird die SAD Funktion für die Suche der Symmetrien zwischen dem Vektor des Integrals der Aufwärtskanten v_1 und dem der Abwärtskanten v_2 eingesetzt, erhält man Gleichung (3.8) für die Symmetriegüte ε.

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{m} \left| v_1 \left(\frac{m}{2} - i \right) - v_2 \left(\frac{m}{2} + i \right) \right| \tag{3.8}$$

3.3.4 Bestimmung der horizontalen Position und der Breite

Nachdem für jede Bildspalte die Symmetriegüte der Kantenbilder bestimmt wurde, wird nach Leitpfosten gesucht. Dazu wird angenommen, dass lokale Maxima der Symmetriegütewerte potenzielle Mittelpunkte von Leitpfosten darstellen. Gibt es links eines potenziellen Mittelpunktes im vertikalen Integral des Aufwärtskantebildes und rechts des Mittelpunktes im Integral des Abwärtskantenbildes die für Leitpfosten charakteristischen lokalen Maxima, dann ist ein Leitpfosten im Ausgangsbild gefunden. Die horizontale Position des Pfostens ist das lokale Maximum der Symmetriegüten und die Breite des Leitpfostens in Bildpunkten ergibt sich aus der Differenz der Positionen der entsprechenden Maxima der Integrale.

3.3.5 Bestimmung der vertikalen Position und der Höhe

Nachdem die horizontale Position und die Breite eines detektierten Leitpfostens bekannt sind, wird der Suchbereich im Bildausschnitt für jeden einzelnen Leitpfosten eingegrenzt. Anschließend bildet man auf dem eingegrenzten Bereich das horizontale Integral der Kantenbilder nach Gleichung (3.9).

$$v_h = \left(\sum_{x=1}^{n} B(1,x), \cdots, \sum_{x=1}^{n} B(m,x) \right) \tag{3.9}$$

Im Gegensatz zum Integral über den uneingeschränkten Suchbereich ist das Integral über den eingeschränkten Bereich weniger verrauscht, da sich hier die Bildpunkte des Leitpfostens beziehungsweise seine Kanten über die ganze Breite des Suchbereichs erstrecken.
Im normalisierten Ergebnis wird anschließend über den Vergleich mit zwei Schwellwerten nach der in Abbildung 3.11 d) dargestellten, für Leitpfosten charakteristische Kurve gesucht, um die vertikale Position und die Höhe des Leitpfostens zu bestimmen.

3.3.6 Vorteile

- **Laufzeit**
  Dieses Verfahren ist sehr schnell, da das Bilden der Integrale lediglich aus Additionen besteht und die Vergleiche mit Schwellwerten nur auf eindimensionalen Vektoren einmal über die Breite und einmal über die Höhe des Suchbereichs durchgeführt werden müssen.

- **Position und Größe**
  Mit Hilfe dieses Verfahrens können die Position und die Größe der Leitpfosten im Bild bestimmt werden.

3.3.7 Nachteile

- **Bildausschnitt**
  Der Rauschabstand der lokalen Maxima in den vertikalen Integralen der Kantenbilder entspricht dem Verhältnis der Kantenhöhe zur Höhe des Suchbereichs im Bild. Daraus ergibt sich, dass die Leitpfosten mit diesem Verfahren nicht in beliebig großen Bildern erkannt werden können. Je größer das Bild beziehungsweise der Suchbereich im Bild im Verhältnis zur Größe der Leitpfosten ist, desto fehleranfälliger ist die Detektion der Leitpfosten.

- **Teilverdeckte Leitpfosten**
  Für die Detektion von Leitpfosten mit diesem Verfahren gilt, wie beim Verfahren der Kantenverkettung, dass Leitpfosten, die durch Autos oder andere Objekte teilverdeckt sind, nicht robust erkannt werden können.

Dieses Verfahren kann nicht auf beliebig große Suchbereiche angewendet werden, es lassen sich damit jedoch die Position und Größe von Leitpfosten bestimmen. Daraus folgt, dass sich dieses Verfahren zur Verfolgung bereits detektierter Leitpfosten in Bildsequenzen einsetzen lässt, wobei der Suchbereich stark eingeschränkt werden kann.

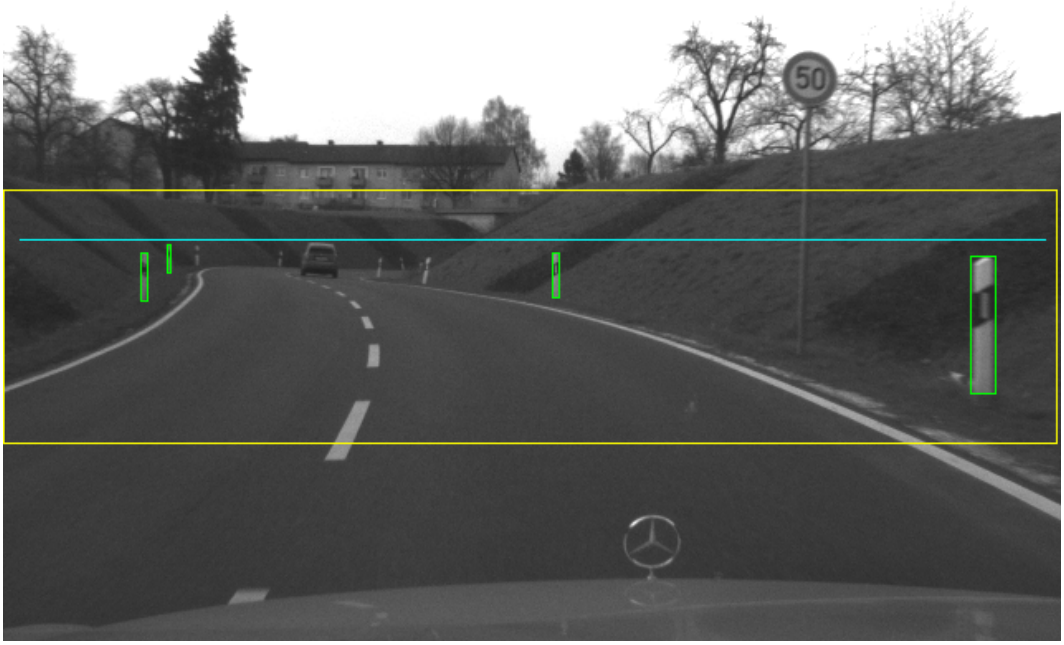


Abbildung 3.12: Beispiel für die Anwendung der Integration

Abbildung 3.12 zeigt das Ergebnis der horizontalen und vertikalen Integration auf demselben Bild, auf das auch die Kantenverkettung angewendet wurde. Auch hier sind die detektierten Leitpfosten grün umrahmt.
An diesem Beispiel wird deutlich, dass nur die Leitpfosten detektiert werden, deren Höhe einen großen Anteil der Höhe des gelb eingezeichneten Suchbereichs einnimmt. Die kleineren Leitpfosten im Bild werden nicht erkannt.

3.3.8 Mehrfache und einfache Integralsuche

Das beschriebene Verfahren sucht in einem Bild oder Bildausschnitt nach mehreren Leitpfosten und wird im Rahmen dieser Arbeit „Mehrfache Integralsuche“ genannt.
Beim Tracking, dem in Kapitel 4 beschriebenen Verfolgen der bereits detektierten Leitpfosten in Folgebildern von Sequenzen, muss in einem kleinen Bildausschnitt nur ein einziger Leitpfosten gesucht werden. Um mit der Integralsuche nach nur einem Leitpfosten zu suchen wird wie bisher vorgegangen, jedoch im Ergebnis des Symmetrieoperators wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben nicht nach mehreren lokalen Maxima gesucht sondern nur nach dem globalen Maximum. Diese „Einfache Integralsuche“ ist für das Tracking besser geeignet, da der Aufwand für weitere Prüfungen und Berechnungen mehrerer lokaler Maxima entfällt.

3.4 Vergleich der Verfahren

Die beschriebenen Eigenschaften der verschiedenen Verfahren werden in Abbildung 3.13 in einer Tabelle zusammengefasst. Für jedes Kriterium wird ein Verfahren mit $\ominus$ für schlecht, $\odot$ für neutral und $\oplus$ für gut bewertet.

Vergleich der Verfahren	Matched Filter	Kantenverkettung	Integration
Bestimmung der Position im Bild	$\ominus$	$\oplus$	$\oplus$
Bestimmung der Größe im Bild	$\ominus$	$\oplus$	$\oplus$
Detektion teilverdeckter Leitpfosten	$\oplus$	$\odot$	$\odot$
Detektion schräger Leitpfosten	$\odot$	$\oplus$	$\odot$
Anwendbarkeit auf ganze Kamerabilder	$\oplus$	$\oplus$	$\ominus$
Anwendbarkeit auf Bildausschnitte	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$
Unabhängigkeit von Lichtverhältnissen	$\ominus$	$\odot$	$\odot$
Unabhängigkeit von einer Größenvorgabe	$\ominus$	$\oplus$	$\oplus$
Laufzeit des Verfahrens	$\odot$	$\odot$	$\oplus$

Abbildung 3.13: Zusammenfassung der Eigenschaften der Verfahren

3.5 Receiver Operator Characteristic Curves

Receiver Operator Characteristic (ROC) Curves werden eingesetzt, um die Qualität eines Detektors zu ermitteln und um einzelne Parameter eines Detektors zu evaluieren. Dazu werden in einem zweidimensionalen Diagramm für verschiedene Werte eines Parameters des Detektors die korrekt erkannten Objekte auf der vertikalen Achse den Falschalarmen auf der horizontalen Achse gegenübergestellt, wie es in Abbildung 3.14 zu sehen ist. Die Güte eines Detektors wird anhand der „Area under Curve“ gemessen, also der Fläche unterhalb der Kurve zu einem einstellbaren Parameter. Eine Area under Curve von 50% des Diagramms, wie sie in der Abbildung grün eingezeichnet ist, entspricht einem schlechten Detektor, der in etwa einem Zufallsgenerator gleich kommt sofern nur zwischen positiven und negativen Ergebnissen unterschieden werden muss. Die Detektion und Lokalisierung von Leitpfosten in ganzen Kamerabildern dagegen ist komplexer. Hier wurden die ROC Kurven verwendet um Parameter der Verfahren einzustellen.

Auf die Darstellung der einzelnen Parameterwerte im Verlauf der Kurven wird verzichtet, da bei einer zweidimensionalen Darstellung von drei Dimensionen der Verlauf der Kurve nicht interpretiert werden kann.

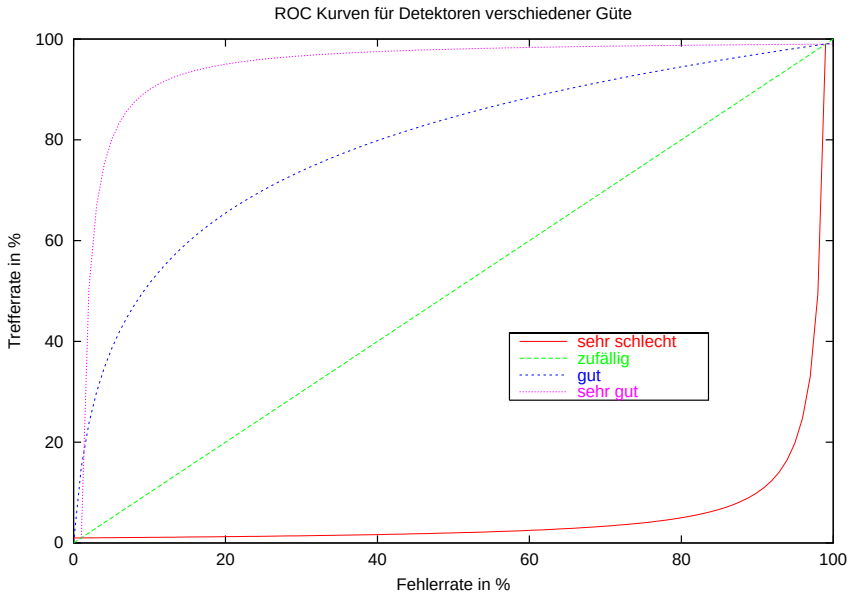


Abbildung 3.14: Beispiel für ROC Kurven

3.5.1 Einstellen der Parameter der Leitpfostendetektion

Um geeignete Werte für die in den Verfahren verwendeten Schwellwerte und Parameter zu finden, wurden 1850 Bilder aus verschiedenen, im Versuchsträger aufgenommenen Sequenzen ausgewählt und alle in den Einzelbildern auftretenden Leitpfosten markiert. Anschließend wurde für jeden einzustellenden Parameter ein Werteintervall vorgegeben und das entsprechende Verfahren iterativ auf alle Bilder angewendet. Dabei wurde für 11 verschiedene Parameterwerte aus dem Intervall protokolliert, wie viele der Leitpfosten korrekt detektiert wurden und wie viele Falschalarme das Verfahren liefert.
Einzelne Bilder, die für die unterschiedlichen Sequenzen charakteristisch sind, sind in Abbildung 3.15 zu sehen. Bild a) ist aus einer Sequenz mit hohem Kontrast, vielen Kurven und vielen Leitpfosten. Bild b) ist aus einer kontrastärmeren Sequenz, die gegen die Sonne aufgenommen wurde. Bild c) ist aus einer Sequenz in der nur in 10% der Einzelbilder Leitpfosten auftreten. Bild d) ist aus einer Nachtsequenz über Landstraßen und durch einen Stadtteil.

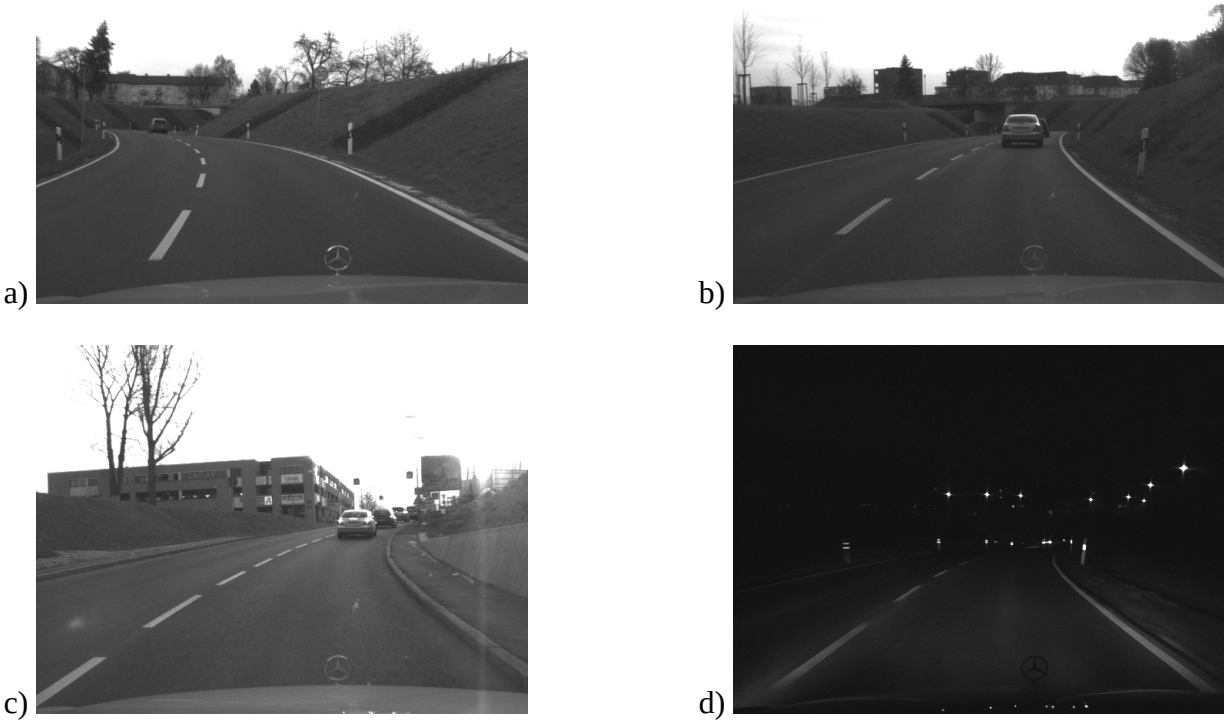


Abbildung 3.15: Beispielbilder aus Sequenzen zur ROC Generierung

Die vertikale Achse der ROC Kurve zeigt die Anzahl der korrekt detektierten Leitpfosten in Prozent gegenüber den tatsächlich in allen Einzelbildern vorhandenen Leitpfosten. Die horizontale Achse zeigt die Anzahl der falsch detektierten Leitpfosten ebenfalls in Prozent gegenüber den tatsächlich in Einzelbildern vorhandenen Leitpfosten. Dieser Wert übersteigt 100%, falls mehr Leitpfosten falsch erkannt wurden als überhaupt richtige Leitpfosten in Einzelbildern vorhanden sind.
Um einen Parameter eines Verfahrens auf einen geeigneten Wert festzulegen nimmt man einen Wert, mit dem viele richtige Leitpfosten und gleichzeitig möglichst wenige falsche Leitpfosten detektiert werden. Auf der ROC Kurve wählt man also einen Wert, der auf der Kurve in der oberen linken Region des Graphen liegt. Die Wahl des Wertes erfolgt subjektiv, je nach dem ob die Prioritäten bei vielen Kandidaten oder wenigen Falschalarmen bei der jeweiligen Anwendung liegen.
Anhand der ROC Kurve lässt sich auch erkennen, ob ein Parameter relevant für ein Verfahren ist. Je mehr ein Parameter ein Verfahren beeinflusst, desto größer ist das Gebiet des Graphen, über das sich die ganze Kurve zu einem Parameter erstreckt. Besteht die Kurve aus nur einem Punkt, so ist der entsprechende Parameter unwichtig für das Verfahren.
Für die unterschiedlichen Sequenzen wurde jeweils eine eigene Kurve generiert, damit gezeigt werden kann, ob ein Parameter in unterschiedlichen Situationen unterschiedlich eingestellt werden muss, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Um einen Parameter einzustellen, müssen für alle anderen Parameter bereits feste Werte vorgegeben werden. Deshalb wurden die ROC Kurven in mehreren Iterationen durchgeführt. Dabei wurden in vier Durchgängen jeweils die besten Werte aus dem vorherigen Durchgang als Ausgangswerte für alle Parameter verwendet, um einem einzelnen Parameter Werte aus dem Intervall um den optimalen Wert des letzten Durchgangs zuzuweisen.

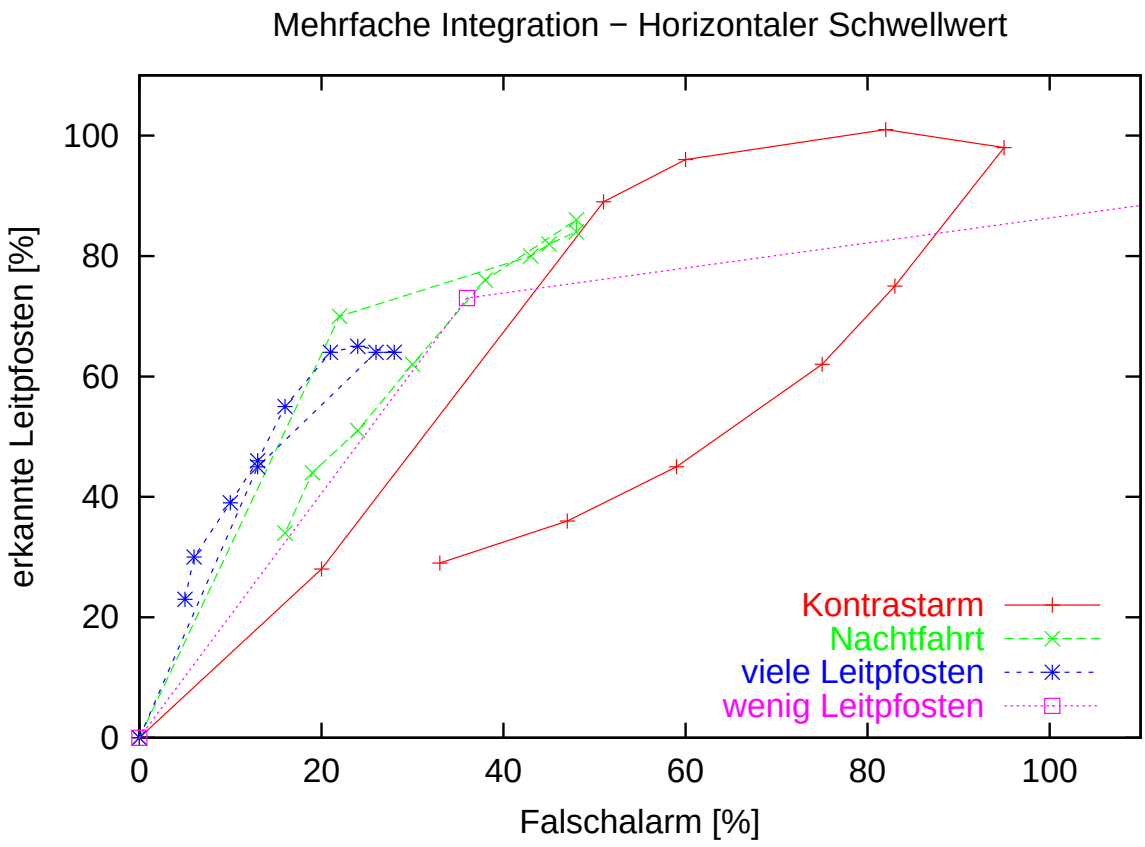
3.5.2 Ergebnisse für die Parameter der Verfahren

Abbildungen 3.16 bis 3.18 zeigen die ROC Kurven für die Schwellwerte des Verfahrens der Integration im zweiten Durchgang. Unter den Diagrammen befinden sich Tabellen, die den subjektiv bestimmten besten Wertebereich für jede der Kurven zu den verschiedenen Sequenzen angeben. Die ROC Kurven zu den Parametern des Integrationsverfahrens werden im Einzelnen erklärt.

Die Kurven in Bild 3.16 gehören zu dem Schwellwert, der die lokalen Maxima im vertikalen Integral des Suchbereichs Leitpfosten zuordnet.
Alle Kurven für die verschiedenen Sequenzen beginnen im Ursprung, da das Verfahren keine Leitpfosten detektiert wenn für diesen Schwellwert eine 0 festgelegt wird. Erhöht man diesen Wert, so steigt auch die Rate der detektierten Leitpfosten, solange der Schwellwert unter den Werten der in den Integralen auftretenden lokalen Maxima der Leitpfosten bleibt. Übersteigt der Schwellwert die lokalen Maxima im Integral, die Leitpfosten repräsentieren, so nimmt die Zahl der detektierten Leitpfosten wieder ab. Je mehr sich der Parameter dem absoluten Maximum der Integralwerte nähert, desto weniger lokale Maxima werden Leitpfosten zugeordnet und die Kurve nähert sich wieder dem Ursprung.

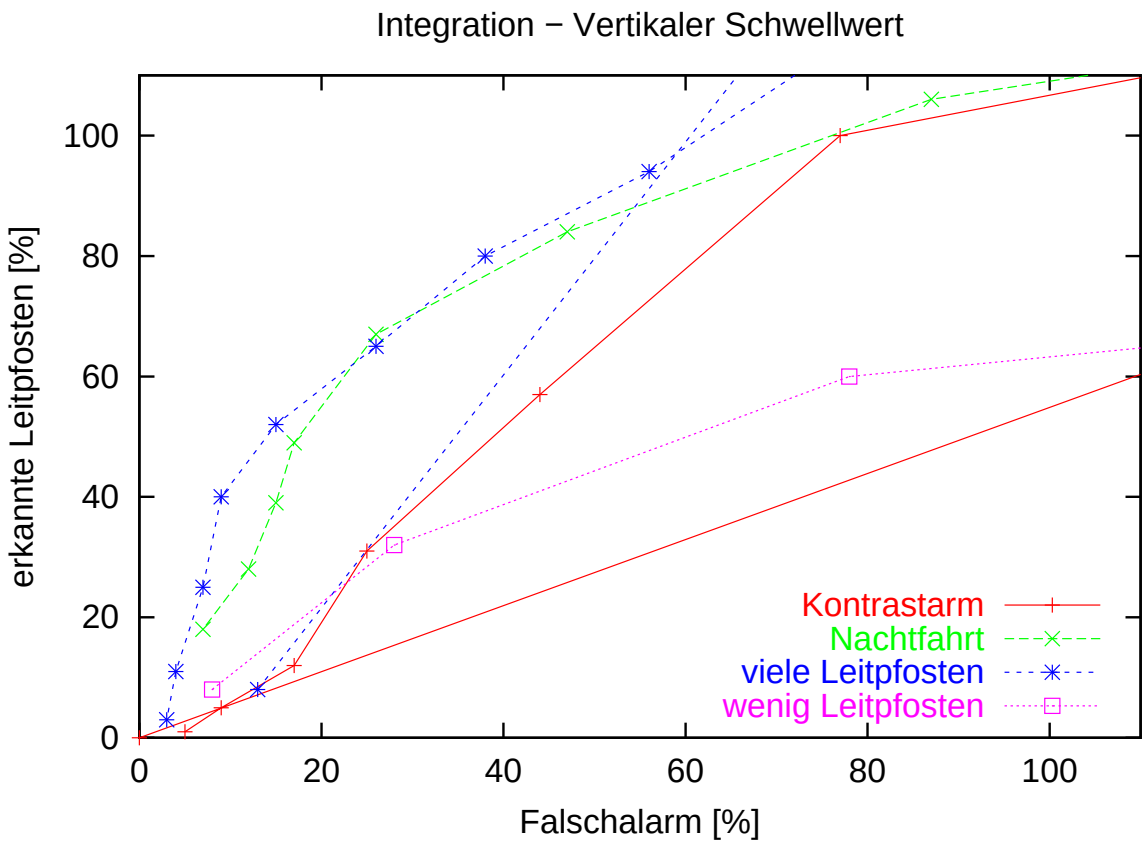
In Abbildung 3.17 wird die ROC Kurve für den vertikalen Schwellwert der Integration festgelegt. Dieser Wert dient der vertikalen Lokalisierung eines detektierten Leitpfostens im Bild. Die Kurve für diesen Parameter verläuft analog zu der oben beschriebenen Kurve in Abbildung 3.16

Die Kurven in Abbildung 3.18 gehören zum Toleranzparameter der Integration. Mit diesem Wert wird festgelegt mit welcher Toleranz die in Kapitel 3.6.2 beschriebenen Geometrieprüfungen für detektierte Leitpfosten durchgeführt werden.
Die Kurve beginnt für den Wert 1.0, der bedeutet, dass die Masse und Verhältnisse der Leitpfosten bildpunktgenau stimmen müssen. Für diesen Wert beginnt die Kurve nicht im Ursprung, da auch mit dieser Einstellung Leitpfosten korrekt detektiert werden. Nimmt der Wert für den Toleranzparameter zu, so werden zunächst neben Falschalarmen auch zusätzliche korrekte Leitpfosten erkannt. Dies sind Leitpfosten, die zum Beispiel schräg stehen, bei nicht ebener Straße auf einem Hügel stehen oder teilverdeckt sind, wodurch die Seitenverhältnisse und Größen der Leitpfosten nicht denen eines geraden, ganz sichtbaren Leitpfostens auf ebener Straße entsprechen. Wurden diese zusätzlichen Leitpfosten detektiert, der Toleranzwert jedoch noch mehr erhöht, so werden nur zusätzliche Falschalarme durch das Verfahren der Integration ausgelöst.
Für den Toleranzparameter wählt man also einen Wert, der kleiner ist als der Schwellwert, ab dem durch das Verfahren der Integration nur noch zusätzliche Falschalarme ausgelöst und keine weiteren korrekten Leitpfosten detektiert werden.



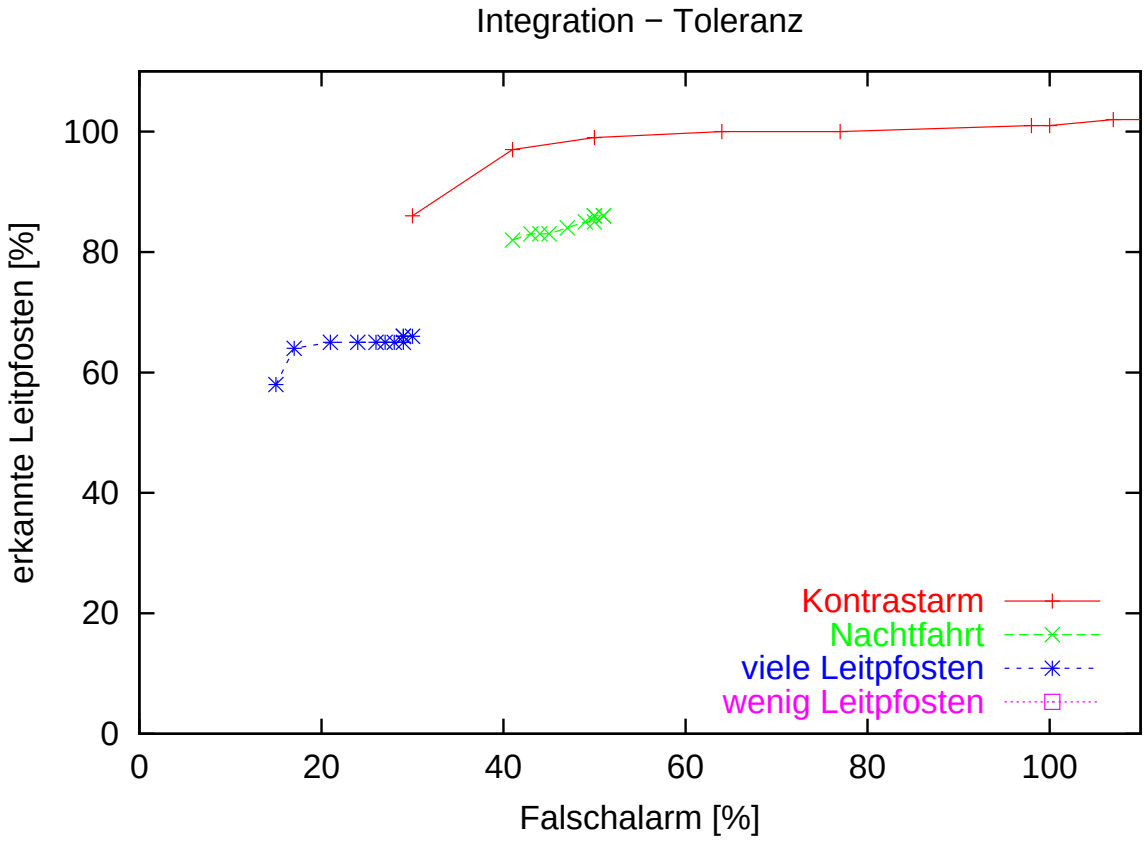
Horizontaler Schwellwert Sequenz	Grauwert [0,255]
Kontrastarm	20-30
Nachtfahrt	10-30
Viele Leitpfosten	50-60
Wenige Leitpfosten	10
Gewählter Wert	40

Abbildung 3.16: ROC Kurve für den vertikalen Schwellwert der Integration



Vertikaler Schwellwert Sequenz	Grauwert [0,255]
Kontrastarm	80-100
Nachtfahrt	80-100
Viele Leitpfosten	40-80
Wenige Leitpfosten	10-100
Gewählter Wert	80

Abbildung 3.17: ROC Kurve für den vertikalen Schwellwert der Integration



Toleranzparameter Sequenz	Faktor [0.0, 100.0]
Kontrastarm	1,5-1,6
Nachtfahrt	1,5-1,6
Viele Leitpfosten	1,5-1,6
Wenige Leitpfosten	1,0-1,5
Gewählter Wert	1,5

Abbildung 3.18: ROC Kurve für den Toleranzparameter der Integration

Die ROC Kurven für die Parameter der Kantenverkettung sind in Abbildung 3.20 zu sehen.
Die Prüfung der Geometrien detektierter Leitpfosten wird bei diesem Verfahren über mehrere Parameter bestimmt, die bei der Suche der Leitpfosten in den Vektorlisten verwendet werden. Der „Toleranz“ Parameter ist für die Toleranz bei der Prüfung der Verhältnisse zwischen Höhe, Breite und Distanz der einzelnen Leitpfosten verantwortlich. Der „Abstand der Vektoren“ gibt an, wie breit ein Leitpfosten maximal sein darf. Der „Winkel zwischen den Vektoren“ gibt die Toleranz bei der Suche nach parallelen Vektoren an. Hier ist eine Toleranz nötig, da die Orientierung der Vektoren, die die binarisierten Kanten der Leitpfosten in den Kamerabildern repräsentieren, von der Orientierung des Leitpfostens selbst abweichen kann. Mit der „Schräglage der Leitpfosten“ wird vorgegeben, wie stark die Orientierung eines Leitpfostens von der Orthogonalen der Straßenebene abweichen kann.

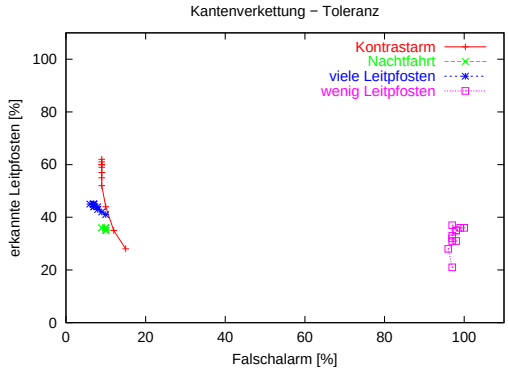
ROC Kurven für weitere Parameter der Kantenverkettung sind in Abbildung 3.20 d) e) und f) dargestellt.
Die Lückenlänge gibt an bis zu welchem Abstand an Bildpunkten Kanten noch zusammengehören. Die „Mindestlänge“ der Leitpfosten gibt die minimale Höhe der Leitpfosten im Bild vor. Der Parameter der „Erosion“ legt fest wie viele % der hellsten Bildpunkte im Kantenbild für die Kantenverkettung durch die in Kapitel 3.2.2 beschriebene Binarisierung verwendet werden.

Die zusammengefassten Ergebnisse für die Parameter der Kantenverkettung sind in Abbildung 3.19 zu sehen.

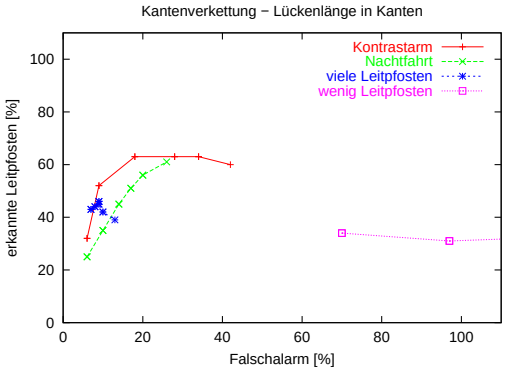
Parameter	Wert	Einheit
Toleranz	1.3	
Winkel zwischen den Vektoren	17	o
Schräglage der Leitpfosten	30	o
Lückenlänge in Kanten	1	Bildpunkt
Mindestlänge der Leitpfosten	4	Bildpunkte
Erosion des Kantenbildes	4	%

Abbildung 3.19: Parameterwerte für die Kantenverkettung

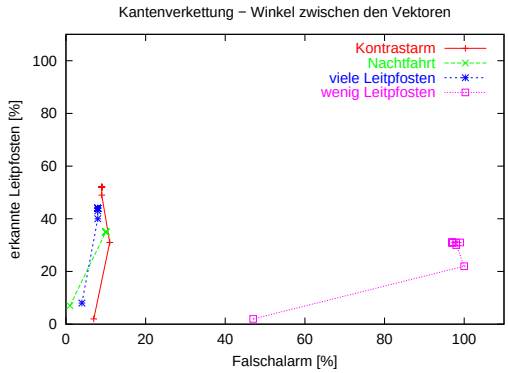
a)



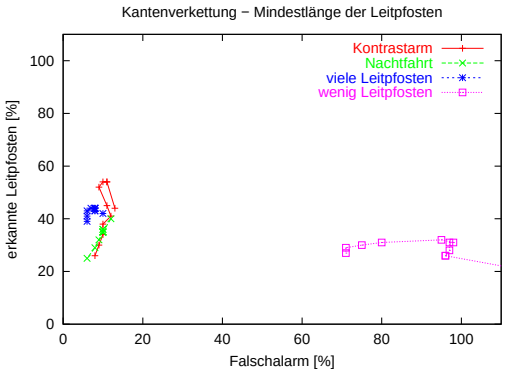
d)



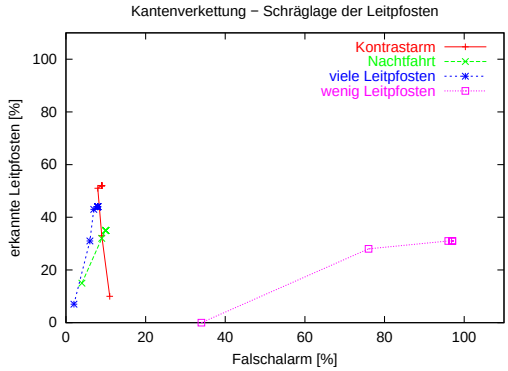
b)



e)



c)



f)

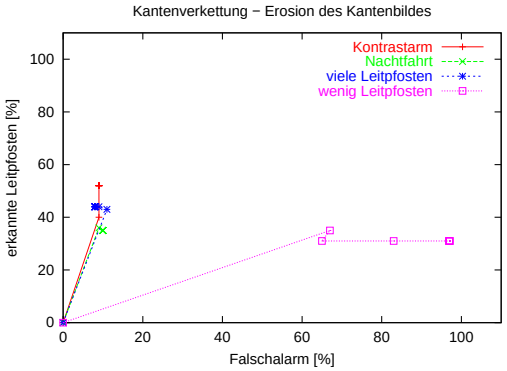


Abbildung 3.20: ROC Kurven für die Parameter der Kantenverkettung

3.6 Geometrien bei der Detektion

3.6.1 Suchbereich

Ein Suchbereich kann im Kamerabild bereits vor der Anwendung der Detektionsverfahren eingeschränkt werden. Eine Eingrenzung des Suchbereichs, auf den die Bildverarbeitungsverfahren angewendet werden müssen, beschleunigt die Suche. Des Weiteren werden falsch erkannte Leitpfosten außerhalb des Suchbereichs im Voraus ausgeschlossen.

Ein Mensch, der ein Auto steuert und sich dabei unter anderem an Leitpfosten orientiert, sucht diese entlang der Straße direkt über dem Boden. Um auch bei der maschinellen Detektion von Leitpfosten den Suchbereich in einem Kamerabild einzugrenzen, wird unter Annahme einer ebenen Straße mit Hilfe der in Anhang A.2 hergeleiteten Gleichungen berechnet, in welchen Bildzeilen korrekt aufgestellte Leitpfosten überhaupt abgebildet werden können.

3.6.2 Plausibilität

Falschalarme bei der Detektion der Leitpfosten können durch Überprüfungen der Geometrien erkannt werden.

Wurden Höhe und Breite eines Leitpfostens im Bild bestimmt, wird mit Hilfe der Kameraparameter überprüft, ob das Verhältnis zwischen Höhe und Breite des erkannten Objekts dem eines Leitpfostens entspricht.
Es wird auch überprüft, ob Höhe und Breite des detektierten Leitpfostens im Bild zur berechneten Entfernung des Leitpfostens passen. Dazu muss zunächst die Entfernung des Leitpfostens, mit der Monokamera wie in Anhang A.2 oder mit der Stereokamera wie in Kapitel 2.3 beschrieben, bestimmt werden.
Des Weiteren wird überprüft, in welcher Höhe sich ein Leitpfosten über einer ebenen Straße befindet. Dazu wird dessen Entfernung mit Stereokameras oder unter der Annahme der fest vorgegebenen Höhe und Breite von Leitpfosten mit Parametern der Monokamera berechnet. Ist die Entfernung bekannt, so wird die Höhe des Leitpfostens über der Straße nach Gleichung (A.18), die in Anhang A.4 hergeleitet wird, berechnet. Um unebene Straßen zu berücksichtigen wird für die Aussortierung von Falschalarmen statt der Höhe über der Straße auch das Verhältnis H_L zwischen dieser Höhe und der Entfernung des Leitpfostens nach Gleichung (3.10) berechnet.

$$H_L = \frac{H_S}{L} \tag{3.10}$$

Teilverdeckungen und Schräglagen, die sich auf Höhe und Breite eines Leitpfostens im Bild auswirken, müssen hierbei beachtet werden. Deshalb müssen auch bei den Geometrieprüfungen der detektierten Leitpfosten Toleranzen berücksichtigt werden.

Um Toleranzen zu berücksichtigen werden zunächst die Abweichung der Geometrien des detektierten Leitpfostenkandidaten zu den Geometrien eines unverdeckten und geradestehenden Leitpfostens in Anteilen zu dessen Größen berechnet. Anschließend werden die so berechneten Plausibilitätswerte mit Schwellwerten verglichen, um falsch erkannte Leitpfosten auszusortieren. Mit Schwellwerten für die Seitenverhältnisse und für die Höhe über der Straße lassen sich Toleranzen der Geometrieprüfungen festlegen.

3.7 Kombinationen von Verfahren

Um Leitpfosten in Kamerabildern zu erkennen muss man sich nicht auf eines der vorgestellten Verfahren beschränken. Es können dazu mehrere Verfahren mittels einer Methodenfusion eingesetzt werden [Levi et al. 2001].

Die Ergebnisse der verschiedenen Verfahren zur Leitpfostendetektion sind nicht identisch. Das Matched Filter liefert nur die Positionen von möglichen Leitpfosten, die Kantenverkettung und Integration jedoch liefern jeweils zu den Positionen auch noch die Größe der Leitpfosten in den Bildern.
Damit ist eine Signalfusion der Kantenverkettung und der Integration möglich. Im Gegensatz dazu ist die Fusion des Matched Filter mit einem anderen Verfahren eine aufwendigere Merkmalsfusionierung.

Die Fusion der Ergebnisse mehrerer Detektoren kann eine Vereinigung oder eine Schnittmenge der Mengen der detektierten Leitpfosten der einzelnen Verfahren sein. Bei der Vereinigung der Ergebnismengen E_A und E_B zweier Verfahren nach Gleichung (3.11) erhält man alle Kandidaten und damit auch alle Falschalarme aus den einzelnen Verfahren. Die Schnittmenge der Ergebnisse nach Gleichung (3.12) verwirft Repräsentanten von Leitpfosten, die nicht von allen Verfahren erkannt wurden.

$$E = E_A \cup E_B \tag{3.11}$$

$$E = E_A \cap E_B \tag{3.12}$$

Um den Aufwand für die Detektion von Leitpfosten über kombinierte Verfahren zu reduzieren, werden Zwischenergebnisse, die von verschiedenen Verfahren benötigt werden, mehrfach verwendet.

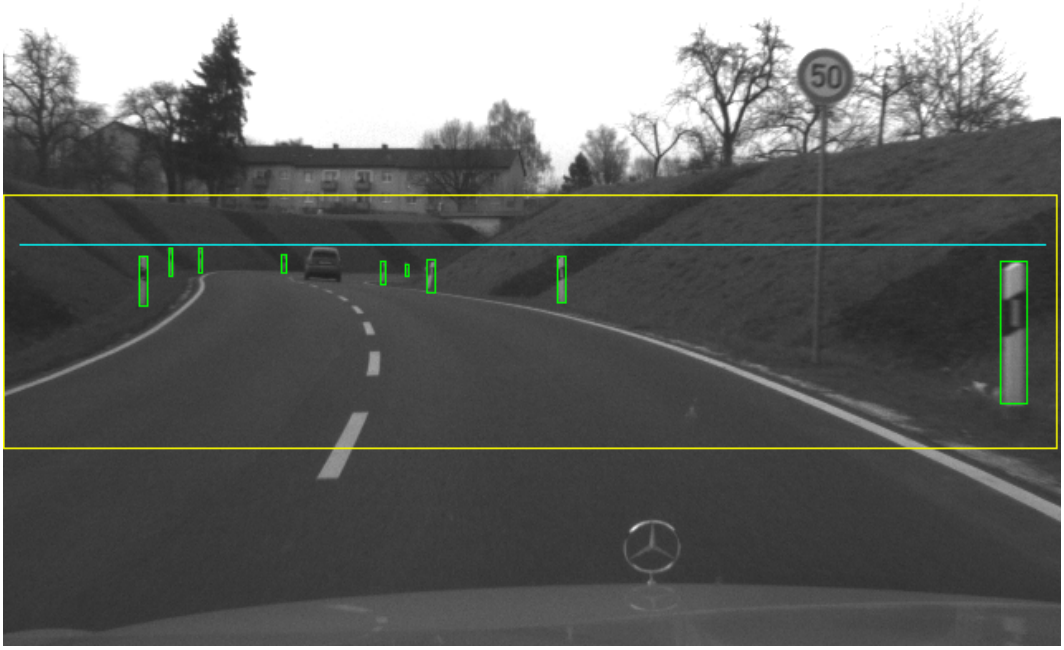


Abbildung 3.21: Ergebnis der kombinierten Anwendung von Integration und Kantenverkettung

Abbildung 3.21 zeigt die Vereinigung der Ergebnismengen der kombinierten Anwendung der Integration und der Kantenverkettung. Die Verfahren wurden dabei auf dasselbe Kamerabild angewendet auf das sie in Abbildung 3.12 und 3.9 bereits einzeln angewendet wurden. Bei der kombinierten Anwendung der Verfahren wurde jedoch das Kantenbild des Ausgangsbildes nur einmal berechnet und anschließend in beiden Verfahren verwendet.

Kapitel 4

Prozeduren der Leitpfostendetektion auf Bildsequenzen

Auf Bildsequenzen lassen sich im Gegensatz zur Detektion auf Einzelbildern Informationen über bereits erkannte Leitpfosten in vorherigen Bildern verwenden.
Die Leitpfostendetektion durch die Bildverarbeitung in Bildsequenzen kann damit zu zwei Prozeduren aufgeteilt werden. Zum einen müssen in den Kamerabildern neu auftretende Leitpfosten erkannt werden, was die „Initialerkennung“ ist. Zum Anderen müssen diese Leitpfosten in den Bildsequenzen verfolgt werden, was „Tracking“ genannt wird.

Die Initialerkennung liefert auf Bildsequenzen auch Leitpfostenkandidaten, die in vorherigen Bildern bereits erkannt wurden. Über das Tracking jedoch können Fehler bei der Detektion bereits erkannter Leitpfosten verringert werden, indem die aktuelle Position der Leitpfosten im Bild aus den Positionen in vergangenen Bildern geschätzt wird. Die Suche der bereits detektierten Pfosten wird dann auf diese Bereiche beschränkt.
Leitpfosten, die in Bildsequenzen nicht in jedem Einzelbild durch die Initialerkennung erkannt werden, jedoch mit Hilfe des Trackings verfolgt werden können, führen zu einer höheren Erkennungsrate der Leitpfostenerkennung.

4.1 Auswahl der Bildverarbeitungsverfahren

Um die in Kapitel 3 bereits vorgestellten Verfahren zur Leitpfostendetektion und ihre Eignung zur Initialerkennung und zum Tracking miteinander zu vergleichen, wurden sie jeweils einmal auf 500 ganze Bilder und dann nochmals auf eingeschränkte Suchbereiche um die Leitpfosten in denselben Bildern angewendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.1 zu sehen. Die 500 Bilder wurden aus der in Abbildung 3.15 b) und d) vorgestellten kontrastarmen Tagsequenz und der Nachtsequenz gewählt. Es wurden diese für die Detektion weniger geeigneten Bilder verwendet um die Unterschiede der Verfahren besser hervorheben zu können.
Der Anteil der falsch erkannten Leitpfosten in der Tabelle ergibt sich aus der Anzahl der tatsächlich vorhandenen Pfosten in den Sequenzen insgesamt. Eine Falschalarmrate von 100% bedeutet eine absolute Anzahl von Falschalarmen, die der Anzahl von tatsächlich vorhandenen Leitpfosten entspricht. Das iterative Matched Filter liefert in ganzen Bildern mehr Falschalarme als tatsächlich Leitpfosten in der Sequenz vorhanden sind. Angewendet in einem Suchbereich werden vom iterativen Matched Filter manche Leitpfosten mehrfach detektiert. Deshalb sind in diesen beiden Fällen die Erkennungsraten höher als 100%.

Verfahren	Im ganzen Bild		Im Suchbereich	
	% korrekt	% falsch	% korrekt	% falsch
Matched Filter anpassend	6	57	48	53
Matched Filter iterativ	39	264	127	84
Kantenverkettung	60	7	56	1
Einfache Integralsuche	-	-	86	5
Mehrfache Integralsuche	57	58	-	-
Kantenverkettung und Integral	78	63	-	-

Abbildung 4.1: Vergleich der vorgestellten Verfahren zur Leitpfostendetektion an Bildern mit schlechten Sichtverhältnissen

4.1.1 Bildverarbeitung der Initialerkennung

Auch bei der Initialerkennung sollte die Position eines detektierten Pfostens im Bild exakt bestimmbar sein, um ein anschließendes Tracking dieses Pfostens zu ermöglichen. Dadurch eignen sich die „Kantenverkettung“ und die „Integration“ besser zur Initialerkennung von Leitpfosten als das „Matched Filter“.
Auch die hohe Falschalarmrate des iterativen Matched Filter Verfahrens und die niedrige Erkennungsrate des selbstanpassenden Matched Filter Verfahrens lassen erkennen, dass sich das Matched Filter zur Initialerkennung nicht eignet.

Das Verfahren der Kantenverkettung hat den Vorteil der geringen Rate an Falschalarmen. Es erkennt aber in den kontrastarmen oder in der Nacht aufgenommenen Bildern nur 60% der Leitpfosten. Auch die mehrfache Integralsuche hat hier keine höhere Erkennungsrate. Erst die Vereinigung der Ergebnisse aus den Verfahren der Kantenverkettung und der mehrfachen Integralsuche liefert eine höhere Erkennungsrate. Versucht man die hohen Falschalarme über die in Kapitel 3.6 beschriebenen Geometrieprüfungen und anhand eines Modells der Straße zu eliminieren, so kann die hohe Falschalarmrate der Vereinigung der Verfahren im Vergleich zur Kantenverkettung alleine akzeptiert werden um auch die höhere Erkennungsrate der kombinierten Verfahren nutzen zu können.

4.1.2 Bildverarbeitung des Trackings

Wegen der hohen Erkennungsrate und der niedrigen Falschalarmrate in einem Suchbereich gegenüber den anderen Verfahren, ist das Verfahren der einfachen Integration für die Bildverarbeitung des Trackings sehr gut geeignet. Beim Verfolgen eines Leitpfostens nimmt dieser einen großen Anteil des Suchbereichs ein und ist damit mit der einfachen Integralsuche gut bestimmbar.

4.2 Ablauf von Initialerkennung und Tracking

In Abbildung 4.2 werden die einzelnen Schritte der Initialerkennung und des Trackings dargestellt und es wird gezeigt, wie diese zum Gesamtablauf der Leitpfostenerkennung in Bildsequenzen zusammengefügt werden. Im Diagramm werden Leitpfosten mit LP abgekürzt.

Für jede Wiederholung des Zyklus der Leitpfostenerkennung ist ein neues Eingangsbild gegeben und die Liste der im letzten Bild erkannten Leitpfosten vorhanden.
Zunächst werden aus dem Eingansbild die Kantenbilder mit Aufwärts- und Abwärtskanten generiert.

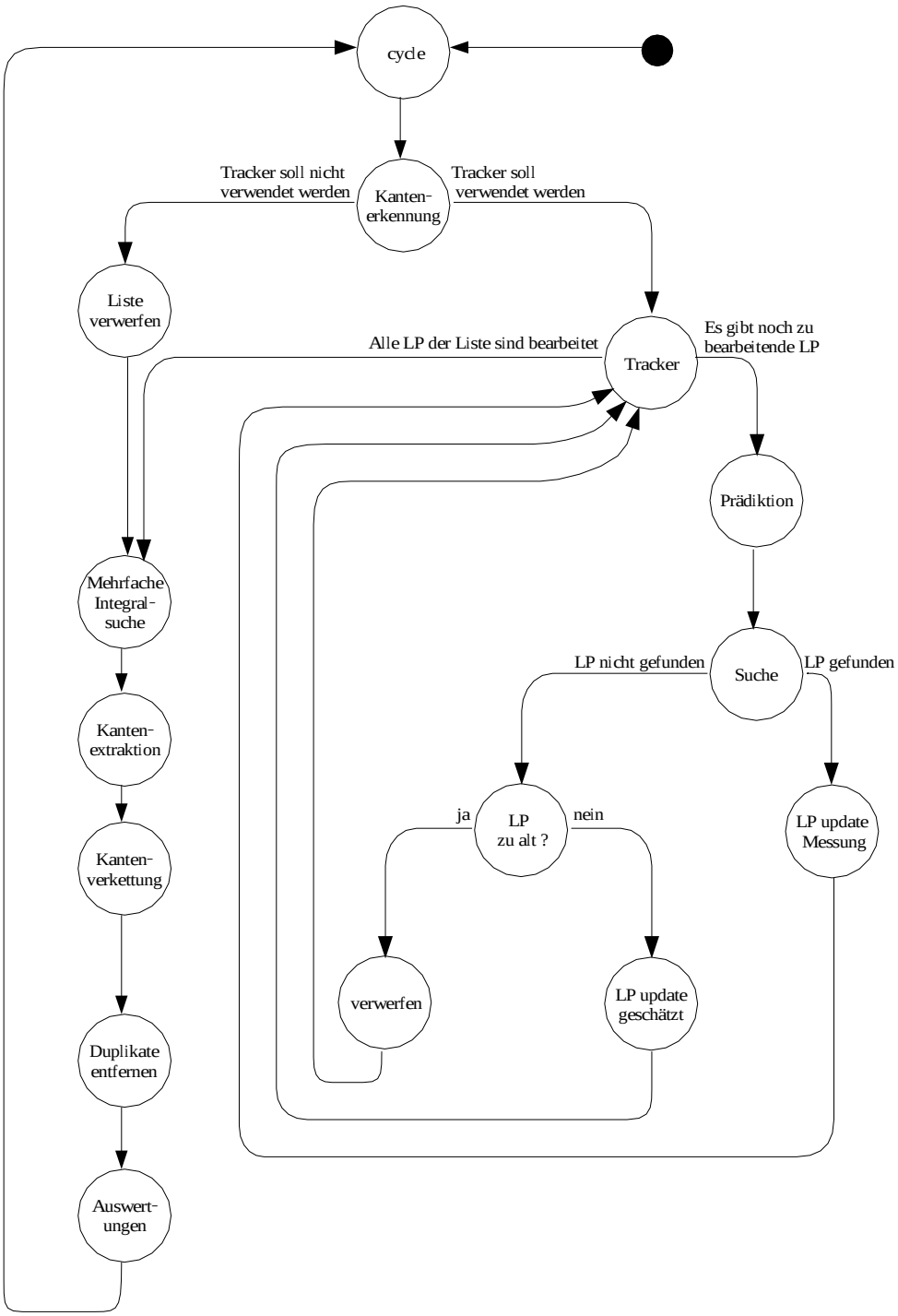


Abbildung 4.2: Ablaufdiagramm der Leitpfostenerkennung

4.2.1 Tracking

Das Tracking erfolgt für jeden im letzten Bild erkannten Leitpfosten in einzelnen Schritten. Erst wird die Position des Leitpfostens im aktuellen Bild geschätzt, dann wird er mit Bildverarbeitungsverfahren gesucht, anschließend seine Position in der Liste der Leitpfosten aktualisiert und zuletzt anhand seines Alters entschieden, ob er verworfen wird.
Für das Tracking wird für jeden Leitpfosten außer der Position und Größe im Bild gespeichert in wie vielen Einzelbildern er bereits verfolgt wurde, wie oft er zuletzt hintereinander durch die Bildverarbeitung nicht mehr gefunden wurde und um wie viele Bildpunkte sich die Position vom vorletzten zum letzten Bild geändert hat.

Die Schätzung der Position im aktuellen Bild ergibt sich aus der Summe der Position des Leitpfostens im letzten Bild und der Disparitäten zwischen den Positionen im letzten und vorletzten Bild.
Bei 25 Bildern pro Sekunde, die im Versuchsträger von den Kameras geliefert werden, und den Bewegungen, die einem Fahrzeug möglich sind, ist diese Schätzung der Position über die erste Ableitung der Position ausreichend, sofern die Suche an der geschätzten Position Abweichungen toleriert.

Um die geschätzte Position des Leitpfostens im Bild wird ein Suchbereich der doppelten Größe des Leitpfostens berechnet, um Fehler bei der einfachen Positionsschätzung zu tolerieren. In diesem Suchbereich wird der Leitpfosten durch die Bildverarbeitung gesucht.

Konnte der Leitpfosten im aktuellen Bild gefunden werden, so werden dessen Position in der Liste der Leitpfosten anhand des Ergebnisses der Bildverarbeitung aktualisiert. Auch die Disparitäten zwischen der Position im letzten und im aktuellen Bild werden berechnet und in der Leitpfostenliste für die nächste Positionsschätzung gespeichert. Das Alter des Leitpfostens wird um ein Bild erhöht und die Anzahl der letzten Bilder, in denen er nicht gefunden wurde, wird auf Null zurückgesetzt.

Konnte der Leitpfosten dagegen von der Bildverarbeitung im Suchbereich um die geschätzte Position nicht wiedergefunden werden, so wird das Alter des Leitpfostens und die Anzahl der letzten Bilder in Folge, in denen der Leitpfosten nicht gefunden werden konnte, jeweils um ein Bild erhöht.
Anschließend wird überprüft, ob der Leitpfosten noch weiterverfolgt werden soll. Dazu wird die Anzahl der letzten Bilder, in denen der Leitpfosten nicht mehr erkannt wurde, mit einem „Haltbarkeits“-Schwellwert des Verfolgers verglichen. Liegt dieser Wert oberhalb des Haltbarkeits-Schwellwertes, so wird der Leitpfosten aus der Liste der weiter zu verfolgenden Leitpfosten entfernt, andernfalls wird die Position des Leitpfostens in der Liste auf die geschätzte Position aktualisiert und die Disparitäten bleiben unverändert, um sie für die nächste Positionsschätzung im folgenden Bild erneut zu verwenden.

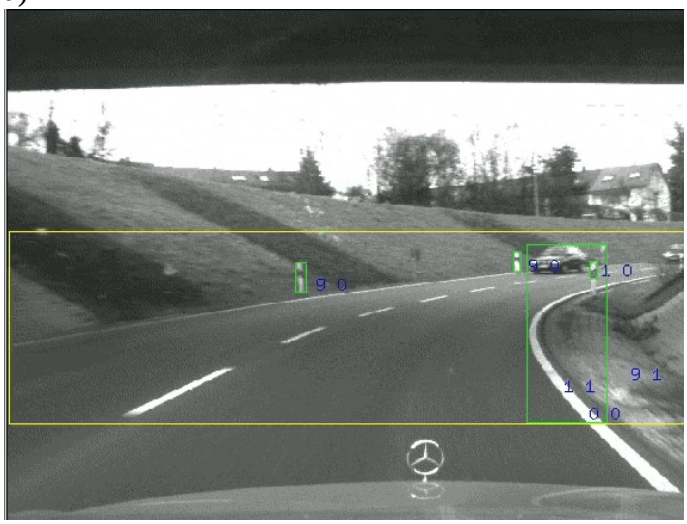
4.2.2 Haltbarkeits-Schwellwert des Verfolgers

Mit dem Haltbarkeits-Schwellwert lässt sich festlegen, über wie viele Bilder ein Leitpfosten weiterverfolgt wird, der nicht mehr erkannt wurde.

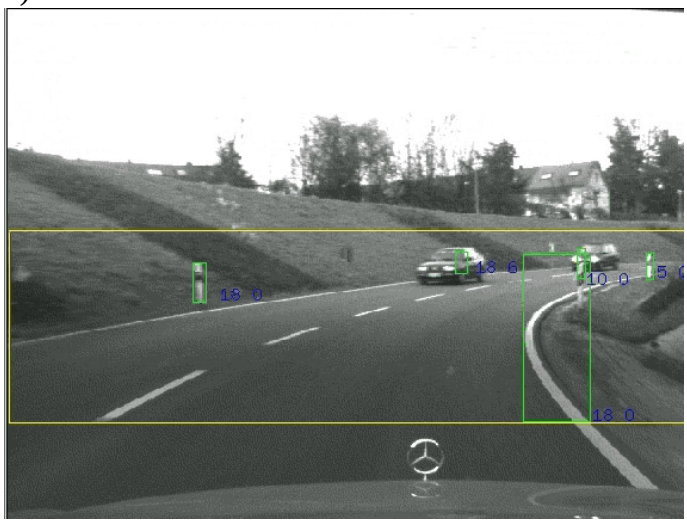
Ein Haltbarkeits-Schwellwert von 0 führt dazu, dass Leitpfosten verfolgt werden und von Bild zu Bild in einem kleinen Suchbereich und nicht im ganzen Bild gesucht werden, wobei die bereits diskutierten Vorteile der einfachen Integralsuche genutzt werden können. Ein Leitpfosten wird bei dieser Einstellung des Verfolgers jedoch sofort verworfen, falls er in einem Bild nicht mehr wiedererkannt werden konnte.
Diese Einstellung führt bereits zu einer höheren Erkennungsrate der Leitpfostendetektion, was durch die Vorteile des Bildverarbeitungsverfahrens des Trackings gegenüber der reinen Initialsuche auf ganzen Bildern ermöglicht wird.

Ein höherer Wert für die Haltbarkeit führt dazu, dass Leitpfosten weiterhin verfolgt werden, auch wenn sie mehrmals hintereinander nicht mehr im Bild gefunden werden konnten. In Abbildung 4.3 ist zu sehen, wie ein Leitpfosten über geschätzte Bildpositionen weiterverfolgt wird, der in Einzelbildern der Sequenz nicht zu sehen ist, da er von einem Fahrzeug des Gegenverkehrs vorübergehend verdeckt wird. Sobald der Leitpfosten vom Fahrzeug nicht mehr verdeckt ist, wird er von der Bildverarbeitung des Trackers wieder erkannt und anhand der gemessenen Bildpositionen weiterverfolgt.
Je höher der Haltbarkeits-Schwellwert des Verfolgers ist, desto länger werden neben Leitpfostenrepräsentanten aber auch Falschalarme in der Bildsequenz weiterverfolgt, wodurch zu höheren Erkennungsraten auch höhere Falschalarmraten des Detektors kommen. Dies ist ebenfalls in Abbildung 4.3 zu sehen.

a)



b)



c)

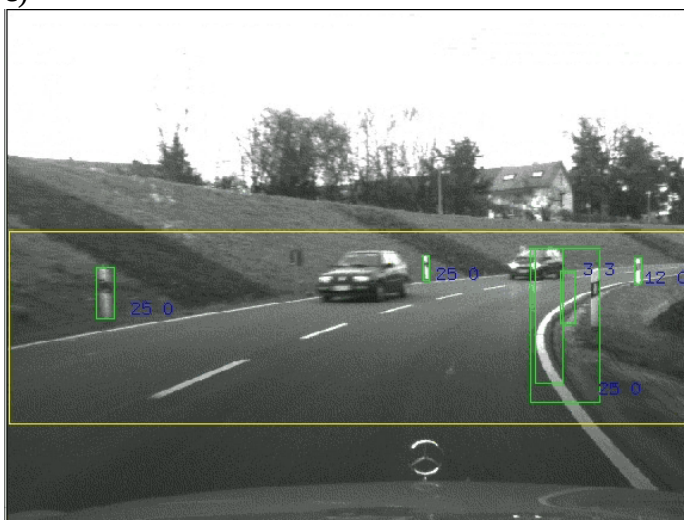


Abbildung 4.3: Leitpfostenverfolgung mit hohem Haltbarkeitsschwellwert in Bildsequenzen:

Der Suchbereich der Initialerkennung ist gelb umrandet, erkannte und verfolgte Leitpfosten sind grün umrandet. Rechts des Fußpunktes der erkannten Leitpfosten sind jeweils zwei blaue Zahlen eingezeichnet. Die linke Zahl ist das Alter des Leitpfostens, also die Zahl der Einzelbilder, über die er bereits verfolgt wird. Die rechte Zahl ist die Anzahl der Einzelbilder, über die er durchgehend bis zum aktuellen Bild durch die Bildverarbeitung nicht mehr erkannt wurde.

a) Beide Leitpfosten am linken Straßenrand sind sichtbar, werden erkannt und verfolgt.

b) Ein Leitpfosten wird von einem Fahrzeug verdeckt. Seine Position im Bild wird geschätzt.

c) Der vorübergehend verdeckte Leitpfosten ist wieder sichtbar. Er wird von der Bildverarbeitung wieder detektiert und wird weiterverfolgt.

4.2.3 Initialerkennung ohne Tracking

Soll das Tracking nicht verwendet werden, so wird es übersprungen und nach der Kantenbildgenerierung zur Inertialerkennung übergegangen, nachdem die Liste der erkannten Leitpfosten verworfen anstatt durch den Tracker aktualisiert wurde.

4.2.4 Initialerkennung

Die Inertialerkennung ist links im Diagramm zu sehen. Auf den Kantenbildern wird die mehrfache Integralsuche durchgeführt. Anschließend werden Kanten extrahiert und die Kantenverkettung durchgeführt. Das Ergebnis der Inertialerkennung ist zunächst die Summe der Ergebnisse der beiden Verfahren. Die neuen Leitpfostenkandidaten werden der Liste der erkannten Leitpfosten hinzugefügt.

Anschließend werden Duplikate aus der Menge der detektierten Leitpfosten entfernt und somit die Vereinigung der erkannten Leitpfosten aus den Ergebnissen der mehrfachen Integralsuche und der Kantenverkettung und aus der Menge der verfolgten Leitpfosten gebildet. Beim Entfernen von Duplikaten aus der Leitpfostenliste wird darauf geachtet, dass zunächst neu erkannte Leitpfosten entfernt werden und bereits verfolgte Leitpfosten erhalten bleiben, deren Bewegung aus den letzten Bildern bekannt ist, was das Verfolgen dieser Leitpfosten erleichtert.
Es können auch Leitpfosten aus der Liste entfernt werden, die durch die in Kapitel 3.6.2 beschriebenen Geometrieprüfungen als Falschalarm eingestuft werden.

Am Ende des Zyklus wird die vorhandene Liste von Leitpfosten für Auswertungen verwendet, die in Kapitel 5 beschrieben werden.

4.3 Ergebnis

Das Verfolgen der Leitpfosten in den Bildsequenzen mit einem Haltbarkeits-Schwellwert von 0 Bildern führt im Vergleich zu den Erkennungsraten der einzelnen Verfahren aus Abbildung 4.1 zu einer Falschalarmrate von 75% ohne die Aussortierung der Falschalarme durch ein Straßenmodell oder die Geometrieprüfungen. Die Erkennungsrate liegt für diesen Schwellwert bereits bei 97%.

Kapitel 5

Auswertungen über erkannte Leitpfosten

Nach der Detektion der Leitpfosten können Auswertungen der gewonnenen Informationen über die Leitpfosten angestellt werden.

Über eine Landmarkennavigation, wie sie in [Kolbe 2000], [Knöppel 2001] oder [Mbuton 2002] beschrieben ist, lassen sich die Geschwindigkeit, die Gierrate und die zurückgelegte Strecke des eigenen Fahrzeugs schätzen.

Mit einem Ansatz, der sich am Straßenmodell der optischen Spurerkennung orientiert, lässt sich eine Spurprädiktion anhand erkannter Leitpfosten durchführen. Über erkannte Leitpfosten lässt sich auch der dreidimensionale Straßenverlauf schätzen.

5.1 Auswertungen verfolgter Leitpfosten

Bei allen Auswertungen von Positionen aus der Leitpfostenerkennung können Informationen aus dem Leitpfostenverfolger berücksichtigt werden.

Leitpfosten, die im aktuellen Kamerabild nicht wiedergefunden wurden und deren Positionen nur zur weiteren Verfolgung geschätzt wurden, sollten nicht zu Auswertungen über die Umgebung des Fahrzeugs oder zur Landmarkennavigation herangezogen werden, da diese Informationen nicht aus Messungen stammen.

Des Weiteren ist es möglich, erkannte Objekte erst für Auswertungen zu verwenden, nachdem sie bereits in mehreren Einzelbildern hintereinander als Leitpfosten erkannt wurden. Dadurch wird die Verwendung der Positionen von Falschalarmen ausgeschlossen, die nur in einzelnen Bildern auftreten. Die Anzahl der Einzelbilder, in denen ein Leitpfosten bereits erkannt wurde, wird für jeden verfolgten Leitpfosten mitprotokolliert.

5.2 Bestimmung von Geschwindigkeit, Gierrate und zurückgelegter Strecke

5.2.1 Modell der Landmarkennavigation

Um die Bewegung, also die Eigengeschwindigkeit und die Gierrate, eines Fahrzeugs zu bestimmen, müssen mindestens zwei Landmarken verfolgt werden. Die Berechnung der Parameter wird in Abbildung 5.1 veranschaulicht.

In Abbildung 5.1 sind die im ersten Zeitschritt vom schwarz eingezeichneten Fahrzeug aus gemessenen Landmarken blau eingezeichnet. Dieselben Landmarken werden im nächsten Zeitschritt erneut vermessen. In der Abbildung sind die neuen, zum Fahrzeug näheren Positionen schwarz eingezeichnet.
Die Translation und Rotation, durch die die zuletzt gemessenen Landmarkenpositionen im lokalen Koordinatensystem in die vorherigen Positionen zurückgeführt werden können, lassen sich im zweidimensionalen Raum berechnen, sofern mehr als zwei Landmarken verfolgt wurden.
Messungenauigkeiten der Positionen können bei der Überführung der einen Punktwolke der Landmarkenpositionen in die andere Punktwolke durch einen Least-Square-Ansatz berücksichtigt werden. Dieser minimiert die Summe der Fehler der Positionsabweichungen zwischen den überführten und gemessenen Landmarkenpositionen zur Berechnung der Translation und Rotation.

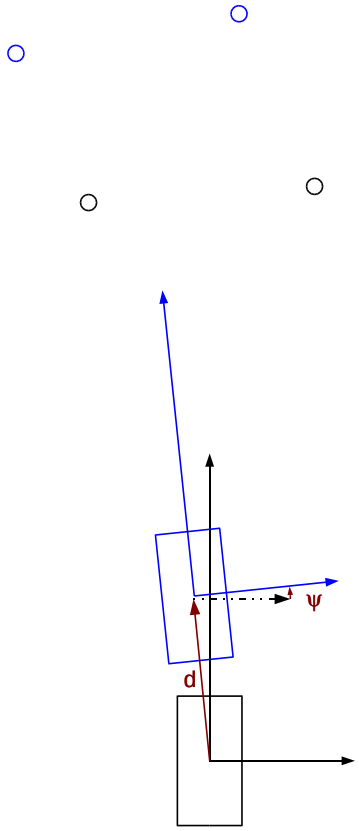


Abbildung 5.1: Landmarkennavigation

Die berechnete Translation und Rotation, die die Überführung der Koordinaten der zweiten Messung zu den Koordinaten der ersten Messung beschreiben, entsprechen der Bewegung des Fahrzeugs zwischen den beiden Zeitpunkten, zu denen die Messungen stattgefunden haben. Die Translation ist die im Zeitschritt zurückgelegte Strecke d und die Rotation entsprechend die Gierrate $\dot{\psi}$ des Fahrzeugs.

5.2.2 Bestimmung der zurückgelegten Strecke

Die zurückgelegte Strecke lässt sich nach der Dead-Reckon-Methode berechnen [Kolbe 2000]. Dabei werden die in den einzelnen Zeitschritten gemessenen Bewegungen des Fahrzeugs in X- und Y-Richtung jeweils integriert. Man erhält dadurch eine Position relativ zur Startposition des Fahrzeugs innerhalb eines festen Koordinatensystems, wie in Abbildung 5.2 verdeutlicht.

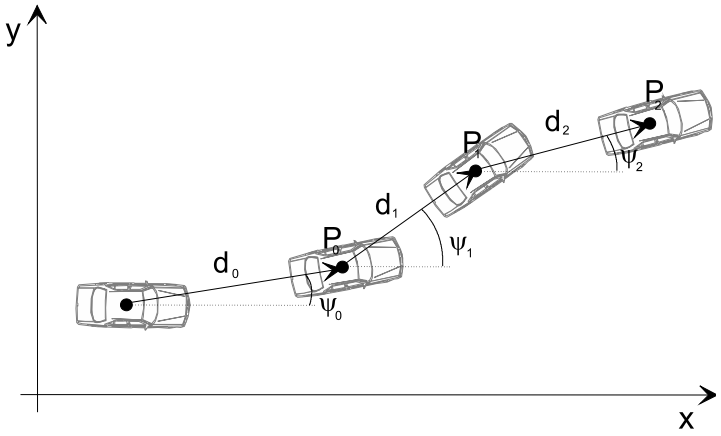


Abbildung 5.2: Positionsbestimmung mittels Dead-Reckon-Methode aus [Knöppel 2001]

Bei der Dead-Reckon-Methode entsteht ein Fehler in der Berechnung der zurückgelegten Strecke, da nicht die gefahrenen Bogen zwischen den Zeitabschnitten gemessen werden sondern jeweils die direkten Strecken zwischen den jeweiligen Positionen. Je kürzer die einzelnen Zeitabschnitte zwischen den Berechnungen sind, desto genauer ist das Ergebnis.

5.2.3 Inertialsensorik

Die eigene Geschwindigkeit und Gierrate lässt sich auch direkt mittels der Inertialsensorik des Fahrzeugs messen. Die Messung der Gierrate selbst ist durch einen Offset und durch eine Temperaturdrift jedoch stark verrauscht. Deshalb wird die Gierrate durch die zusätzliche Messung des Lenkwinkels und der Geschwindigkeiten der einzelnen Räder berechnet. Die gemessene Geschwindigkeit ist abhängig von Luftdruck und Profil der Reifen und weiteren Faktoren ebenfalls verrauscht.

Die gefahrene Wegstrecke d zwischen zwei Abtastzeitpunkten lässt sich nach Gleichung (5.1) über die Geschwindigkeit des Fahrzeugs v und die Zykluszeit δt der Messung berechnen. Aus den einzelnen Radgeschwindigkeiten des Fahrzeugs (v_l linke-, v_r rechte Radgeschwindigkeit) lässt sich die Fahrzeuggeschwindigkeit nach Gleichung (5.2) berechnen. Dabei werden nur die nicht angetriebenen Räder zur Messung herangezogen, da die angetriebenen Räder typischerweise einen so genannten Schlupf während der Fahrt aufweisen. Die dadurch auftretenden Störungen lassen sich nur sehr aufwendig beschreiben. Die Fahrzeugdrehung zwischen zwei Abtastzyklen wird aus der Differenz der Radgeschwindigkeiten nach Gleichung (5.3) berechnet. Dabei stellt s die Spurweite, das heißt den Abstand der beiden gegenüberliegenden Räder, und r_{vr} beziehungsweise r_{vl} die aktiven Radien der rechten und linken Reifen dar. Der aktive Radius eines Reifens ist der Radius, den er typischerweise während der Fahrt aufweist.

Die Drehgeschwindigkeiten ω_{vr} und ω_{vl} lassen sich nach Gleichung (5.4) aus den Radgeschwindigkeiten v_{Reifen} berechnen [Knöppel 2001].

$$d = v \cdot \delta t \tag{5.1}$$

$$v = \frac{v_l + v_r}{2} \tag{5.2}$$

$$\dot{\psi} = \frac{\omega_{vr} r_{vr} - \omega_{vl} r_{vl}}{s} \tag{5.3}$$

$$\omega_v = \frac{v_{Reifen}}{r_{Reifen}} \tag{5.4}$$

Bei der Dead-Reckon-Methode fließen keine Informationen aus der Umgebung in die Berechnung mit ein. Dies ist ein großer Nachteil dieser Methode, da bereits kleine Messfehler mit fortschreitender Zeit in den Berechnungen aufintegriert werden. Diese Integrationsfehler werden ohne Rückkopplung zur Umgebung nicht korrigiert [Kolbe 2000]. Fehlerquellen bei der Eigenpositionsbestimmung durch Inertialsensorik sind nach [Mbuton 2002] :

- Annahmen eines stationären Lenkverhaltens, einer flachen Fahrbahn und vernachlässigbarem Seitenwind treffen nicht immer zu.
- Bei niedriger Geschwindigkeit liefert der Geschwindigkeitssensor falsche Werte aufgrund der Diskretisierung der Raddrehzahlmessung.
- Der Lenkwinkelsensor liefert baubedingt Offsets des Lenkwinkels, die aufintegriert zu erheblichen Positionsfehlern führen.
- Ein Gierratensensor zur Messung der Drehbewegung vermindert den Einfluss von Straßenneigung und Seitenwind. Doch auch dieser Sensor führt zu Fehlmessungen durch einen Offset und eine Temperaturdrift.

In [Knöppel 2001] werden Fehlerbetrachtungen zu den einzelnen Messfehlern angestellt und Korrekturfaktoren eingeführt. Diese sind vom Luftdruck der Reifen und deren Abnutzung, von der Geschwindigkeit und vom Fahrverhalten abhängig. Insgesamt ergibt sich für die Gierrate

$$\dot{\psi}_{Mess} = \dot{\psi}_{Real} + \dot{\psi}_{Offset} \tag{5.5}$$

Für genauere Betrachtungen der fahrdynamischen Thematik wird auf [Zomotor 1987], [Richter 1990] und [Wachter 2000] verwiesen.

5.2.4 Fusion von Inertialsensorik und Landmarkennavigation

5.2.4.1 Modell und Kalmanfilter

Durch eine Rückkopplung aus der Umgebung lassen sich die Offsets der Messungen der Inertialsensorik ausgleichen. Dazu wurde in [Kolbe 2000] nach [Kalman 1960] ein Kalmanfilter entworfen, in [Knöppel 2001] übernommen und in [Mbuton 2002] erweitert, das zusätzlich zur Position des Fahrzeugs in einem festen Koordinatensystem dessen Gierwinkel für jeden Zeitschritt im Zustand mitschätzt. Fehler der Messungen der Inertialsensorik werden vom Filter anhand von Landmarkenpositionen, die in die Messgleichungen einfließen, berücksichtigt.

Das Bewegungsmodell des eigenen Fahrzeugs relativ zum initialen Koordinatensystem der Straße lässt sich nach folgendem Differenzialgleichungssystem beschreiben [Kolbe 2000]:

$$\dot{x} = v \cdot \cos\psi \tag{5.6}$$
$$\dot{y} = v \cdot \sin\psi \tag{5.7}$$
$$\dot{\psi} = \dot{\psi}_{Sensor} \tag{5.8}$$

Der Zustandsvektor des Filters zum linearisierten Modell ist [Kolbe 2000]:

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \end{bmatrix} \tag{5.9}$$

Die in [Kolbe 2000] hergeleiteten Messgleichungen (5.10) und (5.11) zum Filter mit den Positionen x_i' und z_i' einer Landmarke i sind die mathematische Formulierung der Messgröße als Funktion der Zustandsgrößen

$$h_1(x) : x_i' = -(x_i - x) \cdot \cos\psi - (y_i - y) \cdot \sin\psi \tag{5.10}$$
$$h_2(x) : z_i' = -(x_i - x) \cdot \sin\psi - (y_i - y) \cdot \cos\psi \tag{5.11}$$

In [Kolbe 2000] und [Knöppel 2001] werden Fahrbahnmarkierungen zur Landmarkennavigation herangezogen. Beim hierbei verwendeten Filter kommt es nur auf die Drehung des Fahrzeugs an. Diese wird im Filterzustand mitgeschätzt, nicht jedoch die Geschwindigkeit, die ebenfalls durch die Landmarken bestimmt werden könnte. Die Fahrbahnmarkierungen lassen sich leicht im Bild verfolgen, sie sind ausreichend um die Gierrate des Fahrzeugs zu bestimmen [Kolbe 2000].

5.2.4.2 Ergebnisse

In [Kolbe 2000] wurde untersucht, wie sich die Anzahl der gemessenen Landmarken auf die Schätzung der absoluten Fahrzeugposition auswirkt. Die übernommenen Ergebnisse sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

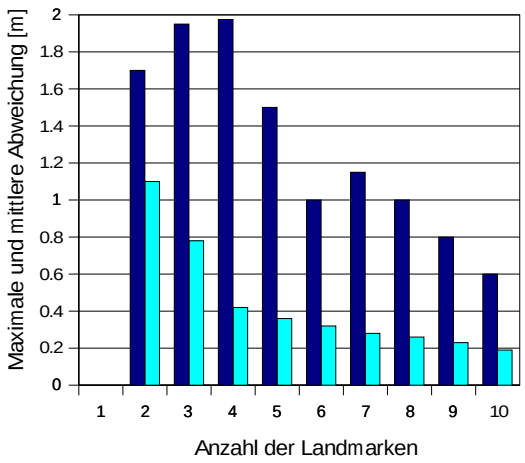


Abbildung 5.3: Positionsfehler in Abhängigkeit der Anzahl an Landmarken

In [Knöppel 2001] wurde eine Häufigkeitsverteilung von detektierten Landmarken auf Fahrbahnmarkierungen bei Fahrten auf Autobahnen und Schnellstraßen erhoben, die in Abbildung 5.4 dargestellt ist.

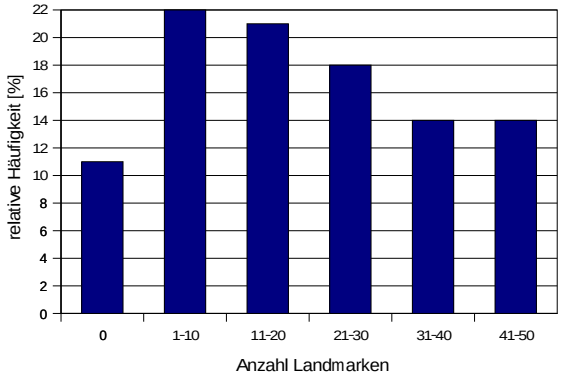


Abbildung 5.4: Häufigkeitsverteilung von auf der Fahrspur detektierten Landmarken

Eine Gegenüberstellung der abgefahrenen Strecke eines Fahrzeugs, ermittelt durch Raddrehzahlen alleine und durch Fusion aus Landmarkennavigation und Raddrehzahlen ist in Abbildung 5.5 zu sehen. Die Zuordnung eines anderen Fahrzeugs zu einer Spur der Straße ist nur bei ausreichend genauer Messung der abgefahrenen Strecke möglich.

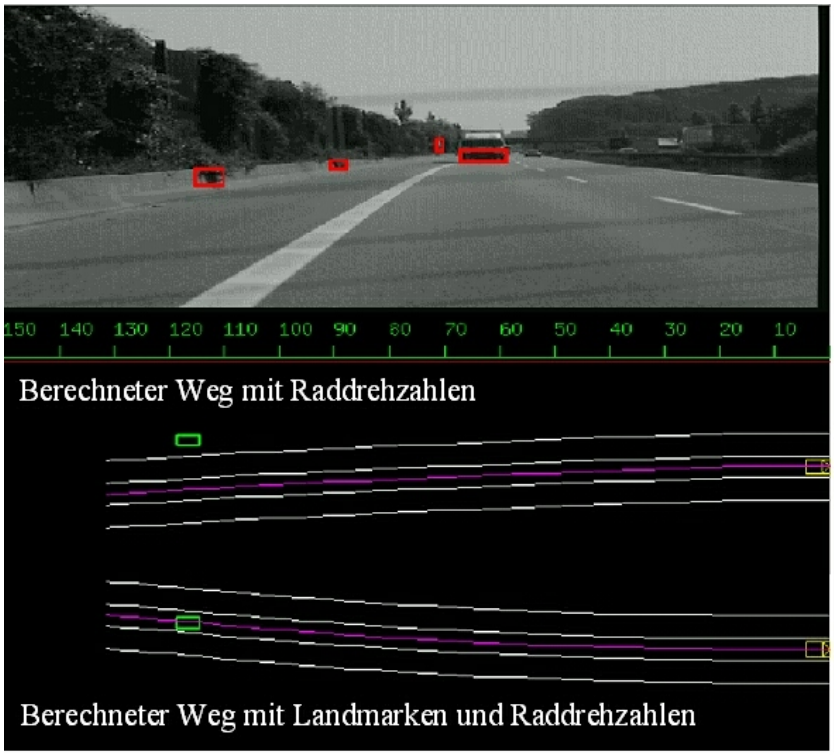


Abbildung 5.5: Berechnete abgefahrene Strecke aus [Knöppel 2001]

Wird dieses Modell der Landmarkennavigation zusätzlich auf Landstraßen eingesetzt, so wird sich die relative Häufigkeit von 0 gemessenen Landmarken noch erhöhen, da Spurmarkierungen auf Landstraßen nicht zwingend vorhanden sind.

5.2.4.3 Erweiterung der Landmarkennavigation durch die Leitpfostenerkennung

Um die Anzahl der gemessenen Landmarken zu erhöhen und somit den Fehler der Positionsbestimmung zu verringern lässt sich die Leitpfostenerkennung verwenden. Für weitere Landmarken neben den bereits verwendeten Fahrbahnmarkierungen muss festgestellt werden, ob diese jeweils stationär sind, was eine Voraussetzung für die Landmarkennavigation ist. Für Landmarken aus der Leitpfostenerkennung ist diese Bedingung erfüllt.

Zur Navigation können nur Landmarken verwendet werden, die in aufeinander folgenden Positionsbestimmungen eindeutig wiedererkannt werden. Bei der Leitpfostenerkennung geschieht die Zuordnung aufeinander folgender Messungen zu einem Objekt bereits im Tracker der Leitpfosten, der in Kapitel 4.2.1 vorgestellt wurde.

5.2.5 Fusion zur redundanten Eigenpositionsbestimmung

In [Knöppel 2001] wurden Landmarken nur in Verbindung mit der Inertialsensorik des Fahrzeugs zur Bestimmung der zurückgelegten Strecke verwendet. [Mbuton 2002] stellt ein System vor, dass Informationen aus der Landmarkennavigation, der Inertialsensorik und einer Positionsbestimmung eines GPS-Empfängers fusioniert. Das Ergebnis ist eine redundante Eigenpositionsbestimmung und Schätzung der eigenen Geschwindigkeit und Gierrate des Fahrzeugs.

In [Mbuton 2002] wurde die Landmarkennavigation nur anhand einer Simulation und anhand einer einfachen Landmarkenerkennung untersucht, die Objekte durch eine Hough-Transformation des ganzen Kamerabildes ermittelt.

Eine robustere Landmarkendetektion, die im Gegensatz zum Verfahren, das für die Untersuchungen herangezogen wurde, nur stehende und über mehrere Zeitschritte verfolgte Objekte liefert, wurde hierfür noch nicht ausgearbeitet.
Die Leitpfostenerkennung kann mit diesem System verbunden werden.

5.3 Spurprädiktion

Teil der Aufgabenstellung zur Leitpfostenerkennung ist eine zur optischen Spurerkennung nach [Franke et al. 1994] parallele, unabhängige und redundante Spurprädiktion.

Der Straßenverlauf im Sichtbereich der Kamera soll geschätzt werden. Im Einsatz des Systems soll der geschätzte Straßenverlauf mit dem der optischen Spurerkennung verglichen werden können. Des Weiteren sollen Informationen über den Straßenverlauf auch dann verfügbar sein, wenn Leitpfosten neben der Straße vorhanden sind, jedoch Spurmarkierungen fehlen, die die Grundlage für die optische Spurerkennung sind.

Es werden in dieser Arbeit zwei verschiedene Modelle für Straße und Fahrzeug für eine Spurprädiktion durch die Leitpfostenerkennung untersucht und verglichen.
Das erste Straßenmodell wird aus den bereits vorgestellten Modellen der optischen Spurerkennung abgeleitet und besitzt sechs Freiheitsgrade. Im Gegensatz zu den Fahrbahnmarkierungen bieten die Leitpfosten entlang der Straße in jedem Einzelbild der Kamera nur wenige Messpunkte des Straßenverlaufs. Deshalb wird ein weiteres Modell zur Spurprädiktion entwickelt, das auch weniger Freiheitsgrade enthält. Das zweite Modell zur Spurprädiktion ist eine Vereinfachung des ersten Modells mit nur vier Freiheitsgraden.

5.3.1 Straßenmodell mit Krümmungsänderung

Für die Beschreibung der Straße und des Fahrzeugs zur Spurprädiktion aus der Leitpfostenerkennung eignen sich Modelle, die aus denen der optischen Spurerkennung, welche in Kapitel 2.4 vorgestellt wurden, abgeleitet sind. Werden zur Beschreibung des Straßenverlaufs dieselben Parameter verwendet, so sind diese auch in Ergebnissen beider Systeme direkt vergleichbar.

Die Messgleichung des Kalmanfilters der optischen Spurerkennung nach [Kalman 1960] beruht auf einem Straßenmodell, dessen Referenzpunkt die Kamera im Fahrzeug ist. Die Straßenbreite b und der Offset innerhalb der Spur werden bei diesem Modell anhand der Spurmarkierungen auf der Straße definiert, wie es in Abbildung 5.6 blau eingezeichnet ist.

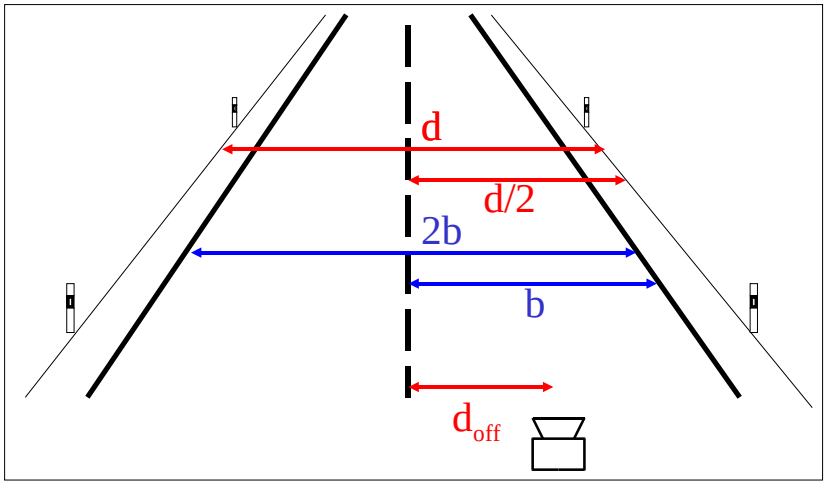


Abbildung 5.6: Straßenmodelle zur Messgleichung der Spurprädiktion

Bei der Leitpfostenerkennung werden die Spurmarkierungen der Straße nicht erfasst. Das gesamte Straßenmodell muss auf die Positionen der erkannten Leitpfosten gestützt werden. Deshalb muss das Straßenmodell aus der optischen Spurerkennung für die Spurprädiktion aus der Leitpfostenerkennung abgeändert werden.
Die Straße wird als Bereich zwischen den Leitpfosten festgelegt. Damit wird eine Straßenbreite d definiert, die dem Abstand der Leitpfosten oder der Kurven durch die Leitpfosten am linken und rechten Straßenrand entspricht. In Abbildung 5.6 ist die neu definierte Straßenbreite rot eingezeichnet.

Gleichung (5.12) kann verwendet werden, um die geschätzte Spurbreite basierend auf Fahrbahnmarkierungen mit der Straßenbreite, die auf Messungen der Leitpfostenerkennung basiert, im Einsatz zu vergleichen. Dabei wird von einer zweispurigen Straße ausgegangen und berücksichtigt, daß Leitpfosten einen Abstand von 50 cm zum Straßenrand haben.

$$d = 2b + 1\mathrm{m} \tag{5.12}$$

Zum übernommenen Straßenmodell kann auch das Kalmanfilter und dessen Messgleichung der optischen Spurerkennung übernommen werden, welche in Kapitel 2.4 vorgestellt wurden. Um die neue Definition der Spurbreite zu berücksichtigen wird in der Messgleichung lediglich die Spurbreite b durch die Spurbreite d ersetzt. Der neue Parameter dient dazu, die neue Semantik innerhalb der Gleichung zu verdeutlichen. Somit ergibt sich aus Gleichung (2.9) die Messgleichung (5.13), die auf denselben dynamischen und kinematischen Modellen beruht wie die optische Spurerkennung, welche in Kapitel 2.4.2 bereits beschrieben wird.

$$x_i = \frac{f_x}{L}(a \cdot d - d_{off} - \Delta\psi \cdot L + \frac{c_0}{2} \cdot L^2 + \frac{c_1}{6} \cdot L^3) \tag{5.13}$$

Das Kalmanfilter zu diesen Modellen, das auch in der optischen Spurerkennung eingesetzt wird, ist in Anhang C beschrieben.

5.3.2 Entwurf einer vereinfachten Spurprädiktion

Bei der Spurprädiktion durch die optische Spurerkennung sind in jedem Einzelbild der Kamera Messwerte für Spurmarkierungspositionen in jeder Bildzeile vorhanden. Im Gegensatz dazu muss bei der Spurprädiktion auf Basis der Leitpfostenerkennung die Spur anhand von nur wenigen Messwerten geschätzt werden. Leitpfosten sollen auf Landstraßen so angebracht werden, dass von einem Fahrzeug aus fünf Leitpfosten erkennbar sind [Giesa 1999]. Durch den begrenzten Blickwinkel von Kameras und durch Verdeckungen durch Gegenverkehr und andere Verkehrsteilnehmer sind in vielen Einzelbildern deutlich weniger als fünf Leitpfosten sichtbar.
Deshalb soll untersucht werden ob eine Spurschätzung anhand eines einfacheren Straßenmodells, das weniger Freiheitsgrade enthält, robustere Ergebnisse liefert.

Das Modell zur Spurprädiktion aus der optischen Spurerkennung wird auf vier Freiheitsgrade vereinfacht. Es werden nur der Offset des Fahrzeugs in der Spur, die Gierrate des Fahrzeugs, die Krümmung der Straße und die Straßenbreite geschätzt. Der entsprechende Zustandsvektor x ist in Gleichung (5.14) dargestellt.

$$x = \begin{bmatrix} x_{off} \\ \dot{\psi} \\ c_0 \\ d \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

Der Nickwinkel α der Kamera und eine Krümmungsänderung der Straße werden in diesem Modell nicht berücksichtigt.
Damit wird das Modell der Straße auf eine konstante Krümmung reduziert. Gleichung (2.7), die das Straßenmodell der optischen Spurerkennung beschreibt, wird vereinfacht zu $c(L) = c_0$.
Der Nickwinkel der Kamera wird ebenfalls als konstant angenommen und im Modell nicht mitgeschätzt.

Das kinematische und dynamische Modell aus den Differenzialgleichungen (2.10) bis (2.15), das das Fahrverhalten nach [Schwarzinger 1998] beschreibt, wird vereinfacht zu:

$$\dot{x}_{off} = v \cdot \Delta\psi + v_q \tag{5.15}$$
$$\dot{\Delta\psi} = \dot{\psi}_{veh} - c_0 \cdot v \tag{5.16}$$
$$\dot{c}_0 = 0 \tag{5.17}$$
$$\dot{d} = 0 \tag{5.18}$$

Die laterale Position x eines Leitpfostens wird durch Gleichung (5.19) beschrieben, die auf einer konstanten Straßenkrümmung beruht. Auf die einzelnen Parameter wurde im Detail bereits in Kapitel 2.4 eingegangen.

$$x = a \cdot d - d_{off} - \Delta\psi L + \frac{1}{2} c_0 L^2 \tag{5.19}$$

Zum vereinfachten Modell der Spurprädiktion muss das Kalmanfilter zur Schätzung der Parameter neu entworfen werden.

Die vereinfachte Messgleichung, die eine Beziehung zwischen der Position eines Leitpfostens und dessen Fußpunkt im Bild an Position $P_i(x_i, y_i)$ beschreibt, ist in Gleichung (5.20) und (5.21) dargestellt. Diese sind aus den Gleichungen (2.9) und (2.8) der optischen Spurerkennung abgeleitet.

$$x_i = \frac{f_x}{L}(a \cdot d - d_{off} - \Delta\psi \cdot L + \frac{c_0}{2} \cdot L^2) \tag{5.20}$$
$$L = \frac{H}{\alpha + (y_i / f_y)} \tag{5.21}$$

Die Transitionsmatrix, die Eingangsmatrix, die Kovarianzmatrix und die Jacobimatrix des erweiterten, diskreten Kalmanfilters zum vereinfachten Modell der Spurprädiktion werden in Anhang C.2 hergeleitet.

5.3.3 Spurprädiktion und Falschalarm der Detektion

Die Spurprädiktion wird dazu verwendet weitere Falschalarme der Detektoren zu erkennen. Leitpfosten sind nur am Straßenrand aufgestellt. Ist der Straßenverlauf bekannt, so können Leitpfostenkandidaten, deren Position nicht zum Straßenverlauf passt als Falschalarm ausgemacht werden.
Dies geschieht bereits innerhalb des Filters der Spurprädiktion.

Eine wichtige Aufgabe der Filterung im Allgemeinen ist das Erkennen von Fehlmessungen. Unter der Annahme gaußverteilter Störungen sind die einzelnen Elemente y_i des Messvektors $y_k = [y_1, y_2, \ldots, y_p]^T$ zum Zeitpunkt k normalverteilt mit Mittelwert μ_i und Standardabweichung σ_i [Mysliwetz 1990]. Dabei sind die Mittelwerte μ_i die jeweils prädizierten Ausgänge

$$\mu_i = \tilde{y}_i \tag{5.22}$$

Wird das Modellrauschen [Brammer et al. 1994] vernachlässigt, so ergeben sich die Standardabweichungen nach [Trzebiatowski 2003b] durch die Diagonalelemente S_{ii} der Innovationskovarianz S_k nach Gleichung (5.23).

$$\sigma_i = \sqrt{S_{ii}}. \tag{5.23}$$

Bei einer Normalverteilung liegen 68% aller Werte innerhalb eines Intervalls der Breite 2σ um den Mittelwert μ [Bronstein et al. 1997]. Abbildung 5.7 zeigt diesen Bereich im Intervall $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ grün schraffiert.

PSfrag replacements

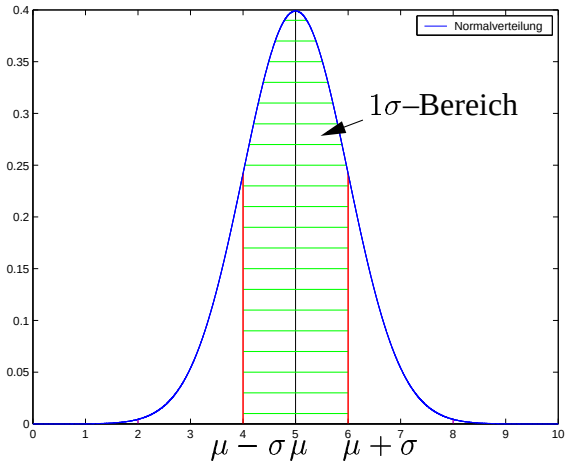


Abbildung 5.7: aus [Trzebiatowski 2003b]
Normalverteilung mit $\mu = 5$ und $\sigma = 1$. Der 1σ–Bereich ist grün schraffiert.

Des Weiteren liegen $99,7\%$ aller Messwerte in dem Bereich $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$, dem so genannten 3σ–Bereich. Nach dem Prinzip des Range-Gating nach [Blackman 1986] wird ein Messwert, der außerhalb des 3σ–Bereichs liegt, als Messwertausreiser erkannt und geht nicht in die Zustandsschätzung ein. Zur Verbesserung des prädizierten Zustands werden also nur Messwerte verwendet, für die gilt:

$$|y_i - \tilde{y}_i| < 3\sigma_i. \tag{5.24}$$

Für die Spurprädiktion im Speziellen gilt: Von der Filterung ausgemachte Messwertausreiser gehen nicht in die Schätzung der Spur ein und werden der Leitpfostenerkennung zurückgemeldet, damit die erkannten Falschalarme nicht für weitere Auswertungen verwendet und in weiteren Bildern verfolgt werden.

5.4 Dreidimensionales Modell der Straße

Die Leitpfosten lassen sich dazu verwenden, den dreidimensionalen Verlauf einer Straße, also Steigungen und Gefälle sowie Querneigungen mit Hilfe einer Monokamera zu messen. Ist die Größe eines Objektes bekannt, so lässt sich aus einem zweidimensionalen Kamerabild dessen Position in 3 Dimensionen berechnen.
Dazu können Objekte vermessen und im Bild verfolgt werden. Die Größe von Leitpfosten und ihre Höhe über der Straße jedoch ist immer gegeben und konstant. Damit eignen sich die Leitpfosten sehr gut um den Straßenverlauf nicht nur in der Ebene sondern dreidimensional zu bestimmen.

Die Entfernung z eines Leitpfostens lässt sich anhand der in Anhang A.1 vorgestellten Gleichungen aus dessen Höhe und Breite in Bildpunkten berechnen. Ist die Entfernung bekannt, so lässt sich die laterale Position x berechnen. Des Weiteren ergibt sich die Höhe $y = h_P$ des Leitpfostens aus der in Anhang A.4 vorgestellten Gleichung (A.18). Dabei wird die Höhe h_P eines Punktes über der Ebene berechnet, auf der das Fahrzeug steht.

Mit Hilfe der diskreten dreidimensionalen Leitpfostenpositionen lässt sich der gesamte Verlauf der Straße interpolieren.
Die Spurprädiktion aus Kapitel 5.3 ordnet die Leitpfosten der linken und rechten Straßenseite zu. Die Höhen dieser Leitpfosten lassen sich für den linken und rechten Straßenrand getrennt übernehmen. Damit erhält man für jeden Straßenrand Höhen zu diskreten Entfernungen. Die Höhe einer Straßenseite zu einer beliebigen Entfernung wird aus diesen Werten linear interpoliert, wie es in Abbildung 5.8 grün für die rechte und rot für die linke Straßenseite eingezeichnet ist.

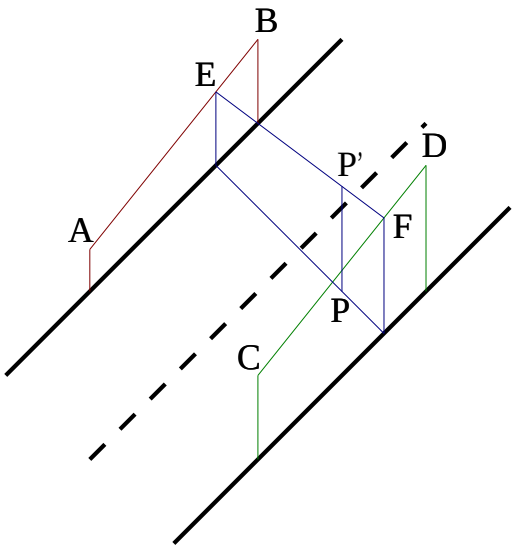


Abbildung 5.8: Straßenhöhe bilinear interpoliert

Punkte A und B sind Positionen von Leitpfosten auf der linken und Punkte C und D auf der rechten Straßenseite. Die Höhe der Straße zur Entfernung P_Z des Punktes P entspricht auf der linken Straßenseite dem Punkt E und auf der rechten Straßenseite dem Punkt F.
Die Höhe y eines beliebigen Punktes P' auf der Straße über dem Punkt P auf der Ebene, auf der das Fahrzeug steht, wird aus den gemessenen Höhen der Leitpfosten wie in Abbildung 5.8 dargestellt bilinear interpoliert.

Durch die Trennung der gemessenen Höhen für jede Straßenseite läßt sich auch die Querneigung der Straße in Abhängingkeit der Entfernung vom Fahrzeug berechnen. Dazu werden aus den Messungen die Höhen der Punkte E und F jeder Straßenseite interpoliert und nach Gleichung (5.25) die Querneigung β der Straße zur entsprechenden Entfernung berechnet.

$$\beta = \arctan\left(\frac{F_y - E_y}{d}\right) \tag{5.25}$$

Kapitel 6

Experimentelle Ergebnisse

Die beschriebenen Verfahren und Modelle wurden im Versuchsträger und an mehreren Sequenzen im Labor getestet. Auszüge der Ergebnisse sind in diesem Kapitel dargestellt.
Auf die Erkennungsraten der Detektion und Ergebnisse der Verfolgung der Leitpfosten wurde in Kapitel 3 und 4 bereits eingegangen. In diesem Kapitel werden Kamerabilder aus den verwendeten Sequenzen und die darin erkannten Leitpfosten zusammen mit Ergebnissen der Spurprädiktion durch die Leitpfostenerkennung gezeigt.

6.1 Spurprädiktion

Die Spurprädiktion wurde an einer 500 Bilder umfassenden Sequenz getestet, die verschiedene, ineinander übergehende Situationen bietet.
Zu Beginn der Sequenz beschreibt die Straße eine Linkskurve mit einem Radius von 100 Metern. Ab Bild 100 erscheint im Sichtbereich der Kamera eine S-Kurve. Der Wendepunkt der S-Kurve wird vom Versuchsträger im Bild 200 durchfahren. Die folgende Rechtskurve beschreibt nur einen Radius von 65 Metern. Sie führt durch eine Senke unter einer Brücke. Nach der Durchfahrt der Unterführung ist ab Bild 450 die nächste S-Kurve im Bild sichtbar.
Gegenverkehr ist ab Bild 340 während der Durchfahrt der starken Rechtskurve im Kamerabild zu sehen und verdeckt teilweise die Leitpfosten auf der linken Straßenseite.
Zwischen Bild 410 und 420 sind auf der linken Straßenseite keine Leitpfosten vorhanden.

6.1.1 Straßenkrümmung

In Abbildungen 6.1 und 6.2 sind die von der Spurprädiktion geschätzten Werte c_0 für die Straßenkrümmung zu sehen. Als Referenzwert für die Schätzung lässt sich nach dem kinematischen Modell des Fahrzeugs ein c_0 aus den durch die Inertialsensorik gemessenen Größen $\dot{\psi}_I$ und v für Gierrate und Geschwindigkeit des Fahrzeugs nach Gleichung (6.4) berechnen. Dieser gemessene Referenzwert ist mit den Schätzwerten in den Diagrammen dargestellt.

nach (2.11)

$$\Delta\dot{\psi} = \dot{\psi}_I - c_{0ref} \cdot v \tag{6.1}$$

unter Annahme von

$$\Delta\dot{\psi} = 0 \tag{6.2}$$

ergibt sich

$$c_{0ref} \cdot v = \dot{\psi}_I \tag{6.3}$$

$$c_{0ref} = \frac{\dot{\psi}_I}{v} \tag{6.4}$$

In Abbildung 6.1 ist zu sehen, dass die Spurprädiktion mit sechs Freiheitsgraden dem Straßenverlauf folgt, bis in der starken Rechtskurve nur wenige Leitpfosten im Kamerabild zu sehen sind und teilweise vom Gegenverkehr verdeckt werden. Zwischen Bild 250 und 450 kann der Straßenverlauf mit sechs Freiheitsgraden nicht zuverlässig geschätzt werden.
Während der Durchfahrt der ersten S-Kurve jedoch folgt die geschätzte Straßenkrümmung ohne Verzögerung der gemessenen Straßenkrümmung.

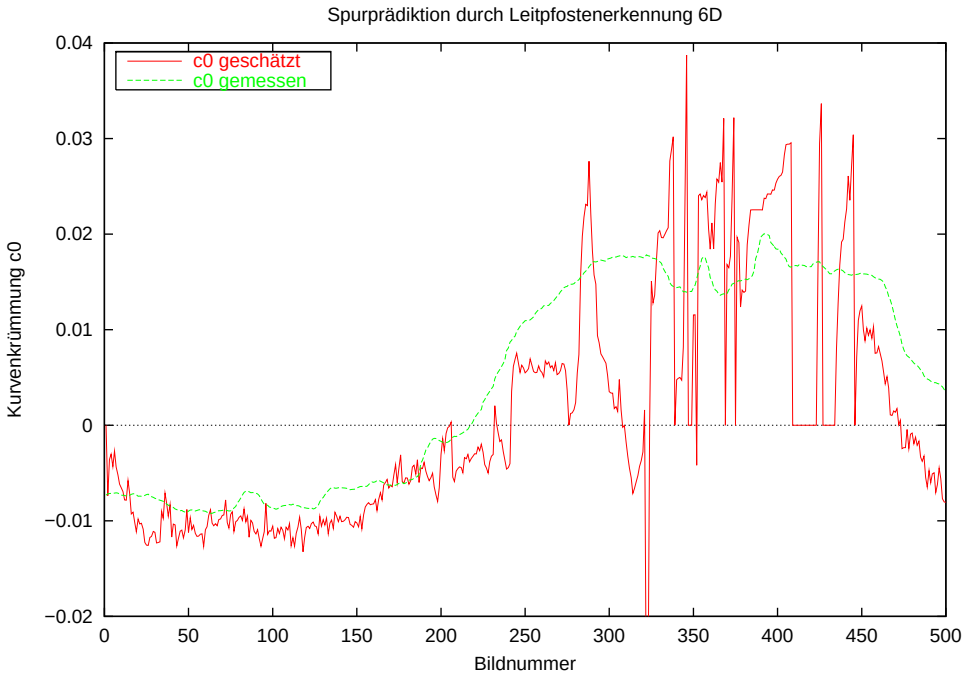


Abbildung 6.1: Schätzung der Straßenkrümmung mittels sechsdimensionalem Modell

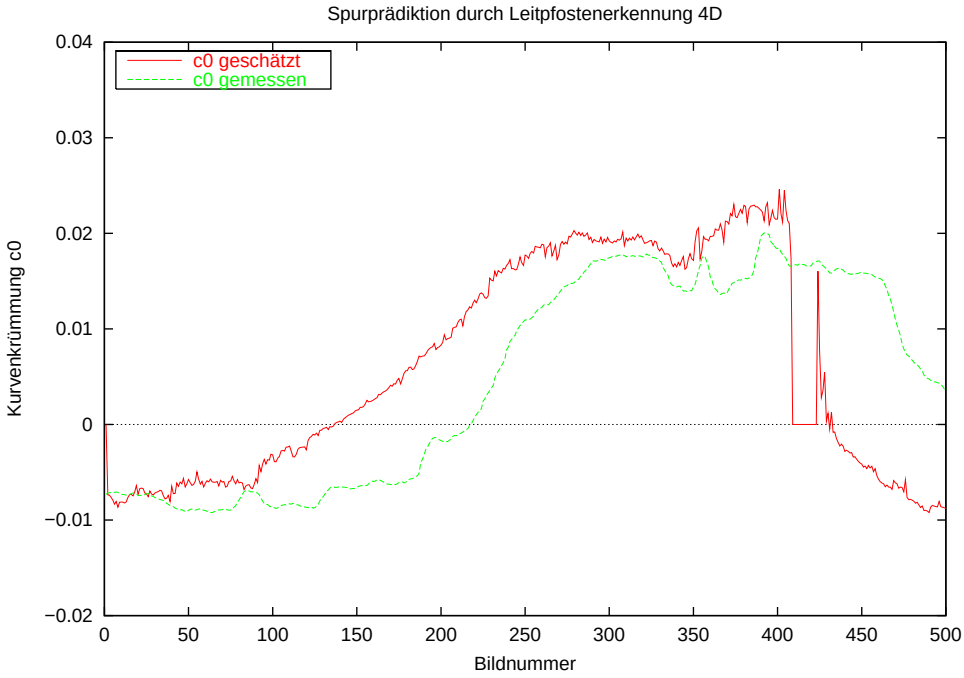


Abbildung 6.2: Schätzung der Straßenkrümmung mittels vierdimensionalem Modell

Abbildung 6.2 zeigt die Spurprädiktion anhand des vereinfachten Modells mit vier Freiheitsgraden. Am Graphen ist deutlich zu erkennen, dass die Schätzung der Straßenkrümmung deren Messung vorauseilt, was durch das vereinfachte Modell bedingt ist.
Im Modell mit sechs Freiheitsgraden wird die Straßenkrümmung an der Position des Fahrzeugs geschätzt und der weitere Straßenverlauf im Sichtbereich über die Krümmungsänderung c_1 beschrieben. Die Referenzstraßenkrümmung wird ebenfalls an der Position des Fahrzeugs gemessen. Im Modell mit nur vier Freiheitsgraden dagegen wird eine Krümmung geschätzt, die den Straßenverlauf ohne eine Krümmungsänderung im gesamten Sichtbereich beschreibt. Die Messung der Straßenkrümmung folgt dieser Schätzung im weiteren Verlauf der Fahrt, während die Straße im zuvor vermessenen Sichtbereich durchfahren wird.
Während bei der Spurprädiktion mit sechs Freiheitsgraden ab Bild 250 die Schätzung in der starken Kurve unbrauchbar wird, liefert die Schätzung mit vier Freiheitsgraden auch mit wenigen Messwerten durch die geringe Anzahl an Leitpfosten im Sichtbereich weiterhin einen Wert für die Straßenkrümmung, der den Messungen im Anschluss entspricht. Zwischen Bild 410 und 420 wird die Spurschätzung ausgesetzt, da keine Leitpfosten erkannt werden und damit keine Aussage über den aktuellen Straßenverlauf gemacht werden kann. Nach dem Aussetzen der Messung zwischen Bild 410 und 420 wird die Straße im Sichtbereich wieder erkannt.

6.1.2 Dreidimensionaler Straßenverlauf

In den Abbildungen 6.3 bis 6.10 sieht man jeweils links oben ein Kamerabild der bereits mehrmals verwendeten kontrastreichen Sequenz.

Die Leitpfosten im Bild der Monokamera werden erkannt und durch die Spurerkennung mit vier Freiheitsgraden den Straßenseiten zugeordnet. Jeweils im Kamerabild links oben ist der Suchbereich für die Leitpfosten gelb eingezeichnet, die erkannten Leitpfosten und die Visualisierung der Spurprädiktion sind rot für die linke und grün für die rechte Straßenseite eingezeichnet. Die Linien entsprechen einer Spur, die durch die Fußpunkte der gemessenen Leitpfosten in der Ebene definiert ist, also ohne Berücksichtigung der Höhe der Straße. Für den Fußpunkt jedes Leitpfostens sind 2 Kreuze eingezeichnet. Einer davon ist an der Position des Leitpfostens in der Ebene, der andere an der Position des Leitpfostens unter Berücksichtigung dessen Höhe eingezeichnet.

Die Positionen der detektierten Leitpfosten aus der Vogelperspektive und die Mittellinie der Straße aus der Spurprädiktion mit vier Freiheitsgraden sind in den Abbildungen jeweils unten links zu sehen.

Unten rechts sind die Leitpfostenpositionen von der Seitenansicht zu sehen. Die gemessenen Höhen sind durch Linien miteinander verbunden, welche wieder rot für die linke Straßenseite und grün für die rechte Straßenseite eingezeichnet sind.

In jeder Abbildung rechts oben ist nochmals das Kamerabild zu sehen. Im Bild sind erneut die rote und grüne Linie eingezeichnet, die eine Straße durch die Fußpunkte der Leitpfosten markieren. Hier wird jedoch ein dreidimensionales Modell verwendet. Die Höhen der Leitpfosten werden berücksichtigt.

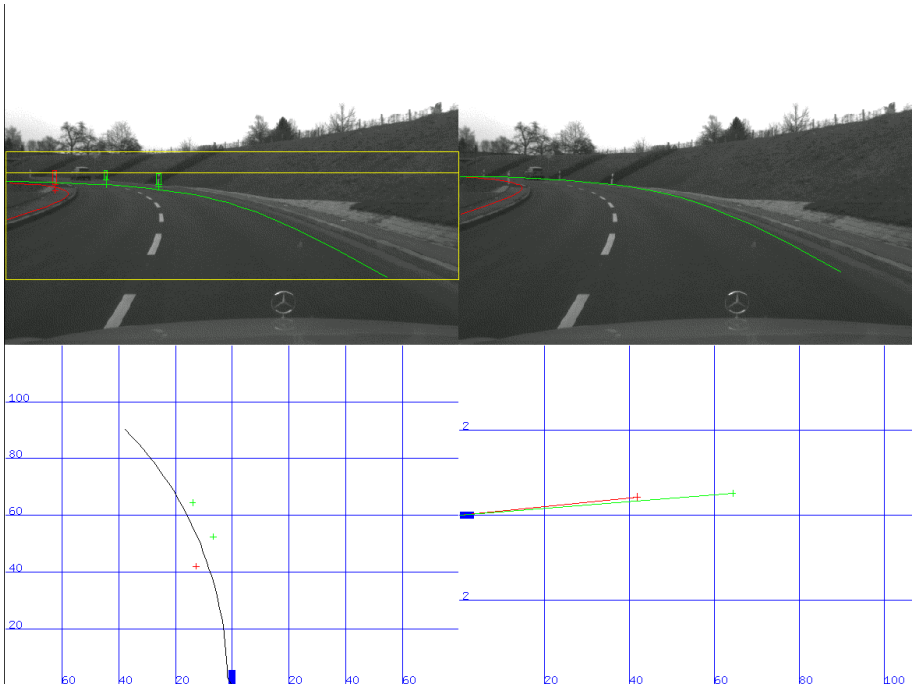


Abbildung 6.3: Bild 003 Start der Spurprädiktion

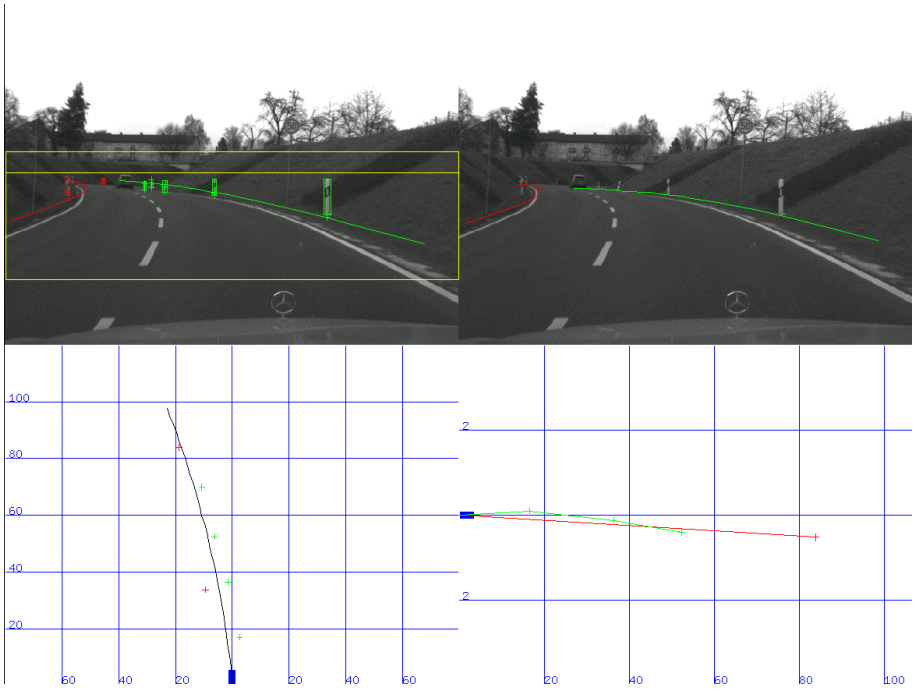


Abbildung 6.4: Bild 100 S-Kurve

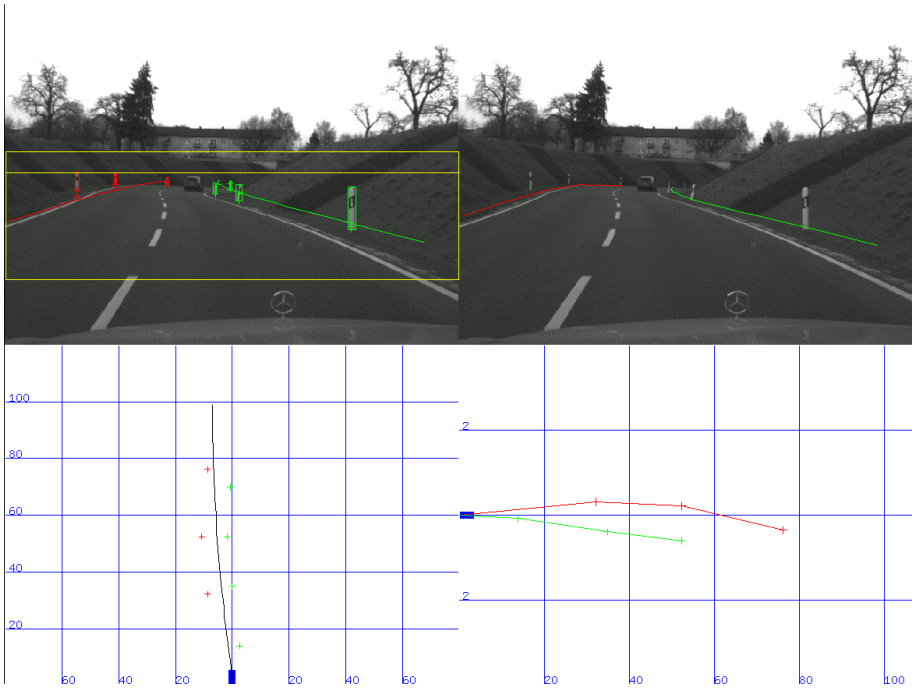


Abbildung 6.5: Bild 150 Steilkurve

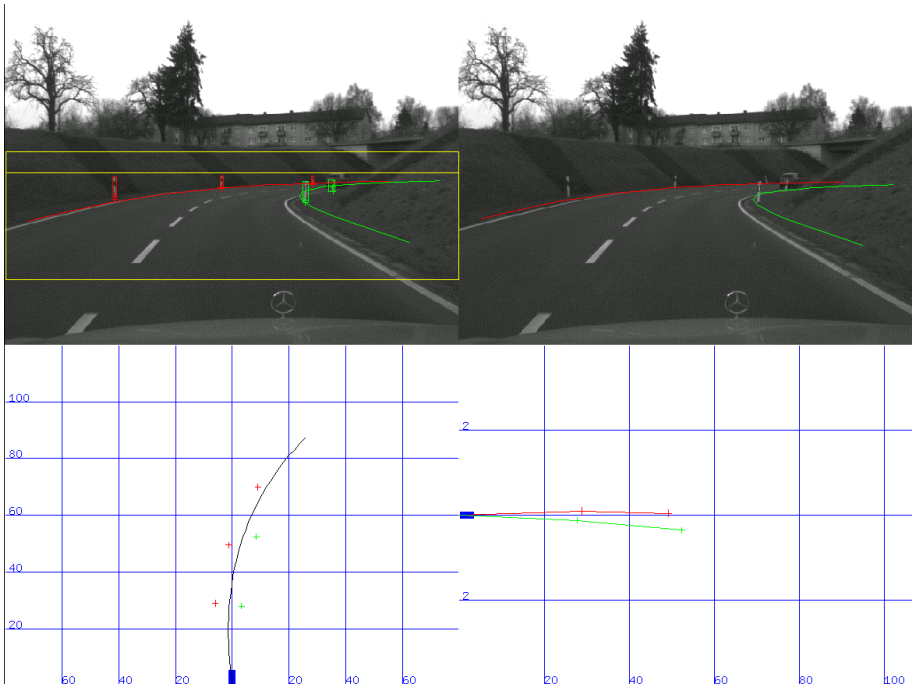


Abbildung 6.6: Bild 200 Durchfahrt einer Senke

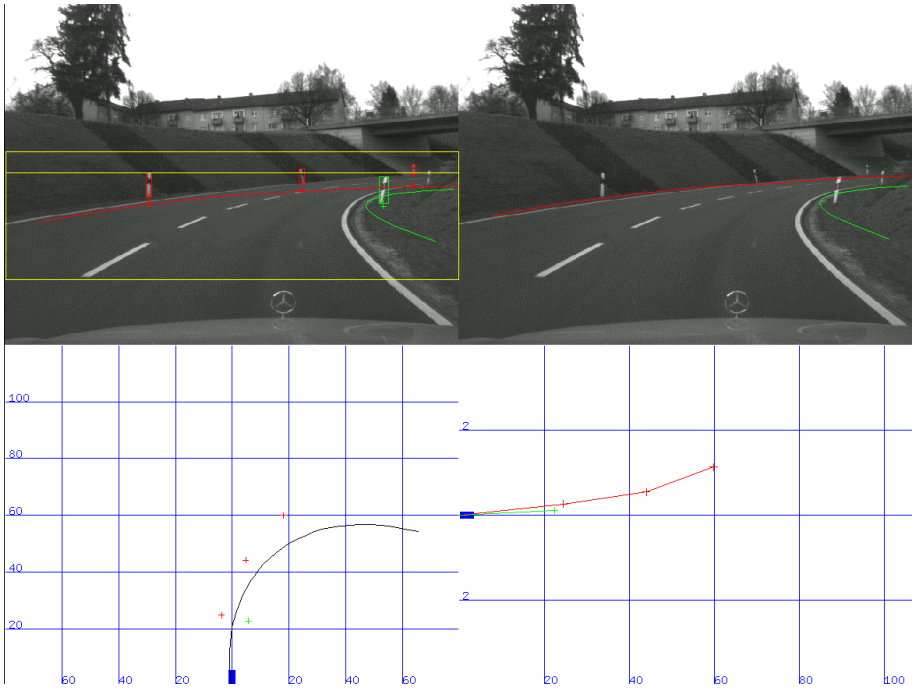


Abbildung 6.7: Bild 250 Kurve mit 65m Radius

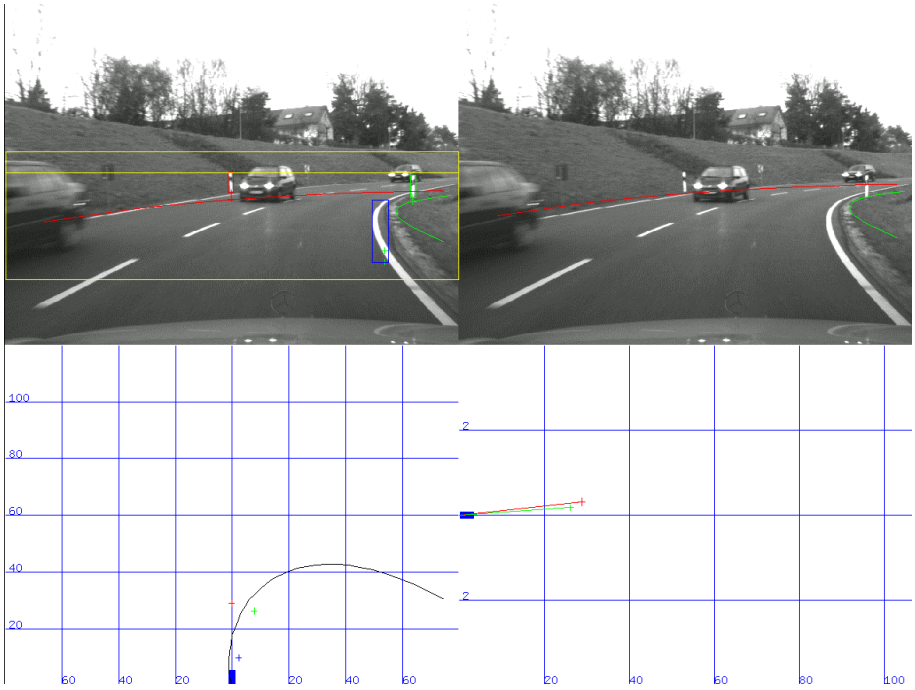


Abbildung 6.8: Bild 380 Gegenverkehr verdeckt Leitpfosten

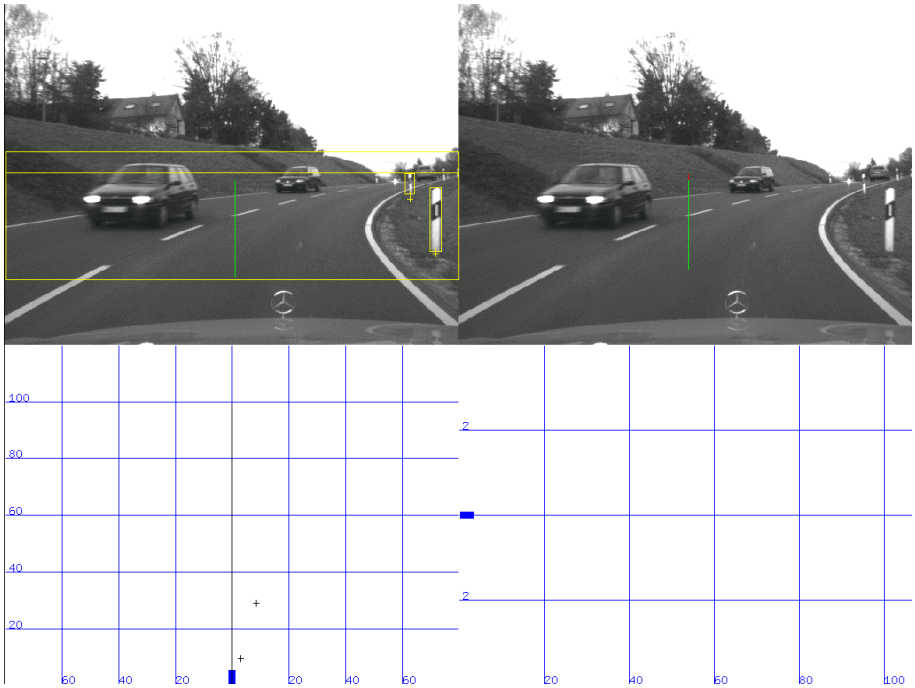


Abbildung 6.9: Bild 412 Aussetzen der Spurprädiktion

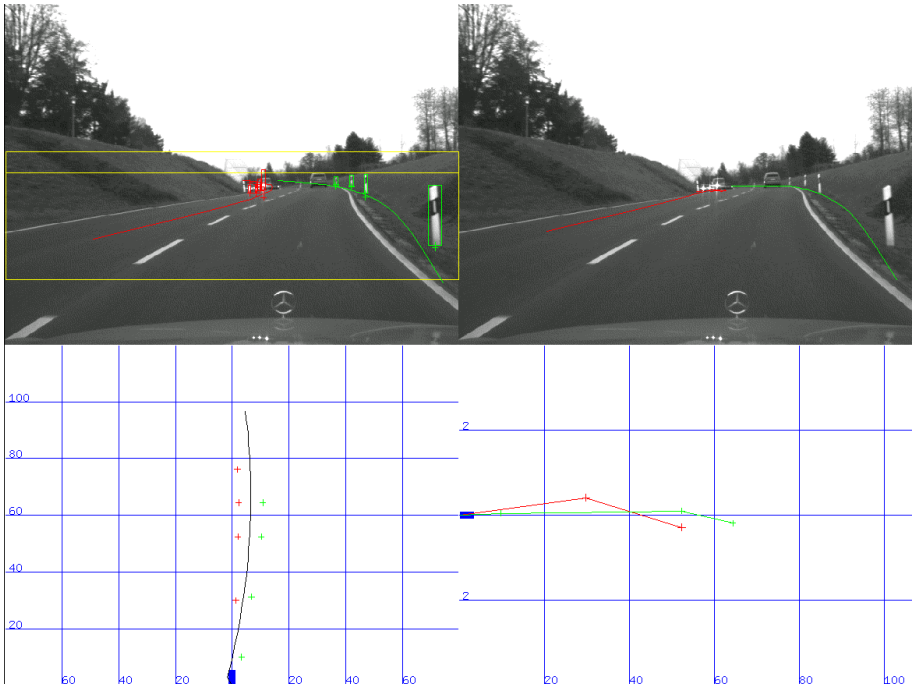


Abbildung 6.10: Bild 450 Wiederaufnahme der Spurprädiktion

6.1.2.1 Beginn der Spurprädiktion

Es ist nicht nötig die Spurprädiktion mittels Leitpfostenerkennung zu Beginn auf einem geraden Straßenabschnitt einschwingen zu lassen. Sobald auf jeder Straßenseite Leitpfosten erkannt werden, beginnt die Spurprädiktion auch in Kurven.

Im ersten Bild, auf das die Spurerkennung angewendet wird, werden die Leitpfosten vermessen. Ist es möglich aus den Positionen eine Breite und eine Krümmung der Straße anhand der Positionen zu berechnen, so werden die Schätzgrößen des Kalmanfilters entsprechend gesetzt. Dazu müssen auf beiden Straßenseiten Leitpfosten erkannt werden, wie es hier der Fall ist.
Im darauf folgenden Schritt des Kalmanfilters werden die berechneten Werte übernommen. Im dritten Bild, das in Abbildung 6.3 zu sehen ist, ist es bereits möglich den Verlauf der Straße zu schätzen. Damit können die Leitpfosten und deren gemessenen Höhen durch die Spurprädiktion bereits der linken oder der rechten Straßenseite zugeordnet werden, was im Bild durch die Farben verdeutlicht wird.

6.1.2.2 Spurprädiktion ohne Straßenkrümmung

Die S-Kurve in Bild 100 der Testsequenz kann durch eine Spurprädiktion mit vier Freiheitsgraden, ohne eine Krümmungsänderung der Straße nicht berücksichtigt werden. Wie in Abbildung 6.4 in der Vogelperspektive der Positionen zu sehen ist, werden durch die Parameter der Spurprädiktion eine Straße beschrieben, die mit konstanter Krümmung durch die Leitpfostenpositionen gelegt wird.

6.1.2.3 Dreidimensionale Spurprädiktion

Abbildungen 6.4 und 6.5 zeigen Kamerabilder des Versuchsträgers, als er auf die Senke der Unterführung zufährt.

Rechts unten im Bild sind die Höhen der erkannten Leitpfosten in der Seitenansicht zu sehen. Durch die unterschiedlichen Höhen der rechten und linken Straßenseite wird deutlich, dass die Rechtskurve vor der Senke eine Steilkurve ist.

Die Visualisierung der geschätzten ebenen Straße aus der Spurprädiktion im Bild links oben verdeutlicht die Abweichung des tatsächlichen Straßenverlaufs von der Ebene, auf der das Fahrzeug steht. Die beiden Leitpfosten links im Bild 150 sind höher als der prädizierte Straßenverlauf, die anderen Leitpfosten stehen tiefer.
In Bild 100 und 150 jeweils rechts oben passt die geschätzte eingezeichnete Spur durch die Leitpfostenfußpunkte, die um die Höhen der Straße korrigiert ist, zum tatsächlichen Straßenverlauf im Bild.

Auch in den Abbildungen 6.6 und 6.7 ist der Unterschied zwischen einer Spurprädiktion einer ebenen Straße und einer Spurprädiktion einer dreidimensionalen Straße zu sehen.

6.1.2.4 Gegenverkehr

In Abbildung 6.8 ist zu sehen, wie der Gegenverkehr, auf den in diesem Kapitel bereits eingegangen wurde, immer wieder Leitpfosten verdeckt. Zusammen mit den starken Kurven führt dies dazu, dass ab Bild 250 der Sequenz meist nur zwei Leitpfosten im Sichtbereich der Kamera sind. Die Spurprädiktion kann die Schätzung des gesamten Straßenverlaufs an dieser Stelle auf nur wenige Messpunkte stützen, was zu verrauschten Schätzwerten führt.

6.1.2.5 Aussortierter Falschalarm

Ebenfalls in Abbildung 6.8 ist ein falsch erkannter Leitpfosten auf der rechten Straßenmarkierung zu sehen. Dieser Leitpfosten kann durch die Spurprädiktion weder der linken noch der rechten Straßenseite zugeordnet werden, was durch die blaue Farbe angezeigt wird.
Dieser Leitpfostenkandidat wird als Falschalarm aussortiert. Er taucht nicht in der Seitenansicht der Straße auf, da für die Höhe der Straße dieser Leitpfostenkandidat nicht berücksichtigt wird.

6.1.2.6 Aussetzen der Spurprädiktion

In Abbildung 6.9 kann der Straßenverlauf nicht bestimmt werden. Bei Bild 410 der Sequenz wird der eine Leitpfosten im Sichtbereich, der durch den Gegenverkehr nicht verdeckt ist, nicht erkannt. Sind keine Messungen vorhanden, so wird die Spurprädiktion ausgesetzt, bis die breite der Straße erneut durch Leitpfostenpositionen bestimmt werden kann. Wie in der Abbildung zu sehen ist, werden jedoch nur auf einer Straßenseite Leitpfosten erkannt.

Im weiteren Verlauf der Testsequenz werden zusätzlich zu den Leitpfosten auch Falschalarme durch Scheinwerfer des Gegenverkehrs zur Spurprädiktion herangezogen. Dadurch wird die breite der Straße nicht korrekt geschätzt, wie in Abbildung 6.10 zu sehen ist, bevor die Testsequenz endet.

6.1.2.7 Spurprädiktion mit Krümmungsänderung der Straße

In Abbildung 6.11 ist im Vergleich zu Abbildung 6.5 erneut Bild 150 aus der Testsequenz zu sehen. Jedoch wird die Spurprädiktion mit sechs Freiheitsgraden auf die Testsequenz angewendet.

In der Vogelperspektive ist die S-Kurve durch die Leitpfostenpositionen zu erkennen. An der eingezeichneten geschätzten Mittellinie der Straße in der Vogelperspektive ist die Krümmungsänderung zu erkennen.

Auch die Spurprädiktion mit Krümmungsänderung kann um die Höhen der Straße erweitert werden. Dies ist durch den Vergleich der eingezeichneten geschätzten ebenen Straße im linken Kamerabild und der eingezeichneten geschätzten dreidimensionalen Straße im rechten Kamerabild zu sehen.

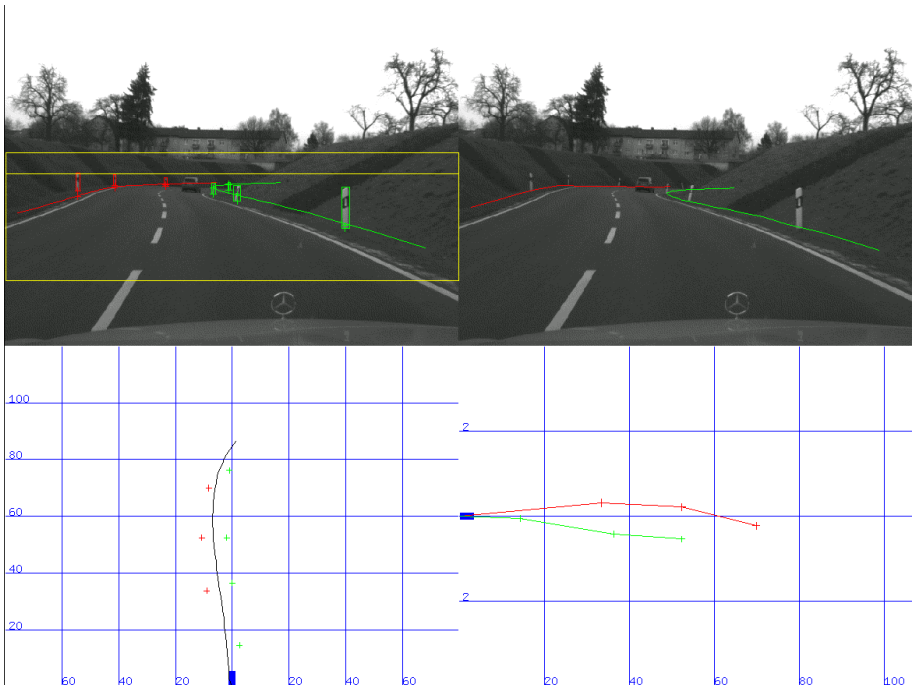


Abbildung 6.11: Bild 150 Spurprädiktion mit Straßenkrümmung

6.1.3 Echtzeitfähigkeit des Systems

Das Gesamtsystem wurde im Versuchsträger auf einem PC mit 2 GHz Intel Prozessor eingesetzt. Die Zykluszeit des Systems beträgt im Durchschnitt 22,5 ms. Damit lassen sich alle Einzelbilder der Kamera im Versuchsträger mit einer Abtastrate von 40 ms auswerten.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Systems, das Leitpfosten im Sichtbereich des eigenen Fahrzeugs erkennt. Es soll eine Spurprädiktion entworfen werden, die auf den Positionen der erkannten Leitpfosten basiert.

Zur Lösung dieser Aufgabe wurden zunächst drei verschiedene Bildverarbeitungsverfahren untersucht. Für die Eignung zur Leitpfostendetektion im Kamerabild wurden die Eigenschaften eines Matched Filter, das für die Erkennung mehrerer Leitpfosten in einem einzigen Bild erweitert wurde, eines Kantenverkettungsverfahrens und eines Verfahrens, das auf horizontaler und vertikaler Integration beruht diskutiert.
Dazu wurden die Verfahren implementiert. Die Parameter und Schwellwerte der Verfahren zur Leitpfostendetektion wurden jeweils anhand von 1850 Einzelbildern mittels Receiver Operator Characteristic Curves eingestellt.

Neben der Initialerkennung der Leitpfosten im Einzelbild wurde eine Prozedur zur Verfolgung der erkannten Leitpfosten in Bildsequenzen entworfen. Um für die beiden Prozeduren Bildverarbeitungsverfahren auszuwählen, wurden die Eigenschaften, Erkennungsraten und Falschalarmraten der untersuchten Verfahren auf ganzen Bildern und auf Bildausschnitten miteinander verglichen. Für die Initialerkennung wird eine Kombination der Kantenverkettung und der Integralsuche verwendet. Für die Verfolgung bereits erkannter Leitpfosten, also der Suche der Leitpfosten in kleinen Bildausschnitten, wird die Integralsuche verwendet.

Um aus den Bildpositionen der erkannten Leitpfosten die tatsächliche Position der Leitpfosten zu berechnen werden die geometrischen Parameter der Kamera verwendet. Mittels der Bildpositionen und der Entfernung eines Leitpfostens lassen sich dessen laterale Position und Höhe bestimmen. Die Entfernung selbst des Leitpfostens wird über die Größe im Bild oder mittels eines Korrelationsverfahrens auf Stereobildern berechnet, welches angewendet werden kann, sofern im Versuchsträger eine Stereokamera eingesetzt wird.
Falschalarme der Detektoren werden aussortiert, indem die Positionen der Leitpfostenkandidaten im Bild und im lokalen Koordinatensystem überprüft werden.

Für die Spurprädiktion durch die Leitpfostenerkennung wurden neue Modelle für Straße und Fahrzeug aus den Modellen der bestehenden optischen Spurerkennung, die auf den Fahrspurmarkierungen beruht, hergeleitet. Die Modelle beschreiben eine ebene Straße durch deren Spurbreite und Krümmung. Die Position des eigenen Fahrzeugs wird durch den lateralen Offset auf der Straße und einem Gierwinkel des Fahrzeugs beschrieben. Diese Parameter sind im Einsatz mit Ergebnissen aus der Spurprädiktion durch die Fahrspurmarkierungen fusionierbar.

Die Spurerkennung wurde um ein dreidimensionales Straßenmodell erweitert. Neben der Straßenkrümmung werden mit Hilfe der gemessenen Höhen der einzelnen Leitpfosten auch Steigungen, Gefälle und Steilkurven der Straße berücksichtigt. Zu jeder Entfernung wird die Höhe der Straße am linken oder rechten Straßenrand aus den Positionen der Leitpfosten interpoliert. Für eine beliebige Position auf der Straße wird die Höhe aus den Leitpfostenpositionen durch bilineare Interpolation bestimmt.

Das Gesamtsystem wurde in einem Versuchsträger echtzeitfähig implementiert und auf realen Straßen erfolgreich evaluiert.

Zukünftig könnte eine an die Problemstellung besser angepasste Einstellungen der Varianzen der Kalmanfilter die erzielten Ergebnisse der Spurprädiktion noch verbessern.

Eine Verbesserung der Leitpfostendetektion wäre durch bessere Kameras möglich. Zum einen würde ein Einsatz von Farbkameras eine bessere Unterscheidung der schwarzweißen Leitpfosten von der bunten Umgebung oder von bunten Schildern am Straßenrand ermöglichen.
Mit einer höheren Auflösung der Kamera könnte man nicht nur die Leitpfosten in größeren Entfernungen besser von ähnlichen Objekten unterscheiden, es wäre auch möglich, die Entfernung und Höhe der Leitpfosten nur mittels einer Monokamera entsprechend genauer zu bestimmen. Wäre die Auflösung ausreichend, um die Orientierung der Schräge der Markierungen und des oberen Endes eines Leitpfostens im gesamten Sichtbereich zu erkennen oder die geteilten Reflektoren von den länglichen zu unterscheiden, so würde sich nur mittels der Bildverarbeitung ein Leitpfosten der linken oder rechten Straßenseite zuordnen lassen.

Bei der Verfolgung der Leitpfosten wäre eine Schätzung deren Position, besonders deren Entfernung und Höhe aber auch deren Zuordnung zu einer Straßenseite über ein weiteres Kalmanfilter möglich. Damit würde sich das Messrauschen, das Einfluss auf die ermittelten Positionen hat, weniger auf die Auswertungen der Leitpfostenpositionen durch eine Spurprädiktion oder Landmarkennavigation auswirken.

Durch eine Fusion der Leitpfostenerkennung mit einer vorhandenen Fahrzeugerkennung und der optischen Spurerkennung könnten Bereiche des Kamerabildes für die Detektion und Verfolgung der Leitpfosten ausgeschlossen werden.
Durch eine Schätzung der Positionen von weiter entfernten, noch nicht erkannten Leitpfosten mittels einer Beobachtung der Abstände zwischen den Pfosten könnte die Suche auf bestimmte Bereiche des Kamerabildes konzentriert werden.

Um die vorhandene, auf Fahrspurmarkierungen basierende optische Spurerkennung, die für den Einsatz auf Autobahnen konzipiert ist und nur ebene Straßen beschreibt, auf Landstraßen einzusetzen, wird sie mit der Leitpfostenerkennung fusioniert werden. Dabei wird ein neues dreidimensionales Straßenmodell entwickelt werden und die Höhen der Leitpfosten gehen als Messungen in das Straßenmodell ein.

Anhang A

Die monokulare Kamera

A.1 Abbildungsfunktion der Kamera

Sieht man bei der Kamera von objektivbedingten Verzeichnungen ab, ergibt sich ein Lochkamera-Modell, das durch die Brennweite f, den Nickwinkel α und die Einbauhöhe H bestimmt wird. Die Skalierungsfaktoren f_x und f_y, wie in Gleichung (A.1) und (A.2) dargestellt, ergeben sich aus der Brennweite f des Kameraobjektivs und der Ausdehnung eines Bildpunktes auf dem CCD-Chip der Kamera k_x in $x-$Richtung beziehungsweise k_y in $y-$Richtung.

$$f_x = \frac{f}{k_x} \tag{A.1}$$

$$f_y = \frac{f}{k_y} \tag{A.2}$$

Unter Annahme eines kleinen Nickwinkels α und somit $l \approx L$ ergibt sich aus Abbildung A.1 die Projektion eines Weltpunktes $P(X, Y, Z)$ auf den Bildpunkt $P_i(x_i, y_i)$ durch:

$$x_i = \frac{f_x}{L}x = \frac{f}{k_x L}x \tag{A.3}$$

$$y_i = \frac{f_y}{L}y = \frac{f}{k_y L}y \tag{A.4}$$

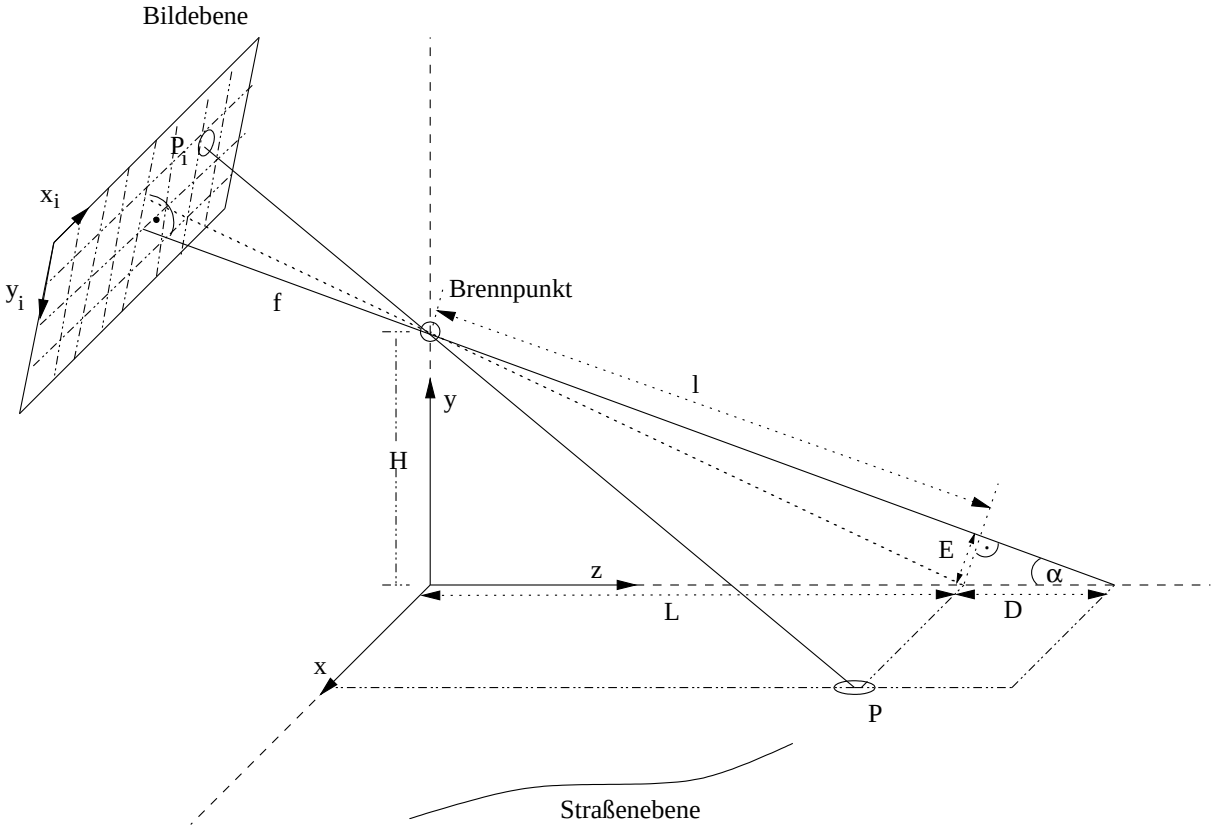


Abbildung A.1: Abbildungsgeometrie des Lochkameramodells aus [Trzebiatowski 2003b]

A.2 Tiefenberechnung eines Punktes auf der Straßenebene

Nachfolgend wird die Gleichung zur Berechnung der Entfernung L, eines Punktes P auf der Ebene der Straße in monokularen Bildern nach [Trzebiatowski 2003b] hergeleitet. Die Parameter der Kamera sind in Abbildung A.1 dargestellt. H ist die Höhe der Kamera über der Straßenebene, α ist der Nickwinkel der Kamera. Punkt P_i mit den Koordinaten y_i und x_i ist der Bildpunkt, auf den der Punkt P abgebildet wird.

$$H = (D + L)\tan(\alpha) \tag{A.5}$$

$$D = \frac{H}{\tan(\alpha)} - L \tag{A.6}$$

$$E = D\sin(\alpha) \tag{A.7}$$

$$l^2 + E^2 = H^2 + L^2 \tag{A.8}$$

(A.6) in (A.7)

$$\begin{aligned} E &= \left(\frac{H}{\tan(\alpha)} - L\right)\sin(\alpha) \\ &= H\cos(\alpha) - L\sin(\alpha) \end{aligned} \tag{A.9}$$

aus (A.8)

$$l^2 = H^2 + L^2 - (H\cos(\alpha) - L\sin(\alpha))^2 \tag{A.10}$$

(A.9) in (A.10)

$$\begin{aligned} l^2 &= H^2(1 - \cos^2(\alpha)) + L^2(1 - \sin^2(\alpha)) + 2HL\cos(\alpha)\sin(\alpha) \\ &= H^2\sin^2(\alpha) + L^2\cos^2(\alpha) + 2HL\cos(\alpha)\sin(\alpha) \\ &= (H\sin(\alpha) - L\cos(\alpha))^2 \end{aligned} \tag{A.11}$$

$$l = H\sin(\alpha) - L\cos(\alpha) \tag{A.12}$$

Somit ergibt sich die y-Koordinate y_i eines Bildpunktes P_i aus:

$$\begin{aligned} y_i &= \frac{f_y}{l}E \\ &= f_y\frac{H - L\tan(\alpha)}{L + H\tan(\alpha)} \end{aligned} \tag{A.13}$$

und die Entfernung L eines Punktes in der Welt durch:

$$L = \frac{H\left(1 - \frac{y_i}{f_y}\tan(\alpha)\right)}{\frac{y_i}{f_y} + \tan(\alpha)} \tag{A.14}$$

A.3 Tiefenberechnung eines Punktes mit bekannter Höhe über der Straßenebene

Mit der in A.2 hergeleiteten Gleichung (A.14) lässt sich in Abhängigkeit der Koordinaten im Bild die Entfernung L von Punkten auf der Straßenebene berechnen. Dazu muss die Höhe der Kamera über der Straßenebene bekannt sein.
Um die Entfernung von Punkten zu berechnen, die nicht auf der Straßenebene liegen, muss in Gleichung (A.14) die Höhe H durch die Höhe der Kamera über der Ebene, die parallel zur Straßenebene ist und durch Punkt P geht, ersetzt werden.
Ist die Einbauhöhe H der Kamera und auch die Höhe h_P eines Punktes jeweils im Bezug zur Straßenebene bekannt, so ergibt sich für die Entfernung L_h des Punktes Gleichung (A.15).

$$L_h = \frac{(H - h_P)\left(1 - \frac{y_i}{f_y}\tan(\alpha)\right)}{\frac{y_i}{f_y} + \tan(\alpha)} \tag{A.15}$$

Um einen gültigen Wert für die durch Gleichung (A.15) berechnete Entfernung L_h eines Punktes P zu erhalten, muss die Kamera höher sein als der Punkt P. Es muss gelten:

$$H > h_P \tag{A.16}$$

A.4 Berechnung der Höhe eines Punktes über der Straßenebene

Ist die Entfernung L_h eines Punktes bekannt, so lässt sich durch Gleichung (A.18) anhand der Bildzeile y_i des Punktes dessen Höhe h_P über der Straßenebene berechnen. Gleichung (A.18) ergibt sich durch Auflösen der Gleichung (A.15) nach h_P.

Aus (A.15)

$$(H - h_P) = \frac{L_h\left(\frac{y_i}{f_y} + \tan(\alpha)\right)}{1 - \frac{y_i}{f_y} + \tan(\alpha)} \tag{A.17}$$

$$h_P = H - \frac{L_h\left(\frac{y_i}{f_y} + \tan(\alpha)\right)}{1 - \frac{y_i}{f_y} + \tan(\alpha)} \tag{A.18}$$

Anhang B

HAV - Hinweise für das Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen

Abschrift
11. Auflage vom Juli 1999
Seiten 379 bis 386

8 Senkrechte Leit- und Schutzeinrichtungen

8.1 Allgemeines

Senkrechte **Leiteinrichtungen** sind Mittel zur Führung des Verkehrs. Sie sollen die in der Ebene der Fahrbahn liegenden waagerechten Leiteinrichtungen ergänzen. Sie geben den Verlauf der Straße und die Grenzen des Verkehrsraumes auch bei Schnee, Nebel und Dunkelheit deutlich an, zu Zeiten also, in denen die Fahrbahnmarkierungen nur schwer oder gar nicht zu erkennen sind und auch die Begrenzung des Straßenquerschnittes für den Verkehrsteilnehmer nicht deutlich wahrnehmbar ist.

Durch senkrechte Leiteinrichtungen werden ferner Gefahrenstellen, die durch Einschränkungen des Verkehrsraumes oder aber durch Änderung des Straßenverlaufs hervorgerufen werden, nach Lage, Ausdehnung und Umriss angegeben, Sie ergänzen somit die der Ankündigung von Gefahrenstellen dienenden Gefahrzeichen.

Schutzeinrichtungen sind in der Regel bauliche Anlagen, welche die Aufgabe haben, von der Fahrbahn abgekommene Fahrzeuge aufzufangen oder umzulenken; hierzu zählen vor allem die

passiven Schutzeinrichtungen, wie Stahlschutzplanken, auffangende Schutzeinrichtungen und Betongleitwände. Weiter kann man auch solche baulichen Anlagen, welche die Verkehrsteilnehmer vor anderen Gefahren schützen, zu den Schutzeinrichtungen zählen, z. B. Wildschutzzäune und Blendschutzzäune.

Schutzeinrichtungen sind keine Verkehrseinrichtungen im Sinne der StVO. Über das Anbringen von Schutzplanken, anderen passiven Schutzeinrichtungen und Blendschutzzäunen bestimmt die Straßenbaubehörde allein, wie sie auch gemäß VwV-StVO allein bestimmt, ob Leitpfosten anzubringen sind. Selbstverständlich ist eine Zusammenarbeit mit Verkehrsbehörden und Polizei anzustreben und empfehlenswert.

8.2 Leitpfosten (Zeichen 620)

Um zu gewährleisten, dass Leitpfosten einheitlich angeordnet und ausgeführt werden, sind nachstehende Grundsätze über die Verwendung von Leitpfosten mit Erlass des BMV vom 16. März 1957 zur Anwendung empfohlen worden. Siehe ferner auch nachstehenden BMV-Erlass vom 6. Februar 1992. Wegen der Zulassung von Rückstrahlern für Leitpfosten an Bundesfernstraßen gibt der BMV von Zeit zu Zeit eine Liste der zugelassenen Rückstrahler für Leitpfosten bekannt. Es wird ausdrücklich erwähnt, dass es sich um eine „rein technische Prüfung und Zulassung handelt und patentrechtliche Fragen hiervon nicht berührt werden."
Im Rahmen der technischen Weiterentwicklung, finden auch Leitpfosten Verwendung, die sich beim Anfahren umbiegen und wieder in die ursprüngliche Position zurückfedern. Tages- und Nachtkennzeichnung entsprechen den herkömmlichen Leitpfosten, nicht jedoch der Pfostenquerschnitt, der aus statischen Gründen anders gestaltet ist. Für das Anbringen der Leitpfosten (Zeichen 620) ist die Straßenbaubehörde allein zu- ständig (StVO § 45 Abs. 3).

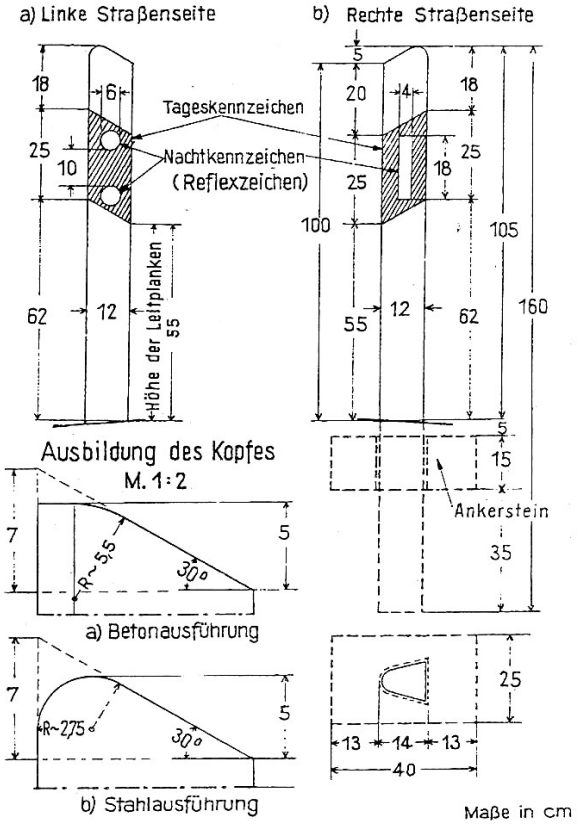
Zu Abschnitt 8.2

BMV -StB 4 -BI -116 Ums 57
16. März 1957
Anordnung und Ausführung von Leitpfosten und Leitplanken an Bundesfernstraßen

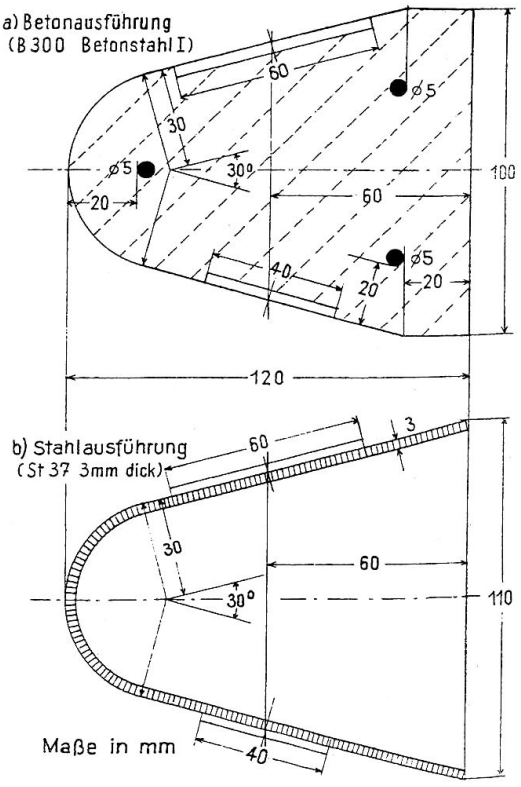
(Auszugsweise Wiedergabe aus „Hinweise für die Anordnung und Ausführung von senkrechten Leiteinrichtungen an Bundesfernstraßen" [HLB 1957].

Anmerkung: Die Änderung gemäß Erlass BMV vom 20. August 1968, StB 4 -BI. 4019 W 67 II - zu Punkt 5.2.1 ist im vorliegenden Text berücksichtigt

5. Leitpfosten



Leitpfosten [Abb. 4]



Querschnitt der Leitpfosten [Abb. 5]

5.1 Zweck

Die Leitpfosten sind eine aus den Leitsteinen und Leitpflöcken entwickelte Leiteinrichtung, die die seitliche Grenze des Verkehrsraumes und den Verlauf der Straße anzeigt. Leitpfosten sind künftig bei Straßen mit mittlerem und starkem Verkehr anstelle der Leitsteine und Leitpflöcke anzuwenden.

5.2 Form und Farbe

5.2.1 Die Leitpfosten sind 12 cm breite weiße Pfosten mit einem Tageskennzeichen und einem Nachtkennzeichen für Kraftfahrer. Ihre Höhe beträgt 100cm über dem Fahrbahnrand. Sie werden aus Beton oder Stahlblech hergestellt (Abb. 4). Kunststoffe können in der Form der Beton- und Stahlblechausführungen verwendet werden.

Holzpfosten sind in der Form der Betonausführungen zugelassen, wenn sie nach den Vorschriften der Dt. Bundespost über die Imprägnierung von Leitungsmasten aus Holz imprägniert worden sind. Für das Tränkverfahren gilt die FTZ-Richtlinie RI. Nr. VI A 02 (05) und für die anzuwendenden Holzschutzmittel die FTZ-Richtlinie RI. Nr. VI A 09. Der Pfosten soll bis auf den im Erdboden stehenden Teil von 45 cm Länge weiß gestrichen sein. Der weiße Anstrich darf durch die Imprägnierung nicht Schaden leiden.

5.2.2 Um besonders deutlich erkennbar zu sein, werden die Sichtflächen der Leitpfosten der Fahrbahn zugewendet. Die Leitpfosten haben deshalb einen winkelförmigen Grundriß. Der Scheitel des Winkels befindet sich an der auf der Straßenseite befindlichen Kante des Leitpfostens. Der Winkel beträgt 30^o (Abb. 5).

5.3 Tages- und Nachtkennzeichnung

5.3.1 Das Tageskennzeichen ist ein 25 cm hoher schwarzer Streifen, der mit einer Neigung von 30^o von der Außenseite der Straße nach der Fahrbahnseite fallend unter einem 20 cm hohen weißen Kopf angebracht ist. Durch diese Neigung des Streifens unterscheiden sich die Leitpfosten auf der linken und auf der rechten Seite der Straße. Die erleichtert in Krümmungen das Zurechtfinden, vor allem bei Neuschnee und Nebel.

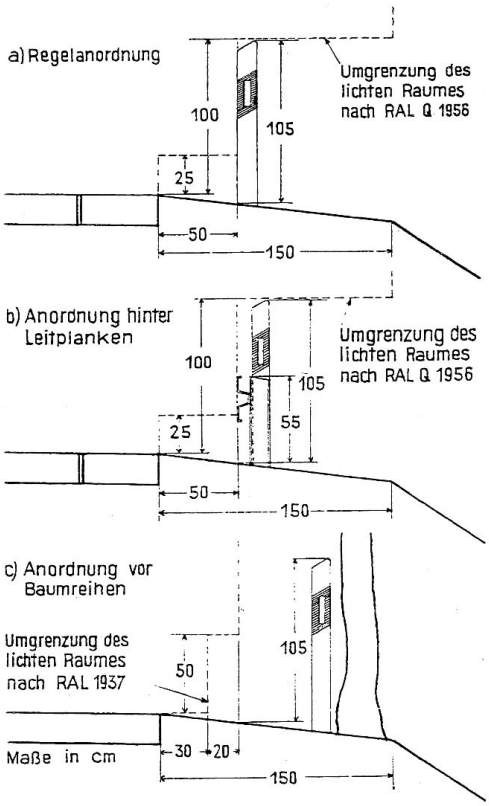
5.3.2 Als Nachtkennzeichen dienen Reflexzeichen. Sie sind auf der rechten Seite als senkrecht stehendes Rechteck mit den Maßen 4 x 18 cm ausgebildet. Auf der linken Seite wird das Nachtkennzeichen durch zwei im Abstand von 10 cm übereinander angebrachte runde Reflexzeichen von 6 cm Durchmesser dargestellt. Die Nachtkennzeichen sind im Regelfall auf beiden Seiten weiß.

5.3.3 Zur Fahrbahn einspringende Abschnitte des Straßenrandes erhalten Leitpfosten mit gelbem Nachtkennzeichen. Das gleiche gilt für die Eckleitpfosten an Straßeneinmündungen. (s. 5.6.5)

5.3.4 Für die weißen Reflexzeichen sind Reflexstoffe zu wählen, die das Licht in der Farbe der Scheinwerfer zum Ausgangspunkt zurückstrahlen, für die gelben Reflexzeichen solche, die das Licht im Farbton 1007 RAL - 840 R oder einem möglichst ähnlichen Farbton zurückwerfen. Die angestrahlten Reflexzeichen sollen eine gleichmäßige Leuchtdichte aufweisen, nicht glitzern oder bei der Vorbeifahrt plötzlich aufblitzen. Es sind Weitwinkelreflexstoffe von hoher Leuchtkraft zu verwenden. Der Rückstrahlwert soll mehr als das 20fache der diffusen weißen Magnesiumoxydfläche betragen.

5.4 Aufstellung

5.4.1 Die Leitpfosten werden in unbefestigten Randstreifen aufgestellt. Der seitliche Abstand der Leitpfosten von der Fahrbahn beträgt mindestens 0,5 m, gerechnet von der äußersten befestigten Kante der Straßenoberfläche (Abb. 6). Bei Vorhandensein von Leitplanken stehen die Leitpfosten unmittelbar hinter den Holmen der Leitplanken. Werden bei Straßen ohne Leit- und Seitenstreifen (siehe RAL-Q 1956) die unbefestigten Randstreifen vom Verkehr mit in Anspruch genommen (haltende Fahrzeuge Fußgänger- und Radverkehr), so kann der seitliche Abstand von der Fahrbahn vergrößert werden. Sie sollen hierbei jedoch in einer Flucht und in voller Breite vor vorhandenen Baumreihen zu stehen kommen.



Querschnitt der Leitpfosten [Abb. 6]

5.4.2 Die Leitpfosten sollen senkrecht und gut ausgerichtet stehen. Die Befestigung im Boden soll einer Lockerung von Hand widerstehen. Bei einem Aufprall eines Kraftfahrzeuges soll der Leitpfosten ohne größeren Schaden an Straße und Fahrzeug nachgeben. Diesem Zweck dient die Ausführung aus gefaltetem Stahlblech oder aus Beton mit einer künstlichen unmittelbar über der Erdoberfläche liegenden Bruchstelle. Der Einbau der Leitpfosten und die Auswechslung beschädigter Pfosten soll schnell erfolgen können. Zu diesem Zweck können die auf Bild 4 dargestellten vorgefertigten Ankersteine angewendet werden.

5.5 Abstände

Der gegenseitige Abstand der Leitpfosten längs der Straße beträgt in der Geraden und in der Ebene 50 m. Es sollen auf jeder Straßenseite - in Krümmungen unter 200 m Halbmesser auf der Kurvenaußenseite - mindestens immer 5 Leitpfosten sichtbar sein. In Krümmungen und auf Kuppen ist der Abstand aus diesem Grund zu verringern. Empfehlungen für den Abstand in Krümmungen sind in Tafel 1, für den Abstand auf Kuppen in Tafel 2 gegeben. Der Übergang zu und von den verringerten Abständen soll allmählich durch Anordnung von 3 Übergangsabständen erfolgen. Auch hierüber enthalten die Tafeln 1 und 2 Angaben. Ist die zwischen zwei Krümmungen mit Leitpfosten zu besetzende gerade Strecke nicht in 50-m-Abstände einteilbar, so können die 3 Übergangsabstände zu beiden Seiten der geraden Strecke abgeändert werden, doch so, dass ein allmählicher Übergang gewahrt bleibt.

Anmerkung: Bezüglich Neuregelung der Abstände siehe nachstehenden: BMV-Erlass vom 6. Februar 1992. Diese Neuregelung ist bei den folgenden Tafeln 1 und 2 bereits berücksichtigt.

Krümmungs-halbmesser	Abstand in der Krümmung	Übergang vor und hinter der Krümmung		
		Erster Abstand	Zweiter Abstand	Dritter Abstand
m	m	m	m	m
20	3	6	10	20
30	3	7	11	21
40	4	9	15	31
50	5	12	20	40
60	6	15	24	48
70	7	17	29	50
80	8	20	33	50
90	9	23	38	50
100	10	25	42	50
200	15	28	45	50
300	20	36	50	50
400	30	50	50	50
500	40	50	50	50
600 u. mehr	50	50	50	50

Tafel 1: Abstand der Leitpfosten in Krümmungen

Bemerkung

Die angegebenen Abstandsmaße gelten für die Außenseite der Krümmung. Bei Krümmungshalbmessern bis zu 100 m ist jedem zweiten Leitpfosten auf der Außenseite ein Leitpfosten auf der Innenseite gegenüberzustellen. Den drei Leitpfosten im Übergang auf der Außenseite stehen ebenfalls drei auf der Innenseite gegenüber.

Bei Krümmungshalbmessern über 100 m ist jedem Leitpfosten auf der Außenseite ein Leitpfosten auf der Innenseite gegenüberzustellen.

Halbmesser der Kuppen-ausrundung	Abstand in der Kuppen-ausrundung	Übergang vor und hinter der Krümmung		
		Erster Abstand	Zweiter Abstand	Dritter Abstand
m	m	m	m	m
100	5	8	17	34
150	6	10	20	41
200	7	12	23	47
250	8	13	26	50
300	9	15	29	50
400	11	17	33	50
500	12	19	37	50
600	13	21	41	50
800	16	24	48	50
1000	17	27	50	50
1500	21	33	50	50
2000	25	39	50	50
2500	28	43	50	50
3000	31	47	50	50
4000	35	50	50	50
5000	40	50	50	50
6000	43	50	50	50
8000 u. mehr	50	50	50	50

Tafel 2: Abstand der Leitpfosten in Kuppen

5.6 Anwendung

5.6.1 Um das Fahren in der Dunkelheit, bei Nebel oder bei Neuschnee zu erleichtern ist anzustreben, dass die Straßenzüge durchgehend mit Leitpfosten ausgerüstet werden. Vorzugsweise sollen Leitpfosten auf den Teilstrecken durchgehend angeordnet werden wo häufig Änderungen des Straßenquerschnitts und des Straßenverlaufs auftreten. Mindestens jedoch sind diejenigen Einzelabschnitte mit Leitpfosten zu versehen, auf deren Länge sich die Änderungen der Straßenlage erstrecken, es sei denn, dass für diese Abschnitte andere senkrechte Leiteinrichtungen angeordnet werden.

5.6.2 Werden Leitpfosten an Straßen angeordnet, bei denen Seitenstreifen für Mopeds, Radfahrer und Fußgänger oder Sommerwege angelegt sind, so ist der Rand der Fahrbahn durch Bodenrückstrahler nach HMB 54 zusätzlich kenntlich machen.

5.6.3 Bei zwei- und mehrspurigen Straßen mit ungeteilter Fahrbahn sind die Leitpfosten auf beiden Seiten der Fahrbahn aufzustellen. Bei mehrspurigen Straßen mit geteilter Fahrbahn (Autobahnen) sind nur auf der rechten Seite jeder Einzelfahrbahn Leitpfosten aufzustellen.

5.6.4 Leitpfosten mit gelben Nachtkennzeichen sind auf zur Fahrbahn einspringenden Abschnitten des Straßenrandes dann anzuwenden, wenn die Fahrbahnbreite wesentlich verringert wird und ein vorsichtiges Fahren mit erheblich herabgesetzter Geschwindigkeit erforderlich ist.

5.6.5 Bei Einmündungen und Kreuzungen ist ein Leitpfosten mit gelbem Nachtkennzeichen im Zuge der durchgehenden Straße etwa am Ende des Ausrundungsbogens jeder Ecke aufzustellen. So ist auch bei Ein- und Ausmündungen von Beschleunigungs- und Verzögerungsspuren zu verfahren. Innerhalb des Bereichs der Ein- und Ausmündungen sind, soweit erforderlich, Leitpfosten mit weißem Nachtkennzeichen anzuordnen, falls nicht wesentliche Fahrbahnverengungen innerhalb der Ein- und Ausmündungen Leitpfosten mit gelbem Nachtkennzeichen bedingen.

Anmerkung: Durch Pfeilzeichen auf den Leitpfosten kann auf die nächstgelegene Notrufsäule hingewiesen werden (vgl. Erlass des BMV vom 15. November 1980 [VkB1 1980 S. 795]).
Dieses Pfeilzeichen wird an den Leitpfosten am rechten Fahrbahnrand angebracht. Die Spitze des Pfeils zeigt in Richtung der nächstgelegen Notrufsäule.

Anhang C

Kalmanfilter zur Spurprädiktion

C.1 Kalmanfilter der optischen Spurerkennung

Die Gleichungen (2.9) und (2.8) und die aus den physikalischen Zusammenhängen hergeleiteten Differenzialgleichungen (2.10) bis (2.15) lassen sich in systemtheoretischer Form als lineares Prozessmodell nach Gleichung (C.1) und nichtlineare Ausgangsgleichung nach Gleichung (C.2) darstellen [Föllinger 1994].

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{C.1}$$
$$y = h(x) \tag{C.2}$$

Der Entwurf des Kalmanfilters beruht auf der Annahme, dass der Prozess stochastisch mit dem Prozessrauschen w und die Messung stochastisch mit dem Messrauschen v gestört ist [Kalman 1960]. Somit ergeben sich für das System des Filters die Gleichungen (C.3) und (C.4).

$$\dot{x} = Ax + Bu + w \tag{C.3}$$
$$y = h(x) + v \tag{C.4}$$

Die Störfaktoren w und v repräsentieren Gauß'sches weißes Rauschen mit den als bekannt vorausgesetzten Kovarianzmatrizen Q und R [Heinrich 1998].

Da für den praktischen Einsatz nur ein zeitdiskretes Kalmanfilter eingesetzt werden kann, wird das kontinuierliche Modell diskretisiert. Dabei wird von einer konstanten Zykluszeit Δt ausgegangen. Neben Grundlagen zum Kalmanfilter wird ein Überblick über dieses Modell in [Trzebiatowski 2003b] und [Dickmanns et al. 1986] gegeben. Dabei wird jeweils auf die Herleitungen der Transitionsmatrix, der Eingangsmatrix, der Kovarianzmatrix und der Jacobimatrix des erweiterten Kalmanfilters nach [Brammer et al. 1994] eingegangen.

C.2 Herleitung des Kalmanfilter mit vier Freiheitsgraden

In diesem Kapitel wird das erweiterte Kalmanfilter hergeleitet, dass auf den Messgleichungen (5.20) und (5.21), zur Spurprädiktion ohne Berücksichtigung der Krümmungsänderung der Straße, beruht.

Dazu wird das Prozessmodell aus Gleichungen (C.3) und (C.4) auf das in Kapitel 5.3.2 beschriebene Modell angewendet, dass Durch die Zustandsdifferenzialgleichungen (5.15) bis (5.18) definiert wird.

Aus den Zustandsdifferenzialgleichungen und dem Zustandsvektor x aus Gleichung (5.14) ergeben sich die Systemmatrix A und Eingangsmatrix B und Stellvektor u des Prozessmodells zu

$$A = \begin{pmatrix} 0 & v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{C.5}$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{C.6}$$

$$u = \begin{pmatrix} v_Q \\ \dot{\psi}_F \end{pmatrix} \tag{C.7}$$

Für die diskrete Transitionsmatrix $\Phi(\Delta t)$ gilt nach [Dickmanns et al. 1986] mit der Einheitsmatrix I:

$$\begin{aligned} \Phi(\Delta t) &= e^{A\Delta t} \\ &= I + A\Delta t + \frac{A^2\Delta t^2}{2!} + \frac{A^3\Delta t^3}{3!} + \dots \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & v\Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -v\Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{2}v^2\Delta t^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & v\Delta t & -\frac{1}{2}v^2\Delta t^2 & 0 \\ 0 & 1 & -v\Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{C.8}$$

Für die diskrete Eingangsmatrix B_d gilt:

$$
\begin{aligned}
B_d(\Delta t) &= \int_0^{\Delta t} \Phi(\tau) B d\tau \\
&\quad \text{mit } \Phi \text{ und } B \text{ aus (C.8) und (C.6)} \\
&= \int_0^{\Delta t} \begin{pmatrix} 1 & v\tau \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} d\tau = \left[\begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2}v\tau^2 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right]_0^{\Delta t} \\
&= \begin{pmatrix} \Delta t & \frac{1}{2}v\Delta t^2 \\ 0 & \Delta t \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{C.9}
$$

Für die diskrete Kovarianzmatrix Q_d gilt:

$$
\begin{aligned}
Q_d(\Delta t) &= \int_0^{\Delta t} \Phi(\tau) Q \Phi^T(\tau) d\tau \\
&= \int_0^{\Delta t} \begin{pmatrix} 1 & v\tau & -\frac{1}{2}v^2\tau^2 & 0 \\ 0 & 1 & -v\tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ v\tau & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2}v^2\tau^2 & -v\tau & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} d\tau \\
&\quad \text{Im folgenden werden nur die benötigten Diagonalelemente betrachtet} \\
&= \int_0^{\Delta t} \begin{pmatrix} Q_1 + v^2\tau^2 Q_2 + v^4\tau^4 \frac{1}{4} Q_3 & & & \\ & Q_2 + v^2\tau^2 Q_3 & & \\ & & Q_3 & \\ & & & Q_4 \end{pmatrix} d\tau \\
&= \left[\begin{pmatrix} \tau Q_1 + \frac{1}{3}v^2\tau^3 Q_2 + \frac{1}{2}v^4\tau^5 Q_3 & & & \\ & \tau Q_2 + \frac{1}{3}v^2\tau^3 Q_3 & & \\ & & Q_3 & \\ & & & Q_4 \end{pmatrix} \right]_0^{\Delta t} \\
&= \begin{pmatrix} \Delta t Q_1 + \frac{1}{3}v^2\Delta t^3 Q_2 + \frac{1}{2}v^4\Delta t^5 Q_3 & & & \\ & \Delta t Q_2 + \frac{1}{3}v^2\Delta t^3 Q_3 & & \\ & & Q_3 & \\ & & & Q_4 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{C.10}
$$

Um die Jacobi Matrix C zu berechnen, muss die Messgleichung für jeden Parameter des Kalmanfilters partiell abgeleitet werden.

$$C = \left.\frac{\partial h(x)}{\partial x}\right|_{(\tilde{x})} \tag{C.11}$$

mit

$$h(x) = \frac{f_x}{L}(a \cdot d - d_{off} - \Delta\psi \cdot L + \frac{c_0}{2} \cdot L^2) \tag{C.12}$$

$$\frac{\partial h(x)}{\partial d_{off}} = -\frac{f_x}{\hat{L}} \tag{C.13}$$

$$\frac{\partial h(x)}{\partial \Delta\psi} = -f_x \tag{C.14}$$

$$\frac{\partial h(x)}{\partial c_0} = \frac{\hat{L} f_x}{2} \tag{C.15}$$

$$\frac{\partial h(x)}{\partial d} = \frac{a f_x}{\hat{L}} \tag{C.16}$$

mit

$$\begin{aligned} \hat{L} &= \frac{H\left(1 - \frac{y_B}{f_y}\tan(\alpha)\right)}{\frac{y_B}{f_y} + \tan(\alpha)} \\ &= L, \text{ da } \alpha \text{ in diesem Filter nicht mitgeschätzt wird} \end{aligned} \tag{C.17}$$

Aus (C.11) bis (C.17) folgt

$$C = \begin{pmatrix} -\frac{f_x}{L} & -f_x & \frac{L f_x}{2} & \frac{a f_x}{L} \end{pmatrix} \tag{C.18}$$

Abbildungsverzeichnis

1.1 Kamerabild einer Autobahnfahrt 3

1.2 Kamerabild einer Landstraßenfahrt 3

2.1 Konzept zur Spurprädiktion durch die Leitpfostenerkennung 5

2.2 Abmessungen der Leitpfosten 6

2.3 Beispiele für Leitpfosten in Kamerabildern 7

2.4 Kanten der Leitpfostenabbildungen 7

2.5 Kameraanordnung für Stereobildpaare 9

2.6 Objektreihenfolge in Stereobildern 10

2.7 Subpixelgenaue Disparität aus [Badino 2003] 11

2.8 Parameter der optischen Spurerkennung 13

3.1 Leitpfostenmodell der Suchmatrix 17

3.2 Leitpfostenmodell der Suchvektoren 17

3.3 horizontaler Suchvektor 17

3.4 vertikaler Suchvektor 17

3.5 Beispiel für die Anwendung des Matched Filter 23

3.6 Gesamtablauf des Verfahrens der Kantenverkettung 24

3.7 3x5 Sobeloperator 25

3.8 Punktverkettung 26

3.9 Beispiel für die Anwendung der Kantenverkettung 29
3.10 Gesamtablauf des Verfahrens der Integralsuche 30
3.11 Vertikale und horizontale Integration 31
3.12 Beispiel für die Anwendung der Integration 34
3.13 Eigenschaften der Verfahren 35
3.14 Beispiel für ROC Kurven 36
3.15 Beispielbilder aus Sequenzen zur ROC Generierung 37
3.16 ROC Kurve für den vertikalen Schwellwert der Integration 39
3.17 ROC Kurve für den vertikalen Schwellwert der Integration 40
3.18 ROC Kurve für den Toleranzparameter der Integration 41
3.19 Parameterwerte für die Kantenverkettung 42
3.20 ROC Kurven für die Parameter der Kantenverkettung 43
3.21 Integration und Kantenverkettung kombiniert 46

4.1 Vergleich der vorgestellten Verfahren 48
4.2 Ablaufdiagramm der Leitpfostenerkennung 50
4.3 Leitpfostenverfolgung in Bildsequenzen 53

5.1 Landmarkennavigation 57
5.2 Positionsbestimmung mittels Dead-Reckon-Methode 58
5.3 Positionsfehler in Abhängigkeit der Anzahl an Landmarken 61
5.4 Häufigkeitsverteilung von Landmarken 61
5.5 Berechnete abgefahrene Strecke 62
5.6 Straßenmodelle zur Messgleichung der Spurprädiktion 64
5.7 Normalverteilung mit 1σ–Bereich 67
5.8 Straßenhöhe bilinear interpoliert 68

6.1 Schätzung der Straßenkrümmung mittels sechsdimensionalem Modell 72
6.2 Schätzung der Straßenkrümmung mittels vierdimensionalem Modell 72
6.3 Testsequenz Bild 003 74
6.4 Testsequenz Bild 100 74
6.5 Testsequenz Bild 150 75
6.6 Testsequenz Bild 200 75
6.7 Testsequenz Bild 250 76
6.8 Testsequenz Bild 380 76
6.9 Testsequenz Bild 412 77
6.10 Testsequenz Bild 450 77
6.11 Testsequenz Bild 150 mit Straßenkrümmung 80

A.1 Lochkameramodell 85

Literaturverzeichnis

[Badino 2003] Hernán Badino. *Comparitive Research of Stereo Vision Methods*. Diplomarbeit, DaimlerChrysler AG, 2003.

[Blackman 1986] Samuel Blackman. *Multiple-Target Tracking with Radar Applications*. Artech House, 1986.

[Brammer et al. 1994] Karl Brammer, Gerhard Siffling. *Kalman-Bucy-Filter. Deterministische Beobachtung und stochastische Filterung*. Oldenburg Verlag, 1994.

[Bronstein et al. 1997] I.N. Bronstein, K.A. Semendjajew. *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, 3. Auflage, 1997.

[Bundesamt 2003a] Statistisches Bundesamt. *Neuzulassungen von Pkw*. 2003. `http://www.destatis.de`.

[Bundesamt 2003b] Statistisches Bundesamt. *Polizeilich erfasste Unfälle*. 2003. `http://www.destatis.de`.

[DCAG 2001] Presse-Information DCAG. *DaimlerChrysler präsentiert zur IAA die Vision des Unfallfreien Fahrens*, August 2001.

[Dickmanns et al. 1986] E.D. Dickmanns, A. Zapp. *A curvature-based scheme for improved road vehicle guidance by computer vision*. In *Proc. SPIE Conference on Mobile Robots*, 1986.

[Föllinger 1994] Otto Föllinger. *Regelungstechnik*. Hüthig, 8., überarbeitete Auflage, 1994.

[Franke 1992] Uwe Franke. *Real time 3D-road modeling for autonomous vehicle guidance*. In *Selected Papers of the 7th Scandinavian Conference on Image Anaysis, World Scientific Publishing Company*, 1992.

[Franke et al. 1994] Uwe Franke, Steffi Mehring, Avshalom Suissa, Stefan Hahn. *The Daimler-Benz Steering Assistant - a Spin-off from Autonomous Driving*. In *Proc. IEEE Conference on Intelligent Vehicles*, pages 120–124, 1994.

[FSV 1984] Arbeitsgruppe Straßenentwurf der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FSV. *Teil Linienführung (RAS-L), Abschnitt 1: Elemente der Linienführung RMS-L-1*. In *Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS)*, 1984.

[Gehrig et al. 1991] Stefan Gehrig, Dieter Hoffmann, Christof Morys. *Detektion von Leitpfosten in Straßenszenen unter Verwendung von Methoden der digitalen Bildverarbeitung*. Studienarbeit BA Stuttgart, 6. Semester, Mai 1991.

[Gern et al. 2000] Axel Gern, Uwe Franke, Paul Levi. *Advanced Lane Recognition – Fusing Vision and Radar*. In *Proc. IEEE Conference on Intelligent Vehicles*, 2000.

[Gern et al. 2001] Axel Gern, Thomas Gern, Uwe Franke, Gabi Breuel. *Robust Lane Recognition Using Vision and DGPS Road Course Information*. In *Proc. IEEE Conference on Intelligent Vehicles*, 2001.

[Giesa 1999] Siegfried Giesa. *Hinweise für das Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen (HAV)*. Kirschbaum Verlag Bonn, 11. Auflage, 1999.

[Haberäcker 1995] Prof. Dr.-Ing. Peter Haberäcker. *Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung*. Carl Hanser Verlag München Wien, 1995.

[Heinrich 1998] Stefan Heinrich. *Optische Fahrbahnerkennung zur teilautonomen Fahrzeugführung auf schlecht strukturierten Fahrbahnen*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1998.

[Jähne 1997] Prof. Dr. Bernd Jähne. *Digitale Bildverarbeitung*. Springer-Verlag, 4., völlig neubearbeitete Auflage, 1997.

[Kalman 1960] Rudolf Emil Kalman. *A new approach to linear filtering and prediction problems*. *Journal of Basic Engineering*, B 82:35–45, 1960.

[Knöppel 2001] Carsten Knöppel. *Stereobasierte und spurgenaue Erkennung von Straßenfahrzeugen im Rückraum eines Straßenfahrzeugs*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät Elektrotechnik, Technische Informatik, Dezember 2001.

[Kolbe 2000] Uli Kolbe. *Robuste Ermittlung des abgefahrenen Wegs eines Straßenfahrzeugs*. Studienarbeit Universität Stuttgart, Institut A für Mechanik, Juli 2000.

[Levi et al. 2001] Paul Levi, Hans Breckle, Armin Bantle. *Konzeption und Spezifikation von Fusionsobjekten als Schnittstelle zwischen der Fusionsebene und*

der Situationsinterpretation. Technischer Bericht, Universität Stuttgart, 2001.

[Marr et al. 1976] David Marr, Tomaso Poggio. *Cooperative Computation of Stereo Disparity*. *Science*, 194:283–287, 1976.

[Mbuton 2002] Doh Mbuton. *Eigenpositionsbestimmung mittels eines Stereokamerasystems*. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, November 2002.

[Moravec 1998] Hans Peter Moravec. *Robot*. Oxford University Press, November 1998.

[Mysliwetz 1990] Birger D. Mysliwetz. *Parallelrechner-basierte Bildfolgen-Interpretation zur autonomen Fahrzeugsteuerung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 1990.

[Richter 1990] Bernd Richter. *Schwerpunkte der Fahrzeugdynamik: Fahrzeugschwingungen, Kurshaltung, Vierradlenkung, Allradantrieb*. Verlag TÜV Rheinland, 1990.

[Schwarzinger 1998] Michael Schwarzinger. *Optische Spurerkennung*. Technischer Bericht, DaimlerChrysler AG, 1998.

[Trzebiatowski 2003a] Michael Smuda von Trzebiatowski. *Konzept zur Spurerkennung auf Landstraßen*. Technischer Bericht, DaimlerChrysler AG, März 2003.

[Trzebiatowski 2003b] Michael Smuda von Trzebiatowski. *Multihypothesenanalyse zur optischen Spurerkennung auf schlecht strukturierten Straßen*. Diplomarbeit, TU-Ilmenau, Februar 2003.

[Ulmer 1992] Berthold Ulmer. *VITA - An Autonomous Road Vehicle (ARC) for Collision Avoidance in Traffic*. In *Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*, pages 26–41, 1992.

[Ulmer 1994] Berthold Ulmer. *VITA II - Active Collision Avoidance in Real Traffic*. In *Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*, 1994.

[Wachter 2000] Markus Wachter. *Multisensorfusion zur Fahrzeug–Querführung unter Verwendung eines Fahrszenensimulators*. Diplomarbeit, Fachhochschule Stuttgart, 2000.

[Welch et al. 2001] Greg Welch, Gary Bishop. *An Introduction to the Kalman Filter*. Technischer Bericht, University of North Carolina at Chapel Hill, 2001. `http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/kalman_filter/kalman.html`.

[Zomotor 1987] Adam Zomotor. *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. Vogel Buchverlag, 1987.

Erklärung

Hiermit versichere ich, Uwe-Philipp Käppeler, die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und keine weiteren als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt zu haben.

Datum Unterschrift